

# Elektrische Messung mechanischer Größen

Von

**Dr.-Ing. Paul M. Pflieger**  
Berlin

Mit 296 Abbildungen im Text



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH  
1940

ISBN 978-3-662-05474-1

ISBN 978-3-662-05519-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-05519-9

**Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.**

**Copyright 1940 by Springer-Verlag Berlin Heidelberg**

**Ursprünglich erschienen bei Julius Springer in Berlin 1940**

**Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1940**

## Vorwort.

Die elektrischen Meßgeräte und Meßverfahren dienen nur in beschränktem Umfang der Messung elektrischer Größen als Selbstzweck, weitaus häufiger ist die elektrische Größe nur ein Maßstab für andere nichtelektrische Werte. Die ungeheuere Ausdehnung dieses Gebietes und die großen Vorteile elektrischer Messung haben mich ermutigt, in einer besonderen Arbeit die Möglichkeiten der Umwandlung mechanischer Größen in elektrische und der mechanischen Beeinflussung elektrischer Stromkreise erschöpfend zu behandeln. Dabei habe ich mich bewußt auf die mechanischen Grundgrößen Weg, Kraft und Zeit, sowie ihre Differentialquotienten Geschwindigkeit und Beschleunigung beschränkt und die Sondergebiete der akustischen, hydraulischen, pneumatischen und wärmetechnischen Messungen, der Meteorologie, Ballistik, See- und Luftfahrt außer Betracht gelassen, da die Meßgrößen dieser Sondergebiete auf die fünf mechanischen Grundgrößen zurückgeführt werden können und die Anpassung der Meßwertgeber an besondere Anforderungen im allgemeinen wenig Schwierigkeiten macht. Die in dem Abschnitt der Anwendungsverfahren gezeigten Geräte sind deshalb auch nur als Ausführungsbeispiele zu werten. Die häufigere Erwähnung des Namens Siemens & Halske gegenüber anderen erklärt sich zwanglos aus dem vielseitigen Fertigungsprogramm und meiner Tätigkeit im Meßgerätelaboratorium dieser Firma; man verzeihe mir diese Einseitigkeit. Ich selbst aber möchte der Siemens & Halske AG., sowie allen anderen Firmen, die mir Unterlagen zur Verfügung stellten, für ihre lebenswürdige Unterstützung meinen verbindlichsten Dank aussprechen. Bei der zeichnerischen Darstellung der Geräte und Schaltungen habe ich mich im wesentlichen an die Darstellung in den Schaltzeichen und Schaltbildern für Starkstromanlagen und in den Schaltzeichen für Fernmeldeanlagen DIN VDE 700 bis 719 gehalten und nur da, wo mir die Kurzzeichen für den weniger Geübten mißverständlich erschienen, eine ausführlichere Darstellung gewählt.

Berlin, im Januar 1940.

P. M. Pflier.

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
A. Grundlagen der elektrischen Messung . . . . .	1
I. Vorteile elektrischer Meßgeräte . . . . .	1
II. Die Maßstabeigenschaften der elektrischen Meßgeräte . . . . .	2
1. Genauigkeit . . . . .	2
2. Spannungseinfluß . . . . .	8
a) Spannungsgleichhalter . . . . .	9
b) Spannungsunabhängige Meßgeräte . . . . .	16
3. Frequenz- und Temperatureinfluß . . . . .	22
4. Auflösungsvermögen . . . . .	23
5. Übertragungsentfernung . . . . .	24
6. Ausführung von Rechenoperationen . . . . .	26
B. Umwandlung mechanischer in elektrische Größen . . . . .	32
I. Physikalischer Zusammenhang zwischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften . . . . .	32
1. Abmessungen und Widerstand eines Leiters . . . . .	32
2. Elastischer Spannungszustand und spezifischer Widerstand . . . . .	34
3. Elastischer Spannungszustand und Permeabilität . . . . .	35
4. Absorption von Röntgenstrahlen . . . . .	37
II. Erzeugung einer elektrischen Größe durch eine mechanische . . . . .	40
1. Induktionsgesetz . . . . .	40
a) Spannungsgeber . . . . .	40
b) Frequenzgeber . . . . .	42
2. Piezoelektrizität . . . . .	42
III. Mechanische Beeinflussung eines elektrischen Stromkreises . . . . .	44
1. Impulssender . . . . .	44
2. Widerstandssender . . . . .	46
3. Lichtelektrische Sender . . . . .	54
4. Kapazitive Sender . . . . .	56
5. Induktive Sender . . . . .	62
C. Meßverfahren . . . . .	67
I. Wegmessung . . . . .	67
1. Stellungsanzeige . . . . .	67
2. Elektrische Mikrometer . . . . .	75
3. Dickenmesser für Drähte, Bänder, Platten und Rohre . . . . .	87
4. Messung von Auftragsdicken . . . . .	99

## Inhaltsverzeichnis.

V

	Seite
II. Kraftmessung . . . . .	106
1. Dehnungsmesser . . . . .	106
2. Drehmomentmesser . . . . .	112
3. Druckmeßdosen . . . . .	115
4. Schnittkraftmesser . . . . .	119
5. Zugkraftmesser . . . . .	122
6. Druckindikatoren . . . . .	124
III. Geschwindigkeitsmessung . . . . .	136
1. Drehzahlmessung . . . . .	136
2. Schlupfmessung . . . . .	143
3. Messung von Fahrzeuggeschwindigkeiten . . . . .	146
4. Schnittgeschwindigkeitsmesser . . . . .	146
5. Messung von Geschößgeschwindigkeiten . . . . .	147
IV. Messung von Beschleunigungen, Schwingungen und Erschütterungen	148
1. Drehbeschleunigungsmesser . . . . .	148
2. Schwingungsmesser . . . . .	150
V. Zeitmessung . . . . .	159
1. Synchronuhren . . . . .	159
2. Zeitregistriergeräte . . . . .	167
3. Kurzzeitmesser . . . . .	191
4. Zeitwaagen . . . . .	196
Schrifttum . . . . .	208
Namen- und Sachverzeichnis . . . . .	218

# A. Grundlagen der elektrischen Messung.

## I. Vorteile elektrischer Meßgeräte.

Die mechanischen Größen, Weg, Zeit, Kraft, Geschwindigkeit, Beschleunigung sind mit den Sinnen des Menschen der Größe nach abschätzbar und lassen sich mit den Erfahrungswerten der Umwelt vergleichen, wovon zahlreiche Redewendungen Schneckentempo, Hahenschrei, Katzensprung, sowie ursprüngliche Maßeinheiten Fuß, Tagwerk, Scheffel, Bund anschaulich zeugen; bei der Abschätzung der elektrischen Größen aber versagen Erfahrung und Sinne. Die Elektrotechnik war deshalb von Anfang an auf Meßgeräte angewiesen, und es entstand als besonderer Zweig eine hochentwickelte elektrische Meßtechnik. Die elektrischen Maßeinheiten beruhen auf dem CGS-System und seinen mit sehr großer Genauigkeit festliegenden Normalien, sie lassen sich demnach als Maßstab für alle in diesem System meßbaren Größen verwenden. Die elektrischen Meßgeräte selbst weisen eine Reihe von Eigenschaften auf, die ihre Anwendung für nichtelektrische Größen wünschenswert erscheinen ließen und ihnen den Weg in fremde Arbeitsgebiete öffneten. Als erstes großes Arbeitsgebiet eroberte sich die elektrische Meßtechnik das Reich der Wärmetechnik und ist nunmehr seit Jahren in ständigem Vordringen in das Gebiet der mechanischen Größen. Die Überlegenheit der elektrischen Verfahren für alle technischen Messungen beruht auf steter Meßbereitschaft, großem Auflösungsvermögen und nahezu unbegrenzter Übertragungsentfernung, sowie der Möglichkeit der Aufzeichnung, Integration und Zählung. Eine wesentliche Rolle spielt ferner die geringe Rückwirkung der Meßeinrichtung auf den aufzunehmenden Vorgang. Auf der einen Seite können schnell veränderliche Vorgänge in ihrem vollen Ablauf messend verfolgt und in allen Einzelheiten sichtbar gemacht, auf der anderen Seite kann der Ablauf des Geschehens regelnd beeinflusst und nach vorgeschriebenen Gesetzen gesteuert werden. Viele gleichartige Messungen lassen sich in kürzester Zeit bewältigen, gleichbleibende Güte und Zeitmaß einer Fertigung dauernd überwachen und es gibt kaum einen Meßvorgang, der sich nicht mit Hilfe elektrischer Meßgeräte besser oder in kürzerer Zeit ausführen ließe. Dazu kommt die Möglichkeit, Meßergebnisse räumlich getrennter Stellen verzögerungsfrei nach einer Zentrale zu übertragen, aufzuzeichnen, mit anderen Größen zu vergleichen oder in mathematische Beziehungen zu bringen. Die elektrischen Meßgeräte passen sich allen Betriebserfordernissen und Meßbereichen an.

Die technischen Geräte überstreichen einen Bereich von etwa 12 Dekaden, Skalenlängen und Gehäuseabmessungen reichen von einigen Millimetern bis zu mehreren Metern; Beruhigungszeit, Eigenfrequenz und Dämpfung sind in weiten Grenzen wählbar. An äußeren Vorzügen treten dazu saubere und bequeme Handhabung, leichte Montage und Auswechslung, geringe Wartung, einfaches Ablesen und Auswerten. Den Erfordernissen der nichtelektrischen Betriebe folgend wurden überlastungsfähige, schüttelfeste, schlagwetter- und explosions sichere, seewasser-, tropen- und wärmebeständige Ausführungen entwickelt mit dem Ziel, jedem Betrieb das bestgeeignete Gerät mit einem Höchstmaß an Betriebssicherheit und Lebensdauer zur Verfügung zu stellen.

## II. Die Maßstabeigenschaften der elektrischen Meßgeräte.

### 1. Genauigkeit.

Die VDE-Regeln für Meßgeräte, VDE 0410, sowie die internationalen Règles pour les appareils de mesure électriques indicateurs: ampèremètres, voltmètres et wattmètres monophasés der Commission Électrotechnique Internationale (IEC) kennen 5 Genauigkeitsklassen 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5, denen ebenso große, zulässige Anzeigefehler, in Prozent vom Meßbereichendwert ausgedrückt, entsprechen. Die normale Genauigkeit technischer Geräte ist  $\pm 1 \dots 1,5\%$  vom Meßbereichendwert.

Eine Anzeigetoleranz von 1 % vom Höchstwert bedeutet bei 50 %iger Ausnutzung des Meßbereiches eine Toleranz von 2 % vom Sollwert und bei 5 %iger Ausnutzung der Skala eine Anzeigetoleranz von 20 % vom Sollwert. Diese verhältnismäßig weiten Fehlergrenzen elektrischer Meßgeräte veranlassen zuweilen Erörterungen über die geringe Genauigkeit elektrischer Meßverfahren, und es wird dabei völlig übersehen, daß die Genauigkeit und Empfindlichkeit des Meßgerätes, sowie die Genauigkeit und Empfindlichkeit des Meßverfahrens bzw. der Meßschaltung streng getrennt werden müssen. Die Genauigkeit eines Meßgerätes ist durch das angewendete physikalische Prinzip, die konstruktive Durchbildung und die Eichung bestimmt und kann durch eine Empfindlichkeitssteigerung nicht geändert werden. Diese Empfindlichkeitssteigerung bedeutet vielmehr lediglich eine Änderung des Meßbereiches; dagegen kann sowohl eine Empfindlichkeitssteigerung der Schaltung wie eine Empfindlichkeitssteigerung des Verfahrens zu einer Erhöhung der Genauigkeit führen. Einige Beispiele sollen uns diese Verhältnisse deutlicher machen. Betrachten wir zunächst eine Federwaage mit dem Meßbereich 10 kg. Eine Steigerung der Empfindlichkeit der Waage durch Einhängen einer 10mal schwächeren Feder würde den Meßbereich auf 1 kg vermindern. Die prozentuale Genauigkeit, bezogen auf den Meßbereichumfang, wäre aber unverändert geblieben und die unerwünschten

Einflüsse der Temperatur, der Erdbeschleunigung, der Federnachwirkung und der Reibung wären gleich groß oder hätten zugenommen. Ähnlich sind die Verhältnisse bei einem elektrischen Meßgerät nach dem Ausschlagverfahren. Das Gerät habe eine Anzeigetoleranz von 1% und einen Meßbereich von  $0 \dots a = 0 \dots 100\%$ . Eine Steigerung der Empfindlichkeit des Meßgerätes auf das 10fache würde eine Verringerung des Meßbereiches auf  $0 \dots 0,1a$  bedeuten, und es würden nunmehr die Größen  $0 \dots 0,1a$  mit derselben Genauigkeitstoleranz von 1% gemessen werden. Die prozentuale Genauigkeit wäre also trotz 10facher Empfindlichkeit des Meßgerätes dieselbe geblieben. Die unerwünschten Störeinflüsse würden in gleicher Größe, möglicherweise sogar in höherem Maße, in Erscheinung treten. Anders liegen die Verhältnisse, wenn das Instrument in einer Brückenschaltung verwendet wird. Die Empfindlichkeit des Brückeninstruments sei zunächst so gewählt, daß es bei einer Brückenverstimmung von 10% seinen Endausschlag erreicht. Nachdem der Abgleich erfolgt ist, möge die Empfindlichkeit der Schaltung etwa durch Verringern des Vorwiderstandes vor dem Meßgerät auf das 10fache und nach neuem Abgleich wiederum auf das 10fache gesteigert werden. Die Empfindlichkeit beträgt nun 0,1% des Widerstandswertes und ließe sich entsprechend der Toleranz des Meßgerätes auf 1% genau feststellen, womit der Widerstand auf 0,001% genau bestimmt wäre. Dieselbe Genauigkeitssteigerung ließe sich auch bei unveränderter Schaltung durch Erhöhung der Brückenspannung auf den 100fachen Wert erreichen. In diesem Fall ist also durch eine Steigerung der Schaltungsempfindlichkeit eine Erhöhung der Meßgenauigkeit möglich. Das mechanische Abbild der Brückenschaltung wäre die Hebelwaage, bei der die prozentuale Genauigkeit mit zunehmendem Meßbereich wächst und die Empfindlichkeit etwa durch Verlängern der Hebelarme gesteigert werden kann.

In der Brückenschaltung haben wir demnach eine Möglichkeit, die Genauigkeit zu erhöhen. Ähnliche Mittel sind Differenz-, Vergleichs- und Kompensationsschaltungen, sowie die Meßbereichunterteilung und die Nullpunktunterdrückung. Von allen diesen Mitteln wird in der elektrischen Meßtechnik weitgehend Gebrauch gemacht und häufig werden mehrere Mittel gleichzeitig angewendet; so bei der Brückenschaltung die Meßbereich- und Empfindlichkeitswahl.

Die Nullpunktunterdrückung wendet man an, wenn ein bestimmter, wenig veränderlicher Wert, beispielsweise eine Maschinendrehzahl mit sehr hoher Genauigkeit, ermittelt werden soll. Ein Drehzahlmesser mit dem Meßbereich  $0 \dots 1000$  Umläufe/min und einer Genauigkeitstoleranz von 1% würde beispielsweise eine Erfassung der Drehzahl auf 10 Umdr/min genau ermöglichen. Ein Drehzahlmesser mit unterdrücktem Nullpunkt und dem Meßbereich  $980 \dots 1000$  U/min würde aber bei derselben Genauigkeitstoleranz von 1% die Drehzahl auf 0,2 Umdr/min genau angeben.



Nun läßt sich allerdings weder bei mechanischen, noch bei elektrischen Meßgeräten die Empfindlichkeit beliebig steigern. Die praktische Grenze wird durch die unvermeidlichen Störeinflüsse gezogen und bereits in ihrer Nähe tritt eine erhebliche Genauigkeitsminderung ein und wir müssen uns bei jeder Messung über die Grenzen der Empfindlichkeit und Genauigkeit sowohl des Meßverfahrens wie des Meßgerätes klar werden.

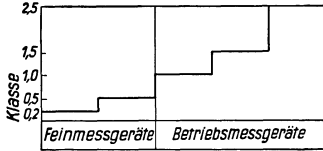


Abb. 1. Klasseneinteilung der elektrischen Meßgeräte VDE 0410 § 3. IEC-Publ. 51—7. [Aus ETZ Bd. 60 (1939) S. 595.] Bestimmungen: Meßgeräte, welche allen Bedingungen ihrer Klasse entsprechen, erhalten ein Klassenzeichen.

Die in den VDE-Klassen festgelegten Anzeige-Toleranzen beziehen sich auf den Normalzustand; sie erhöhen sich durch die Einflüsse von Temperatur, Spannung, Frequenz, Gebrauchslage und Fremdfeldern, sofern diese von den Normal-

werten abweichen. Die zulässige Größe dieser Einflüsse richtet sich nach der Genauigkeitsklasse und die Einflußgrößen wurden so definiert, daß die Größe des zulässigen Fehlers mit der Klassenbezeichnung

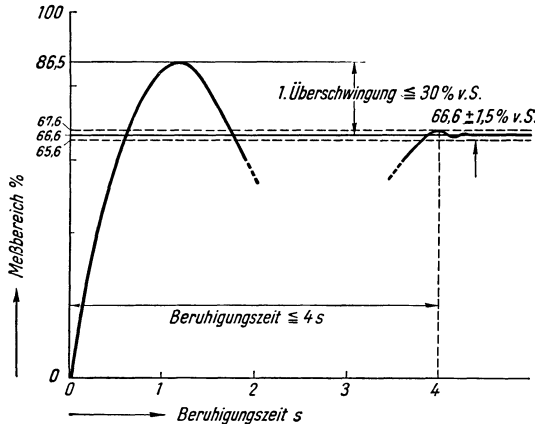


Abb. 2. Dämpfungsvorschriften für elektrische Meßgeräte VDE 0410 § 21. IEC-Publ. 51—5. [Aus ETZ Bd. 60 (1939) S. 595.]

- | Bestimmungen:  |  | Ausnahmen:                       |  |
|--|--|----------------------------------|--|
| 1. Prüfwert gleich $\frac{2}{3}$ Meßbereich-Endwert; |  | 1. Skalenlänge > 150 mm;         |  |
| 2. Zahl der Überschwingungen: beliebig;              |  | 2. Zeigerlänge > 150 mm;         |  |
| 3. Messung der Überschwingungen in Skalenerwerten;   |  | 3. thermische Meßgeräte;         |  |
| 4. Typenprüfung.                                     |  | 4. Vibrationsmeßgeräte;          |  |
|  |  | 5. Meßgeräte mit Bandaufhängung. |  |

übereinstimmt, wodurch ein leicht zu behaltendes Schema entsteht. In der Klasse 1 betragen also Anzeigefehler und Einflußwerte je 1%, wobei jedoch die Einflußwerte teils auf den Soll-, teils auf den Höchstwert und teils auf die Skalenlänge bezogen werden. In den Abb. 1 bis 7 sind die wichtigsten VDE- und IEC-Vorschriften für Meßgeräte dargestellt.

Die VDE-Vorschriften gelten zunächst nur für Meßgeräte, welche elektrische Größen unmittelbar anzeigen oder aufschreiben, also nicht

für Meßgeräte, welche in mechanischen Werten geeicht sind, und ebenso wenig für Meßgeräte in Verbindung mit Verstärkern, doch wird man zweckmäßig auch diesen Geräten die Regeln für Meßgeräte zugrunde legen. Allerdings vermag in diesen Fällen die Klassengenauigkeit des

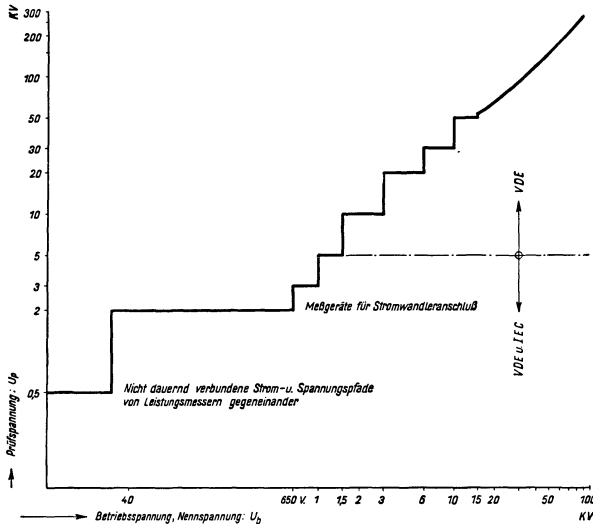


Abb. 3. Spannungsprüfung elektrischer Meßgeräte VDE 0410 § 22. IEC-Publ. 51—6. [Aus ETZ Bd. 60 (1939) S. 595.]

Bestimmungen:

1. Prüfdauer: 1 min.
2. Spannungsverlauf: praktisch sinusförmig.
3. Frequenz: 15...60 Hz.
4. Ausführung:
  - I. Prüfung gegen das Gehäuse.
    - A. Metallgehäuse: Stückprüfung zwischen den verbundenen Strom- und Spannungspfaden und dem Gehäuse sowie allen äußeren Metallteilen.
    - B. Isolierstoffgehäuse:
      - a) Typenprüfung: zwischen den verbundenen Strom- und Spannungspfaden und einer allseitigen Umkleidung aus Metallfolie, welche von den Klemmen 2 cm Abstand hat.
      - b) Stückprüfung: Zwischen den verbundenen Strom- und Spannungspfaden und allen miteinander verbundenen äußeren Metallteilen einschließlich der Nullstellung und der Befestigungsteile.
  - II. Prüfung zwischen getrennten Stromkreisen.
    - A. Zwischen den getrennten Stromkreisen mit derselben Prüfspannung wie gegen Gehäuse.
    - B. Zwischen den nicht dauernd verbundenen Strom- und Spannungspfaden von Leistungs- und Leistungsfaktormessern mit 500 V.
5. Hochspannungspfeil: Meßgeräte, welche die vorgeschriebene Prüfspannung nicht aushalten, bekommen einen Hochspannungspfeil.
6. Prüfspannungszeichen: Meßgeräte, welche die Prüfung bestanden haben, bekommen ein Prüfspannungszeichen.

elektrischen Meßgerätes nichts über die Gesamtgenauigkeit der Meßanlage auszusagen, da sich die Fehler des mechanisch-elektrischen Gebers und der Schaltung günstig oder ungünstig auf die Gesamtgenauigkeit auswirken können. Durch Addition aller ungünstigen Einflüsse können sehr erhebliche Fehler entstehen, und man muß bestrebt sein, die Einflüsse selbst weitgehend auszuschalten und die Beeinflussbarkeit der Meßgeräte unter die VDE-mäßig zulässige Grenze zu bringen. Den Betriebserfordernissen entsprechend wird von Fall zu Fall der eine oder andere Einfluß

auf Kosten anderer Eigenschaften besonders sorgfältig ausgeglichen werden, und es ist für den Instrumentenbauer wichtig, sich beim Ent-

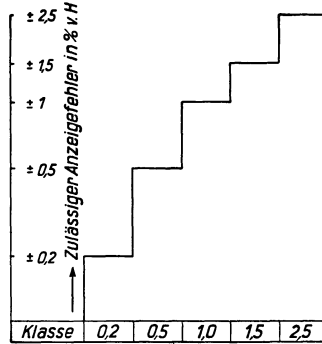


Abb. 4. Fehlergrenzen elektrischer Meßgeräte VDE 0410 §§ 14 und 24. IEC-Publ. 51—8. [Aus ETZ Bd. 60 (1939) S. 595.]

Bestimmungen:

Die Größe des Anzeigefehlers wird angegeben bei Meßgeräten:

1. mit einseitigem Meßbereich ..... in Prozenten vom Meßbereich-Endwert
2. deren Meßbereich beiderseits vom Nullpunkt ..... in Prozenten der Summe der Meßbereich-Endwerte liegt
3. mit mechanisch unterdrücktem Nullpunkt... in Prozenten vom Meßbereich-Endwert
4. ohne mechanische Richtkraft ..... in Prozenten der dem Meßbereich entsprechenden Skalenlänge

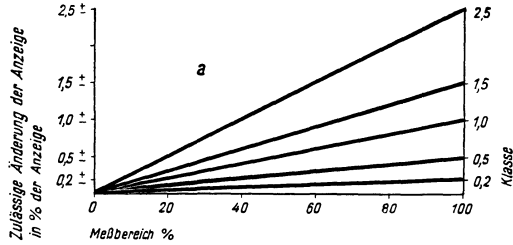
Bedingungen für die Einhaltung der Fehlergrenzen:

1. Temperatur .....  $20 \pm 1^\circ$  oder Bezugstemperatur
2. Gebrauchslage ..... nach Lagezeichen, oder wenn keines vorhanden ist, in senkrechter und waagerechter Lage
3. Kurvenform bei Wechselstrom ..... praktisch sinusförmig
4. Frequenz ..... Nennfrequenz oder, wenn keine angegeben ist, 15...60 Hz
5. bei Leistungs-, Leistungsfaktor-, Frequenz- und Quotientenmessern ..... Nennspannung
6. bei Leistungsmessern .....  $\cos \varphi = 1$
7. bei Leistungsfaktormessern ..... 20...100% des Nennstromes
8. Fehlertafeln ..... dürfen bei der Bestimmung der Klassengenauigkeit nicht berücksichtigt werden

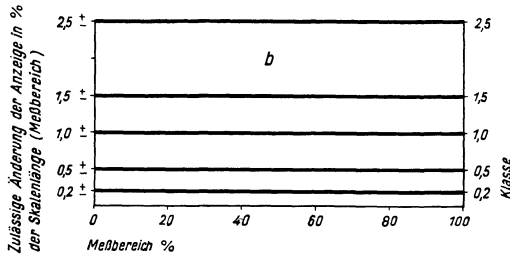
	Klasse				
	0,2	0,5	1,0	1,5	2,5
9. Fremdfelder .....	ausgeschaltet; Drehspul-Meßgeräte in gekennzeichnete Nord-Süd-Richtung aufstellen, sofern ein Nord-Südpfeil vorhanden ist			ausgeschaltet	
10. Strommesser und Spannungsmesser...	kurz oder lang dauernde Einschaltung			1 h mit 80% des Meßbereich-Endwertes vorbelasten	
11. Leistungsmesser ...	kurz oder lang dauernde Einschaltung des Spannungspfades mit Nennspannung, sowie kurz oder lang dauernde Einschaltung des Strompfades			1 h mit 100% Nennspannung und 80% Nennstrom vorbelasten	
12. Leistungsfaktormesser .....	—			1h mit 100% Nennspannung und 80% Nennstrom vorbelasten	

wurf einer Meßeinrichtung von vornherein über alle Betriebsverhältnisse zu unterrichten. Die zeitliche Konstanz elektrischer Meßgeräte ist gut, und man kann bei sachgemäßem Gebrauch mit einer dauernden Einhaltung der zugesagten Genauigkeitswerte rechnen.

Außer den Meßgeräten selbst werden in den Meßschaltungen Widerstände, Induktivitäten, Kapazitäten, Wandler und Stromquellen benötigt. Mit Ausnahme der Stromquellen sind alle diese Geräte bei



a) Meßgeräte mit mechanischer Richtkraft.



b) Meßgeräte ohne mechanische Richtkraft.

Abb. 5 a und b. Temperatur-, Frequenz- und Spannungseinfluß elektrischer Meßgeräte VDE 0410 §§ 9, 10, 13, 25, 26, 27. IEC-Publ. 51—10, 11. [Aus ETZ Bd. 60 (1939) S. 595.]

Bestimmungen:

1. Änderung der Raumtemperatur um  $\pm 10^\circ$  gegenüber der Bezugstemperatur oder gegenüber  $20^\circ$ ;
2. Änderung der Frequenz gegenüber der Nennfrequenz um  $\pm 10\%$  oder innerhalb des Nennfrequenzbereiches;
3. Änderung der Spannung gegenüber der Nennspannung um  $+20\%$  oder innerhalb des Nennspannungsbereiches.

Ausnahmen:

1. Bei Meßgeräten der Klasse 0,2 ohne Frequenzangabe darf der Frequenzeinfluß von 15...60 Hz  $\pm 0,1\%$  nicht überschreiten;
2. In IEC-Publ. 51 ist kein Spannungseinfluß festgelegt.

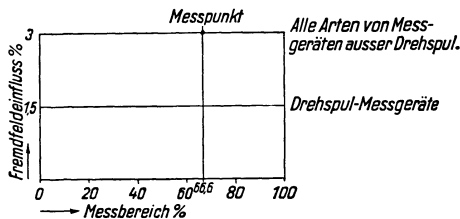


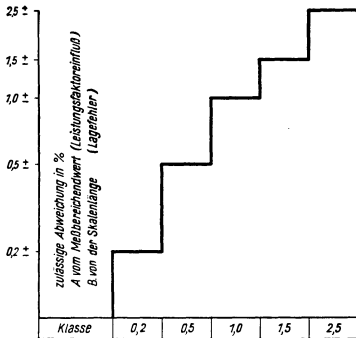
Abb. 6. Einfluß eines Fremdfeldes auf die Anzeige elektrischer Meßgeräte VDE 0410 §§ 28. IEC-Publ. 51—12. [Aus ETZ Bd. 60 (1939) S. 595.]

Bestimmungen:

1. Fremdfeld von 5 Gauß; gleicher Stromart, gleicher Frequenz, ungünstigster Phasenlage und ungünstigster räumlicher Lage;
2. Prüfung bei  $\frac{2}{3}$  vom Skalen-Endwert;
3. bei Leistungsmessern Prüfung bei: Nennspannung,  $\frac{2}{3}$  Nennstrom,  $\cos \varphi = 1$ ;
4. bei Meßgeräten ohne mechanische Richtkraft bezieht sich der Fremdfeldeinfluß auf die dem Meßbereich entsprechende Skalenzlänge.

sorgfältiger Auswahl des Materials und sachgemäßer Herstellung hinreichend genau und zeitlich unveränderlich. Ihre Toleranzen sind in den Toleranzen des Meßgerätes enthalten, sofern sie einen Bestandteil des Gerätes bilden oder mit ihm zusammen abgeglichen werden. Für austauschbare Vor- und Nebenwiderstände sind in den Regeln für Meßgeräte besondere Genauigkeitsklassen mit den Werten 0,1; 0,2;

0,5 festgelegt, für Meßwandler sind entsprechende Festlegungen in den Regeln für Wandler VDE 0414 getroffen.



#### A. Einfluß des Leistungsfaktors bei Leistungsmessern. Bestimmungen:

1. Nennstrom, Nennspannung, Phasenverschiebung 90° induktiv;
  - a) Nennstrom, Nennspannung,  $\cos \varphi = 0,5$  induktiv und
  - b) 0,5 Nennstrom, Nennspannung,  $\cos \varphi = 1$ .

#### B. Lagefehler. Bestimmungen:

1. Bei Neigung um  $\pm 5^\circ$  aus der Gebrauchslage;
2. bei Instrumenten ohne Lagezeichen zwischen senkrechter und waagerechter Lage der Skala;
3. in IEC-Publ. 51 ist kein Lagefehler angegeben.

Abb. 7. Einfluß des Leistungsfaktors und der Lage auf die Anzeige elektrischer Meßgeräte VDE 0410 §§ 29, 30. IEC-Publ. 51—13. [Aus ETZ Bd. 60 (1939) S. 595.]

## 2. Spannungseinfluß.

Bei der Messung mechanischer Werte kommt den elektrischen Größen Strom, Spannung, Frequenz, Leistung, Widerstand nur die Eigenschaft eines Maßstabes zu, der in sich keinerlei Änderungen aufweisen darf. Die Größe des Meßstromes und die Anzeige des elektrischen Gerätes müssen demnach frei von jeder ungewollten Änderung sein. Dazu ist völlige Konstanz der Instrumente, sowie aller Teile des elektrischen Stromkreises und Unabhängigkeit von äußeren Einflüssen notwendig. Wie wir im vorhergehenden Abschnitt sahen, ist dies nur sehr bedingt der Fall, und es sind besondere Maßnahmen zu ergreifen, um die elektrischen Meßgeräte den Erfordernissen mechanischer Messungen anzupassen. Die wichtigste Einflußgröße ist bei allen Ausschlagverfahren der *Spannungseinfluß*. Ausschlagverfahren erfordern völlige Konstanz der Energiequelle oder Ausschaltung der Spannungsänderungen durch Hilfsmaßnahmen, während Änderungen der Meßspannung bei Nullverfahren nur die Empfindlichkeit, nicht aber die Genauigkeit beeinflussen. Für die ohne Stromentnahme arbeitenden Kompensationsverfahren stehen in den Normalelementen hinreichend genaue und konstante Spannungsnormale zur Verfügung, wo jedoch stromverbrauchende Geräte an Batterien oder Maschinen angeschlossen werden, sind besondere Konstanthalter oder spannungsunabhängige Meßgeräte erforderlich.

a) **Spannungsgleichhalter.** Unter Konstanthaltern versteht man Einrichtungen, deren Sekundärspannung in gewissen Grenzen unabhängig von Änderungen der Primärspannung und der Belastung ist. Von den Spannungsgleichhaltern wird hohe Genauigkeit und große Regelgeschwindigkeit gefordert. Einige der für Meßzwecke üblichen Methoden werden im folgenden kurz erläutert:

*Röhrenregler* [1] beruhen auf der Änderung des inneren Widerstandes einer Verstärkerröhre in Abhängigkeit von der Gitterspannung. In einfacher Ausführung wird in Reihe mit der Erregerwicklung des Konstantspannungsgenerators ein Elektronenrohr gelegt und sein Widerstand abhängig von dem Unterschied zwischen Soll- und Ist-Wert der Generatorspannung gesteuert, wie es in Abb. 8 gezeigt ist. Der Generator  $G$ , dessen Spannung  $U$  konstantgehalten werden soll, wird von einer nicht dargestellten Arbeitsmaschine schwankender Drehzahl angetrieben. Der Spannung  $U$  ist die konstante Kompensationsspannung  $K$  entgegengeschaltet, welche

$U$  bis auf den kleinen Restbetrag der negativen Gittervorspannung  $u_g$  kompensiert. Steigt die Drehzahl der Kraftmaschine und damit die Generatorspannung, so wird die negative Gittervorspannung größer, der Röhrenwiderstand wächst, der Erregerstrom  $i_1$  wird kleiner und die Spannung  $U$  geht wieder auf ihren Sollwert zurück. Der Parallelwiderstand  $B$  zur Röhre gestattet, einen nicht regelbaren Grunderregerstrom  $i_2$  einzustellen, dem sich der geregelte Anteil  $i_a$  überlagert. Die Erregerleistung wird der Erregermaschine  $H$  mit der Spannung  $U_1$  entnommen. Der Regler ist auch für gleichstromerregte Wechselstromgeneratoren brauchbar, wenn die Spannung  $U$  vor dem Vergleich mit der Kompensationsspannung  $K$  gleichgerichtet und mit einer Siebkette gereinigt wird. Die Empfindlichkeit eines solchen Reglers läßt sich durch entsprechende Verstärkung beliebig steigern, die Regeldauer wird durch die Eigenschaften der geregelten Maschine bestimmt. Mit marktgängigen Geräten, wie Abb. 9 eines zeigt, wird eine Regelgenauigkeit

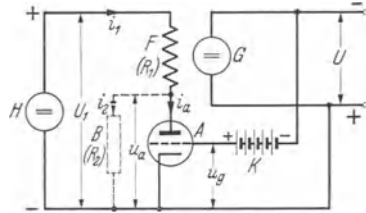


Abb. 8.  
Grundschrift der Feinregelung einer fremderregten Gleichspannung-Hauptmaschine mittels einstufigen Gleichstrom-Röhrenreglers.  
[Aus Siemens-Z. Bd. 14 (1934) S. 215.]  
 $G$  Geregelter Gleichspannungsgenerator,  
 $F$  Feldwicklung,  $H$  Hilfserrergemaschine,  
 $A$  Elektronenrohr;  $B$  Widerstand für die Grunderregung;  $K$  Vergleichsspannung ( $U > K$ ).



Abb. 9. Röhrenregler der Siemens & Halske A.G.  
[Aus Siemens-Z. Bd. 12 (1932) S. 428–43.]

von 1<sup>0</sup>/<sub>00</sub> und eine Regeldauer von etwa 0,2 s erzielt. Röhrenregler eignen sich besonders für die Speisung größerer Meßanlagen mit konstanter Spannung, sie sind für beliebige Leistung ausführbar.

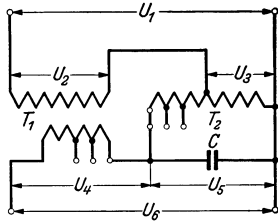


Abb. 10. Magnetischer Spannungsregler von Siemens & Halske.

$U_1$ , Eingangsspannung;  $U_6$ , Ausgangsspannung;  $T_1$ , Wandler mit Luftspalt;  $T_2$ , gesättigter Sparwandler;  $C$  Glättungskondensator.

*Magnetische Gleichhalter* [2] arbeiten mit gesättigten Drosselspulen und Kondensatoren. Eine der zahlreichen Ausführungsformen wird an Hand der Abb. 10 näher erläutert. Die schwankende Spannung  $U_1$  liegt an der Reihenschaltung eines mit Luftspalt versehenen ungesättigten Wandlers  $T_1$  und eines gesättigten Sparwandlers  $T_2$ . Mit steigender Spannung  $U_1$  wächst die Blindstromaufnahme des Wandlers  $T_2$  stark an, wodurch sich der Spannungsabfall  $U_2$  am ungesättigten Wandler  $T_1$  ebenso stark erhöht, während  $U_3$  und dementsprechend  $U_5$  nur wenig wachsen.

Zur Kompensation dieses kleinen Zuwachses wird der Spannung  $U_5$  die mit  $U_2$  verhältnismäßige Spannung  $U_4$  entgegengeschaltet, so daß die Ausgangsspannung  $U_6$  konstant bleibt. Der Kondensator  $C$  kompensiert teilweise die Blindleistungsaufnahme von  $T_2$  und glättet die

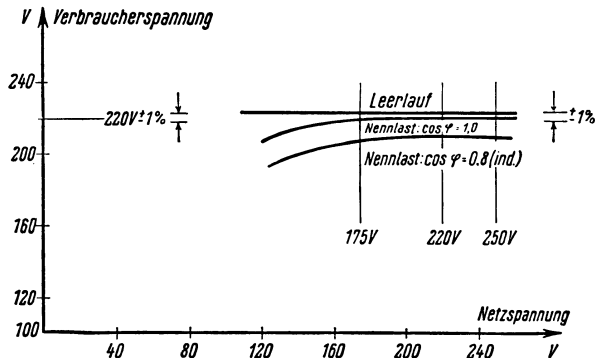


Abb. 11. Regelkennlinien eines magnetischen Spannungsgleichhalters bei reiner Wirklast. (Aus Siemens-Liste ST 5, Magnetischer Spannungsregler, Dez. 1935.)

Kurvenform. Die Höhe der Ausgangsspannung dieses Gleichhalters ist abhängig vom Phasenwinkel der Belastung; sie kann durch die Anzapfungen von  $T_2$  gewählt werden, während die Genauigkeit der Spannungsregelung durch die Anzapfungen an  $T_1$  eingestellt wird. Da die Kurvenform der Ausgangsspannung  $U_6$  sich mit der Größe der Primärspannung und der Belastung ändert, kann der Gleichhalter nicht gleichzeitig auf Konstanz des Effektivwertes und des arithmetischen Mittelwertes eingestellt werden, er ist vielmehr, je nach Art der anzuschließenden Meßgeräte, auf Konstanz eines dieser beiden Werte zu

justieren, bei Anschluß von Gleichrichter-Instrumenten also auf den arithmetischen Mittelwert. Abb. 11 zeigt Regelbereich und Genauigkeit bei reiner Wirklast. Bei Schwankungen der Eingangsspannung um  $\pm 15\%$  schwankt die Ausgangsspannung um weniger als  $1\%$ . Die magnetischen Gleichhalter sind selbstverständlich frequenzabhängig, können also nur in frequenzgeregelten Netzen angewendet werden.  $1\%$  Frequenzänderung bewirkt eine Änderung der Ausgangsspannung um  $1,5 \dots 2\%$ . Die Regelträchtigkeit liegt für den gesamten Regelbereich unter  $0,04$  s. Die magnetischen Gleichhalter eignen sich besonders für kleine Leistungen von einigen Watt bis etwa  $1$  kW und annähernd konstante Belastung. Der gesättigte Sparwandler  $T_2$  ist für die Verbraucherleistung zu bemessen, der Luftspaltwandler  $T_1$  kann für kleinere Leistung ausgeführt werden.

*Glimmspannungsteiler* [3] beruhen auf der Eigenschaft einer Glimmlicht-Entladungsstrecke, ihre Spannung nahezu unabhängig von der Strombelastung konstant zu halten. Sie werden in technischer Ausführung gemäß Abb. 12 mit mehreren hintereinanderliegenden Glimmstrecken hergestellt, deren jede einen Spannungsabfall von  $70$  V aufweist. Die Elektroden der einzelnen Glimmstrecken sind übereinandergestülpte Metallkappen verschiedener Größe auf einer gemeinsamen Isolierstoff-Grundplatte. Der Glimmspannungsteiler wird nach Abb. 13 mit einem Vorwiderstand, in dem mindestens  $\frac{1}{3}$  der Speisespannung  $U_G$  vernichtet wird, parallel zu der schwankenden Energiequelle geschaltet. Die konstanten Verbraucherspannungen werden an den einzelnen Glimmstrecken abgenommen. An Stelle des Vorwiderstandes kann zwecks weiterer Verbesserung der Konstanzhaltung eine Eisendrahtlampe treten, ferner kann die Eingangsspannung durch eine Siebkette  $L, C$  gereinigt werden. Bei Schwankungen der Speisespannung  $U_G$  um  $\pm 10\%$  ändern sich die geregelten Spannungen um  $\pm 0,2\%$ . Die Änderung des Nutzstromes vom Mindestwert bis Höchstwert ändert die Spannung an der betroffenen Glimmstrecke um  $1 \dots 2\%$ . Die Spannungsänderung an

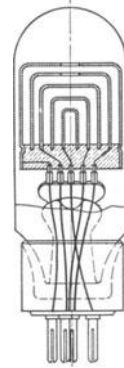


Abb. 12. Schnitt durch einen Glimmspannungs-Gleichhalter mit 4 Glimmstrecken (Stabilovolt G. m. b. H.). (Aus Arch. techn. Messen J 062—9.)

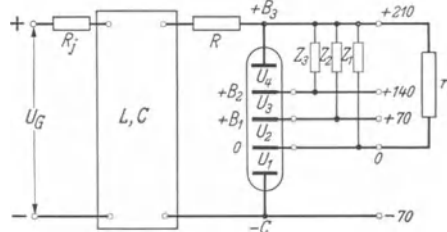


Abb. 13. Grundsaltung einer mit Glimmspannungsteiler stabilisierten Stromquelle. (Aus Arch. techn. Messen 062—9.)

$U_G$  Speisespannung;  $L, C$  Siebkette;  $R_j$  innerer Widerstand der Stromquelle;  $R$  Vorwiderstand;  $r$  Nutzlast;  $Z_1, Z_2, Z_3$  hochohmige Zündwiderstände;  $U_1 \dots U_4$  Teilspannungen des Glimmteilers.



den anderen Teilstrecken ist vernachlässigbar; die Regelung erfolgt trägheitslos. Das Verhalten der Stabilivolt-Glimmspannungsteiler im Dauerbetrieb, sowie ihre Einflußgrößen wurden von H. GÖCKEL eingehend untersucht. Dabei wurden zur Erhöhung der Konstanz 2 Röhren

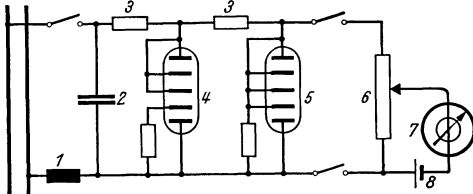


Abb. 14. Kaskadenschaltung zweier Stabilivoltrohren und Messung der geregelten Spannung durch Kompensation. 1 Vorschalt-drossel; 2 Beruhigungskondensator; 3 Vorschaltwiderstände; 4 Glimmröhre 1 mit zwei in Betrieb befindlichen Teilstrecken; 5 Glimmröhre 2 mit einer in Betrieb befindlichen Teilstrecke; 6 Belastungswiderstand; 7 Kompensationsstrommesser; 8 Kompensationsbatterie.

in Kaskadenschaltung nach Abb. 14 benutzt und der Konstanthalter über eine Drosselspule betrieben. Die Messungen erstreckten sich über 2 Jahre; die Belastung wurde während der Messung konstantgehalten. Nach Inbetriebnahme der Röhren erhöhte sich die Konstantspannung nach einer Hyperbelfunktion, die nach

etwa einem Monat ihren Grenzwert erreichte; auch nach kurzzeitiger Abschaltung trat der Einbrennvorgang von neuem auf und die Röhren brauchten einige Tage bis zum Erreichen des stabilen Zustandes. Der

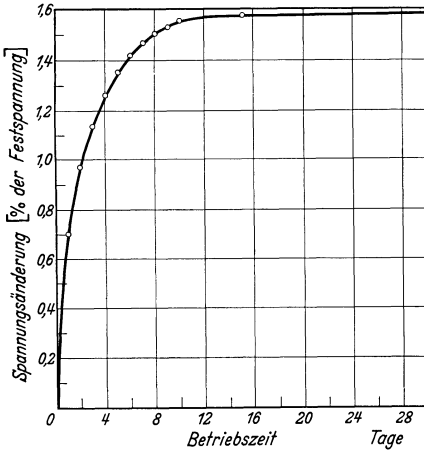


Abb. 15. Abhängigkeit der Konstanzspannung einer Stabilivoltrohre von der Betriebsdauer.

Endwert selbst ändert sich fast bei jeder Unterbrechung um einige Prozent. In Abb. 15 sind die Spannungsänderungen in Prozent der Festspannung abhängig von der Betriebsdauer aufgetragen. Änderungen der Eingangsspannung um  $\pm 10\%$  gaben eine Änderung der geregelten Spannung um  $\pm 0,08\%$ . Die Kaskadenschaltung ergab also eine sehr gute Spannungsgleichhaltung. Der größte Fehler wird durch Temperaturschwankungen hervorgerufen (Abb. 16). Änderungen der Raumtemperatur um  $\pm 10^\circ$  ergaben Spannungsänderungen von  $\mp 0,43\%$ .

Es ist deshalb bei sehr genauen Messungen notwendig, den Stabilisator in einen Thermostat einzubauen und die Belastung konstant zu halten, da selbstverständlich auch Belastungsänderungen Temperaturänderungen der Röhre zur Folge haben. Glimmspannungsteiler eignen sich nur für Gleichspannung, Leistungen bis etwa 100 W und annähernd konstante Belastung; sie erfordern eine unregelmäßige Mindestspannung von 110 V.

*Thermische Gleichhalter* [4]. Eine Reihe von Konstanthaltern arbeitet mit temperaturabhängigen Widerständen, besonders mit Eisendrahtwiderständen und Glühlampen, etwa in der Schaltung der Abb. 17.

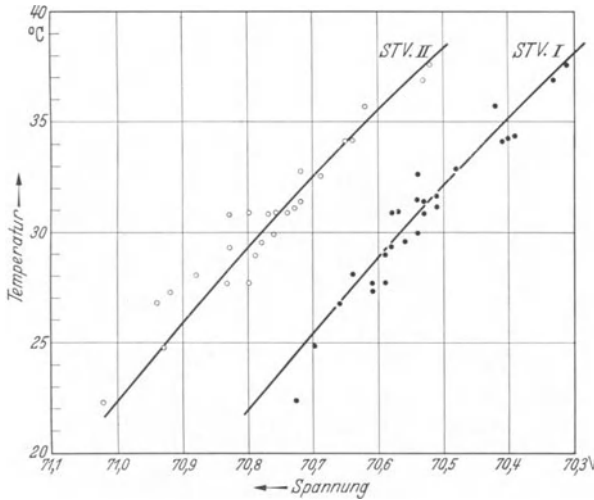


Abb. 16. Temperaturabhängigkeit des Glühmspannteilers Stabilvolt.  
[Aus Phys. Z. Bd. 38 (1937) S. 65–67.]

Eine Brückenschaltung enthält 2 konstante und 2 temperaturabhängige Widerstände und ist so abgestimmt, daß bei Normalspannung die konstanten Widerstände  $R$  größer sind, als die Widerstände der Metallfadenlampen  $L$ . An den Klemmen

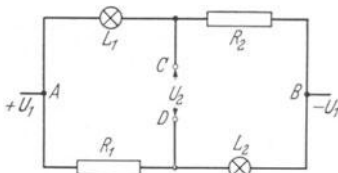


Abb. 17. Glühlampen-Regelbrücke.

$A, B$  Stromzuführungen;  $C, D$  Ausgangsklemmen;  $U_1$  Eingangsspannung;  $U_2$  Ausgangsspannung;  $L_1, L_2$  Glühlampen;  $R_1, R_2$  konstante Widerstände.

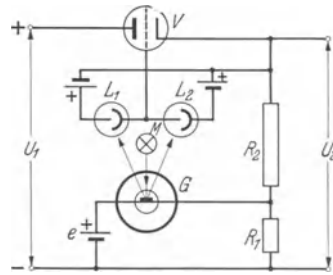


Abb. 18. Lichtelektrischer Konstanthalter.

$U_1$  schwankende Eingangsspannung;  $U_2$  konstante Ausgangsspannung;  $e$  Normalelement;  $R_1, R_2, R_3$  Spannungsteiler;  $G$  Galvanometer mit Lichtzeiger;  $M$  Beleuchtungseinrichtung;  $L_1, L_2$  lichtelektrische Zellen;  $V$  Verstärker.

des Diagonalzweiges  $CD$  liegt demnach eine Spannung  $U_2$ . Eine Erhöhung der Brückenspannung  $U_1$  erwärmt die Lampen  $L_1$  und  $L_2$  und vergrößert ihren Widerstand so, daß er sich den Werten der konstanten Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  nähert, wodurch die ursprüngliche Brückenverstimmung und die Diagonalspannung vermindert werden.

Durch passende Auslegung läßt sich in gewissen Grenzen der Primärspannung  $U_1$  eine solche Widerstandsänderung der Metallfadenlampen erreichen, daß die Diagonalspannung  $U_2$  konstant bleibt. Zur Kompensation von Raumtemperaturschwankungen sind die Widerstände  $R$  aus einem konstanten Teil  $R_K$  und einem temperaturabhängigen Teil  $R_{Cu}$  zusammengesetzt. Das Regelverfahren gibt eine Genauigkeit von etwa 0,4% bei 10% primärer Spannungsschwankung und arbeitet infolge der thermischen Trägheit der Metallfadenlampen nicht völlig

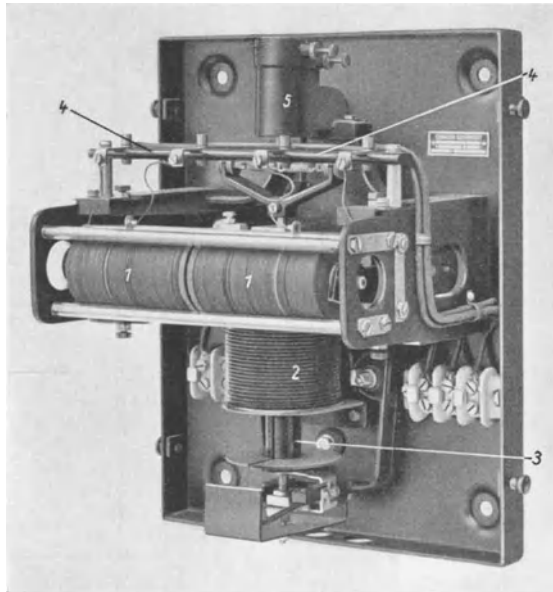


Abb. 19. Kohledruckregler von SSW. (Druckschrift B 818, 9. Aufl., von SSW., Selbsttätige Kohledruckregler.)  
1 Kohlesäulen; 2 Magnetspule; 3 Eisenkern; 4 Übertragungsgestänge; 5 Rückführung.

verzögerungsfrei; es setzt ferner konstante Belastung voraus. Sein Anwendungsgebiet sind Gleichstromleistungen von einigen Watt.

*Lichtelektrische Regler* [5] beruhen auf der Änderung des inneren Widerstandes einer Photozelle mit der Belichtung. Der in Abb. 18 dargestellte Regler besteht aus einem richtkraftlosen Lichtzeiger-Instrument  $G$  mit Projektionsoptik, die in der Nulllage die beiden lichtelektrischen Zellen  $L$  gleichmäßig ausleuchtet. Steigt die Eingangsspannung  $U_1$ , so wird der Spannungsabfall an  $R_1$  größer und das Galvanometer  $G$  schlägt aus, wodurch die Lichtverteilung auf die Photozellen  $L_1$  und  $L_2$  ungleichmäßig wird. Die beiden Photozellen wirken als Spannungsteiler auf das Gitter des Verstärkers  $V$ , dessen Potential sich also mit der Lichtverteilung ändert und den inneren Widerstand der Röhre

entsprechend steuert. Durch die Änderung des Röhrenwiderstandes wird die Spannung  $U_2$  bei allen Schwankungen von  $U_1$  konstant gehalten, sie ist gegeben durch die Normalspannung  $e$  und des Widerstandsverhältnis  $R_1/R_2$

$$U_2 = e \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1}. \quad (1)$$

Genauigkeit und Geschwindigkeit der Regelung hängen in erster Linie von den Eigenschaften des Regelgalvanometers ab, das selbstverständlich einer Rückführung bedarf. Da die Regelung solange erfolgt, bis der Spannungsabfall an  $R_1$  gleich der Normalspannung  $e$  geworden ist, haben Änderungen innerhalb des Reglers keinen Einfluß auf die Spannungskonstanz. Die Einrichtung eignet sich besonders für kleinere Gleichstromleistungen, wie sie für die Stromversorgung von Meßeinrichtungen benötigt werden.

**Kohleldruckregler** [6]. Der Widerstand einer Säule aufeinandergeschichteter Kohleplättchen ist nach dem Gesetz  $P \cdot R = \text{const}$  von dem auf der Säule lastenden Druck abhängig, wenn  $P$  den Druck und  $R$  den Widerstand der Säule bedeuten und der Widerstand der Kohleplättchen selbst gegen den Übergangswiderstand zwischen den Plättchen vernachlässigt werden kann. Diese Eigenschaft geschichteter Kohlesäulen wird in den Kohleldruckreglern nach Abb. 19 zur Spannungsregelung benutzt. Beim Sollwert der Spannung steht die Kohlesäule 1 unter einer bestimmten einstellbaren Federspannung. Spannungserhöhung an der Magnetspule 2 zieht den Eisenkern 3 weiter in die Spule hinein und verringert den Druck, bei Spannungssenkung sinkt der Eisenkern unter gleichzeitiger Druckerhöhung nach unten. Abb. 20 zeigt die Schaltung für die Regelung eines Abzweiges auf konstante Spannung. In der Stellung 0 des Regelschalters  $RS$  ist der Regler abgeschaltet, in der Stellung 1 ist die Magnetspule eingeschaltet, und es kann der Sollwert mit dem Sollwert-Einsteller  $SE$  gewählt werden; in der Stellung 2 arbeitet der Regler. Die Regler können für Maschinen- und Netzregelung verwendet werden, wenn keine besondere Genauigkeit verlangt wird. Die Regelgenauigkeit ist bei Wechselstrom  $\pm 1,2\%$ , bei Gleichstrom  $\pm 1,5\%$  vom Sollwert.

**Thoma-Regler.** Bei dem von Neufeldt & Kuhnke hergestellten Thoma-Regler wird zu der schwankenden Netzspannung eine Zusatzspannung

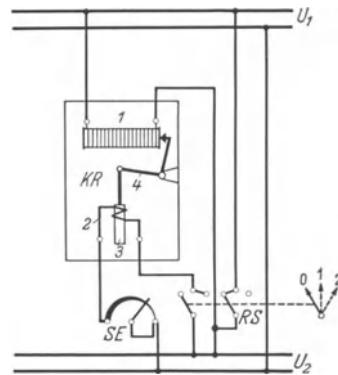


Abb. 20. Schaltung eines SSW-Kohleldruckreglers zur Regelung eines Abzweiges auf konstante Spannung.

1 Kohlesäule; 2 Magnetspule; 3 Eisenkern; 4 Übertragungsgestänge;  $U_1$  unregelte Spannung;  $U_2$  geregelte Spannung;  $SE$  Sollwert-Einsteller;  $RS$  Reglerschalter; Stellung 0: aus, Stellung 1: Spule eingeschaltet, Stellung 2: Regler eingeschaltet.

addiert, so daß die Summenspannung konstant bleibt. Die Zusatzspannung wird nach der Anzeige eines Dreheisen-Instruments gesteuert und an einem Ringkernwandler abgegriffen. Das erforderliche Drehmoment für die Verstellung des Ringwandlers liefert ein Öl-Servomotor. Die Ansprechempfindlichkeit des Reglers ist  $3^0/_{00}$ , die Regeldauer 0,65 s.

**b) Spannungsunabhängige Meßgeräte.** Nicht überall sind Spannungsgleichhalter wirtschaftlich. Für einzelne Meßstellen ist es zweckmäßiger, spannungsunabhängige Meßgeräte zu verwenden, das sind bei Gleichstrom Kreuzspul- oder Kreuzfeld-Instrumente, bei Wechselstrom Doppelspul-Instrumente, Kreuzspul-Instrumente mit Gleichrichter oder Dreheisen-Quotientenmesser.

Die *Kreuzspul-Instrumente* [7] sind Gleichstrom-Quotientenmesser und können mit Gleichrichtern, vorwiegend Trockengleichrichtern, auch in

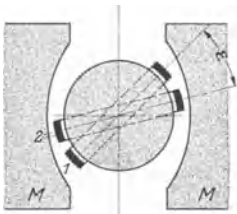


Abb. 21. Grundsätzliche Anordnung des Kreuzspul-Meßwerks.

1, 2 Drehspulen;  $\varepsilon$  Kreuzungswinkel;  $M$  Polschuhe des Dauermagnets.

Wechselstromkreisen Verwendung finden. Sie haben einen Dauermagnet, in dessen Maul ein Weicheisenkern so angeordnet ist, daß zwischen Magnetmaul und Kern ein ungleichmäßiger Feldverlauf entsteht. Dieser ungleichmäßige Verlauf des Feldes wird durch ungleiche Breite des Luftspaltes, also Abweichung des Kerns oder der Polschuhe von der Form konzentrischer Kreise nach Abb. 21 oder durch ungleichmäßige Magnetisierung des Dauermagnets bei konzentrischem Luftspalt erzeugt. In diesem Luftspalt bewegt sich das richtkraftlose, aus zwei um den Winkel  $\varepsilon$

gekreuzten Spulen bestehende System derart, daß in jeder Lage die Produkte aus örtlicher Feldstärke und AW-Zahl für beide Spulen entgegengesetzt gleich sind. Ist der Feldverlauf durch die Funktion  $\mathfrak{B} = f(\alpha)$  gegeben und sind  $\mathfrak{B}_1$  und  $\mathfrak{B}_2$  die Werte dieser Funktion für die Spulenstellung  $\alpha_1$  bzw.  $(\alpha_1 + \varepsilon)$ , ferner  $i_1 \cdot w_1$  und  $i_2 \cdot w_2$  die Amperewindungen der beiden Drehspulen, so gilt für die Drehmomente  $D_1 = k_1 \cdot i_1 \cdot w_1 \cdot \mathfrak{B}_1$ ;  $D_2 = k_2 \cdot i_2 \cdot w_2 \cdot \mathfrak{B}_2$ . Für den Gleichgewichtszustand ist

$$\frac{\mathfrak{B}_1}{\mathfrak{B}_2} = k \cdot \frac{i_2 w_2}{i_1 w_1}. \quad (2)$$

Da  $\mathfrak{B}_1$  und  $\mathfrak{B}_2$  durch die Funktion  $\mathfrak{B} = f(\alpha)$  festgelegt sind, ist damit auch der Ausschlagwinkel  $\alpha = k \cdot \frac{i_2}{i_1}$  bestimmt. In den Schaltungen von Abb. 22 liegen beide Spulen an derselben Spannung  $U_1$ . Spannungsänderungen vermögen also die Einstellung nicht zu beeinflussen, und der Ausschlag des Instruments ist nur abhängig vom Verhältnis der Widerstände

$$\alpha = k \cdot \frac{R_v + R_1}{R_v + R_2}, \quad (3)$$

wobei in der Schaltung a)  $R_1$  als veränderbarer,  $R_2$  als konstanter Widerstand, in der Schaltung b) beide Widerstände als veränderbar anzusehen sind.  $R_1$  und  $R_2$  setzen sich in beiden Fällen aus dem konstanten Instrumentenwiderstand und dem veränderbaren Meßwiderstand zusammen. Bei langsamen Änderungen der Meßspannung ändert sich mit der Größe von  $U_1$  lediglich das Einstellmoment, also die Einstellsicherheit, und erst bei sehr großem Spannungsrückgang treten Fehler durch Lagerreibung und das Drehmoment der Stromzuführungen auf. Um auch bei sprunghaften Spannungsänderungen ein Zucken des Zeigers zu vermeiden, müssen die Zeitkonstanten der beiden Spulenkreise gleich groß gemacht werden und, um unabhängig von Schwankungen der

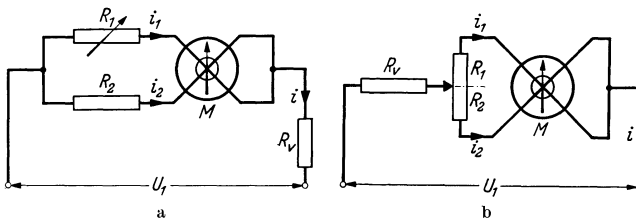


Abb. 22 a und b. Schaltungen des Kreuzspul-Instruments. a Vorwiderstand-Schaltung; b Potentiometerschaltung.

$R_V$  Vorwiderstand;  $R_1, R_2$  Widerstände der Spulenweige;  $M$  Meßgerät;  $U_1$  Meßspannung;  $i_1, i_2$  Spulenströme.

Raumtemperatur zu werden, müssen schließlich auch Temperaturkoeffizient und Wärmeträgheit übereinstimmen. Völlige Spannungsunabhängigkeit ließe sich mit einem solchen Instrument erreichen, wenn die Stromzuführungen zum beweglichen System vollkommen richtkraftlos wären. Da dies nicht der Fall ist, addiert sich zu der spannungsabhängigen elektrischen Richtkraft eine konstante mechanische, die so klein sein muß, daß innerhalb der betriebsmäßigen Spannungsschwankungen kein merkbarer Fehler auftritt. Dieses kleine mechanische Drehmoment vermag beim Abschalten der Stromquelle den Zeiger zumeist nicht aus der Skala heraus zu bewegen; er bleibt also an einem beliebigen Skalenpunkt stehen und könnte einen Meßwert vortäuschen; deshalb wird eine elektrische Zeigerrückstellung eingebaut, die den Zeiger beim Abschalten der Stromquelle in die Nulllage oder auf einen außerhalb des Skalenbereiches liegenden Skalenpunkt bringt. In der beschriebenen reinen Ausführungsform hat das Kreuzspul-Instrument zwei gleichwertige, um einen kleinen Winkel  $\varepsilon$  gekreuzte Spulen und das Feld nimmt von der Polschuhmitte nach beiden Seiten gleichmäßig ab. In der Mittellage des beweglichen Systems haben beide Spulen gleiche AW-Zahlen und bereits geringfügige Abweichungen vom Quotientenwert 1 rufen beträchtliche Ausschläge hervor. Bei Unterbrechung eines der beiden Stromkreise geht das bewegliche System über den Skalenbereich hinaus und legt sich an den einen oder anderen Endanschlag.

Der Meßbereich ist also verhältnismäßig eng und auf endliche Werte beschränkt. Änderungen des Meßbereiches sind möglich durch Änderung des Feldverlaufs, des Kreuzungswinkels oder des Windungsverhältnisses  $w_2/w_1$  der beiden Spulen. Bei gegebenem System erfolgt die Meßbereichwahl durch Nebenwiderstände zu den Einzelspulen. Eine besondere Ausführungsform ist das Brücken-Kreuzspul-Instrument der Siemens & Halske AG., dessen grundsätzliche Anordnung Abb. 23 zeigt.

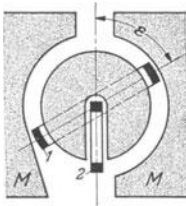


Abb. 23. Grundsätzliche Anordnung des Brücken-Kreuzspul-Meßwerks der Siemens & Halske AG.

1 Ablenkspule;  
2 Richtspule;  $\epsilon$  Kreuzungswinkel der Spulen; M Polschuhe des Dauermagnets.

wachsendem Ausschlag in ein immer stärkeres Feld gelangt. Das Drehmoment der Richtspule wächst also mit dem Ausschlag an und wirkt dem Drehmoment der Ablenkspule entgegen. Im Gegensatz zum reinen

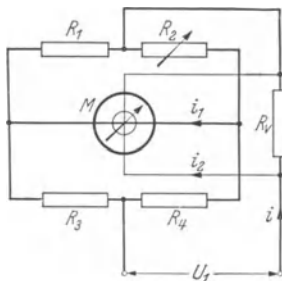


Abb. 24. Schaltung des Brücken-Kreuzspul-Instruments der Siemens & Halske AG.

$U_1$  Eingangsspannung;  $R_v$  Vorwiderstand;  $R_1 \dots R_4$  Brückenwiderstände;  $R_v$  veränderlicher Widerstand; M Meßgerät;  $i_1$  Strom der Ablenkspule 1,  $i_2$  Strom der Richtspule 2;  $i$  Gesamtstromaufnahme der Brücke.

Kreuzspulinstrument ist der Aufbau ausgesprochen unsymmetrisch. Der Strom in der Richtspule ist konstant, der Strom in der Ablenkspule schwankt zwischen 0 und einem Höchstwert. Der Quotientenbereich liegt also ebenfalls zwischen 0 und einem Höchstwert und kann bei ungeänderter Feldverteilung durch Änderung des Richtspulnstromes gewählt werden. Bei Unterbrechung der Ablenkspule geht das Instrument in die Nulllage, bei Unterbrechung des Richtkreises in die obere Endlage, entsprechend dem Quotienten  $\infty$ . Das Instrument wird vorwiegend in Brückenschaltungen nach Abb. 24 benutzt. Die Ablenkspule liegt in der Meßdiagonale, die Richtspule an dem vom Gesamt-Brückenstrom durchflossenen Vorwiderstand  $R_v$ . Das Drehmoment der Ablenkspule ist demnach verhältnismäßig dem Diagonalestrom  $i_1$ , das Richtmoment dem Gesamt-Brückenstrom  $i$ . Da beide der Brückenspannung  $U_1$  proportional sind, ist ihr Verhältnis, also auch der Ausschlag  $\alpha$ , unabhängig von den Schwankungen dieser Spannung. Abb. 25 zeigt die Ausführung des beweglichen Systems.

Ordnet man die Spulen nicht ineinander wie bei Abb. 25, sondern übereinander an, so erhält man die in Abb. 26 gezeigte Ausführungsform.

Auch bei diesem Meßwerk bewegt sich die Hauptspule in einem konzentrischen Luftspalt gleichbleibender Feldstärke, die darüberliegende Richtspule in einem mit dem Ausschlag wachsenden Magnetfeld, das

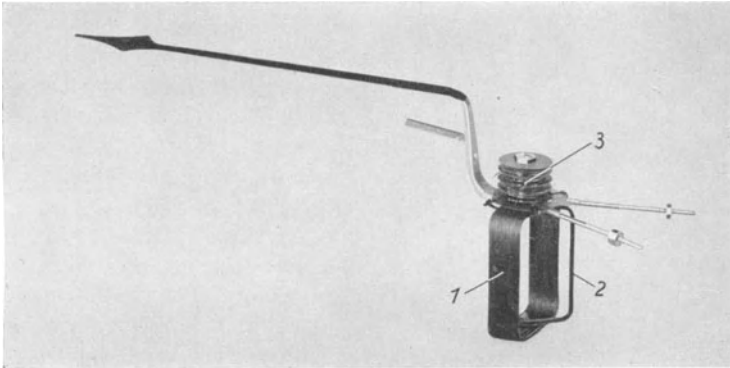


Abb. 25. Bewegliches Organ eines Brücken-Kreuzspul-Instruments (Siemens & Halske AG.).  
1 Ablenkspule; 2 Richtspule; 3 richtkraftlose Stromzuführungen.

durch einen besonderen Magnet oder durch Abzweigung vom Hauptfeld erzeugt wird (Abb. 27). An Stelle der Kreuzung der Drehspulen

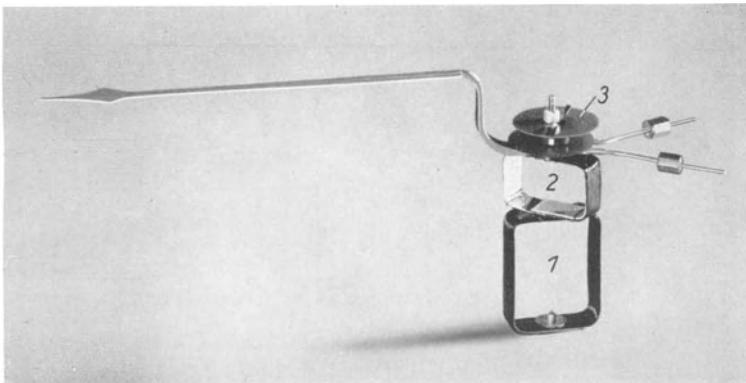


Abb. 26. Bewegliches Organ eines Kreuzspul-Instruments mit übereinanderliegenden Spulen (Siemens & Halske AG.).  
1 Ablenkspule; 2 Richtspule; 3 richtkraftlose Stromzuführungen.

können bei diesem Instrument auch die Spulen in einer Ebene angeordnet und die Achsen der Magnetfelder um den Winkel  $\varepsilon$  gekreuzt werden, weshalb diese Ausführung auch den Namen Kreuzfeld-Instrument führt.

*Doppelspul-Instrumente* [8] ersetzen das Kreuzspul-Instrument für spannungsunabhängige Anzeige in Wechselstrombrücken. Sie haben



an Stelle des Dauermagnets einen Elektromagnet mit zylindrischen Polschuhen und rundem Eisenkern nach Abb. 28, in dessen Luftspalt sich ein richtkraftloses System aus zwei übereinander gewickelten, koaxialen

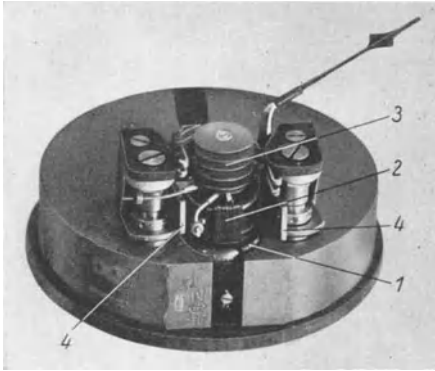


Abb. 27. Meßwerk eines Kreuzspul-Instruments mit übereinanderliegenden Spulen (Siemens & Halske AG.).  
1 Ablenkspule; 2 Richtspule; 3 Stromzuführungen; 4 Polschuhe des Richtfeldes.

Drehspulen bewegt. Die Ablenkspule liegt im Diagonalzweig der Wechselstrombrücke, die Richtspule ist über einen induktiven Scheinwiderstand kurzgeschlossen. Die Stromzuführung zu beiden Spulen erfolgt durch möglichst richtkraftlose Metallbänder. Die feststehende Feldspule liegt an der Brückenspannung  $U_1$  (Abb. 29). Das Instrument arbeitet folgendermaßen: Die im Erregerfeld liegende stromdurchflossene Ablenkspule ruft ein Drehmoment hervor, das je nach Stromrichtung das

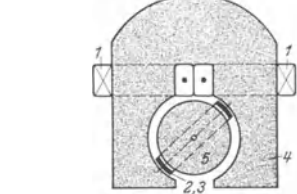


Abb. 28. Anordnung eines dynamometrischen Doppelspul-Instruments (Siemens & Halske AG.). (Aus Arch. techn. Messen J 741—9.)  
1 Feldspule; 2, 3 Ablenk- und Richtspule;  
4 Eisenkörper des Elektromagnets;  
5 Eisenkern.

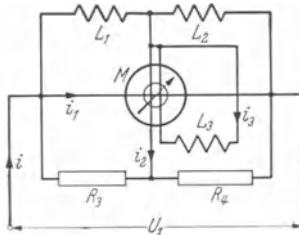


Abb. 29. Wechselstrombrücke mit Doppelspul-Instrument.

$U_1$  Eingangsspannung;  $L_1, L_2, R_3, R_4$  Brückenwiderstände;  $M$  Meßgerät;  $i$  Gesamtstromaufnahme der Brücke;  $i_1$  Feldspulenstrom;  $i_2$  Strom in der Ablenkspule;  $i_3$  Strom in der Richtspule;  $L_3$  Drosselspule im Richtkreis.

System in der Mittellage zurückzudrehen versucht. Der Zeiger des Instruments nimmt demnach eine Stellung ein, in der Drehmoment und Richtmoment einander die Waage halten. Es bezeichnet:

- $i_1 w_1$  die Amperewindungszahl der Feldspule,  
 $i_2 w_2$  „ „ „ „ Ablenkspule,  
 $i_3 w_3$  „ „ „ „ Richtspule.

Für die Drehmomente der beiden Spulen ergibt sich damit

$$D_a = k_1 \cdot i_1 w_1 \cdot i_2 w_2 \cdot \cos(i_1 \cdot i_2)$$

$$D_r = k_2 \cdot i_1 w_1 \cdot i_3 w_3 \cdot \cos(i_1 \cdot i_3).$$

Für den zum Gleichgewichtszustand gehörigen Ausschlagwinkel  $\alpha$  ist  $D_a = D_r$ , folglich

$$\alpha = k \cdot \frac{i_2 \cdot \cos(i_1 \cdot i_2)}{i_3 \cdot \cos(i_1 \cdot i_3)}. \quad (4)$$

$i_2$  ist proportional  $U_1$ ,  $i_3$  wird durch das vom Strom  $i_1$  erzeugte Feld induziert. Da  $i_1$  proportional der Spannung  $U_1$  ist, muß auch  $i_3$  der Spannung  $U_1$  verhältnisgleich sein, d. h. der Ausschlag  $\alpha$  ist unabhängig von Schwankungen der Betriebsspannung; er hängt ab von der Größe und Richtung des Diagonalstromes  $i_2$  und des Kurzschlußstromes  $i_3$ . Nun wird vom Feldstrom  $i_1$  auch in der Ablenspule eine EMK induziert, die sich über die Brückenwiderstände ausgleichen kann und ein zusätzliches Richtmoment hervorruft, das in manchen Fällen allein für eine sichere Einstellung hinreichend ist. Das Instrument erhält dann keine besondere Richtspule und wird als Induktions-Dynamometer bezeichnet. Seine Eigenschaften decken sich im wesentlichen mit denen des Doppelpul-Instrumentes. Die Doppelpul-Instrumente sind selbstverständlich nicht auf die gezeigte Brückenschaltung beschränkt, sondern können auch in anderen Schaltungen angewendet werden.

*Dreheisen-Quotientenmesser* [9]. Ein weiteres, in gewissen Grenzen spannungsunabhängiges Instrument, der Dreheisen-Quotientenmesser, wird in Abb. 30 in einer zweckmäßigen Ausführungsform gezeigt. Das ringförmige Dreheisen  $D$  ist mit einem unmagnetischen Arm  $H$  an der Drehachse  $A$  befestigt und wird von den beiden festen Spulen  $S$  umfaßt. Der Ausschlag des Instruments ist abhängig von dem Verhältnis der Quadrate der Spulenströme; Skalenverlauf und Meßbereich hängen von der Eisenform und der Schaltung der Spulen ab. Begrenzung des Ringeisens durch konzentrische Kreisbogen gibt große, Begrenzung durch

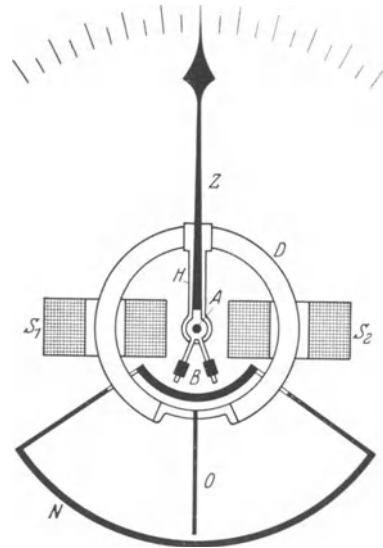


Abb. 30. Grundsätzlicher Aufbau des Ringeisen-Quotientenmessers. [Aus Arch. Elektrotechn. Bd. 25 (1931) S. 3.]

$A$  Drehachse;  $B$  Äquilibrierung;  $D$  Dreheisen;  $H$  unmagnetischer Arm;  $N$  Dämpferkammer;  $O$  Dämpferflügel;  $S_1, S_2$  Erregerspulen;  $Z$  Zeiger.

exzentrische Kreisbogen kleine Meßbereiche; gleichläufige Schaltung der Spulen gibt große, gegenläufige Schaltung kleine Quotientenbereiche. Höchste Quotientenempfindlichkeit ergibt sich demnach bei exzentrischem Eisen und gegenläufiger Schaltung der Erregerspulen. Abb. 31 zeigt die Einzelteile des Gerätes.

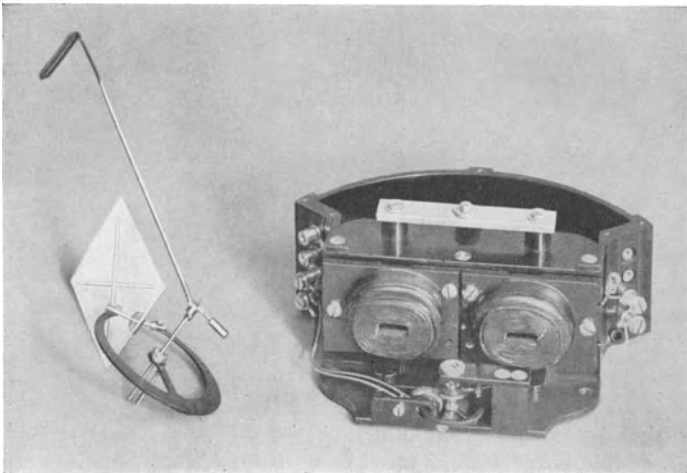


Abb. 31. Ansicht des Ringeisen-Quotientenmessers von GEYGER. (Ausführung H. JOENS, Düsseldorf.)

### 3. Frequenz- und Temperatureinfluß.

Die übrigen Einflußgrößen, Frequenz, Kurvenform, Fremdfelder, Gebrauchslage und Temperatur haben für die mechanisch-elektrischen Messungen nicht die Bedeutung des Spannungseinflusses und außerdem werden die nach den VDE-Regeln zulässigen Toleranzen für diese Einflüsse selten voll in Anspruch genommen.

Der *Frequenzeinfluß* der in Frage kommenden Meßgeräte ist sehr gering. Drehspul- und Kreuzspul-Instrumente mit Trockengleichrichtern können bis etwa 10 kHz ohne wesentlichen Frequenzgang ausgeführt werden, Doppelspul- und Induktions-Dynamometer sind im Rahmen normaler Frequenzschwankungen von etwa 40...60 Hz praktisch frequenzunabhängig, und nur der Dreheisen-Quotientenmesser weist einen merklichen Frequenzfehler auf. Außerdem schwankt die Frequenz normaler Netze im allgemeinen nicht mehr als  $\pm 0,2\%$ , und auch bei Einzelantrieben von Maschinen läßt sich die Frequenz meist recht genau halten.

Wichtiger ist der *Temperatureinfluß*. Die aus Kupfer oder Aluminium bestehenden Wicklungen ändern ihre Widerstandswerte erheblich mit der Temperatur, und auch Federn und Dauermagnete sind nicht völlig temperaturunabhängig, zudem sind häufig gerade die mechanisch-

elektrischen Meßeinrichtungen recht erheblichen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Man muß sich deshalb von vornherein ein Bild über die zu erwartenden Temperaturfehler machen. Meistens läßt sich der Temperaturgang berechnen und durch besondere Maßnahmen in tragbaren Grenzen halten, beispielsweise durch das Vorschalten temperaturunabhängiger Widerstände (Manganin und Konstantan) oder durch Kombination mit Widerständen, welche den gleichen oder einen negativen Temperaturkoeffizienten aufweisen (CuO); ferner durch Verwendung von magnetischen Nebenschlüssen aus Eisenlegierungen, deren Permeabilität temperaturabhängig ist (Thermalloy und Thermoperm).

#### 4. Auflösungsvermögen.

Unter Auflösungsvermögen versteht man die Fähigkeit eines Meßgeräts, schnellen Schwankungen der Meßgröße zu folgen [10]. Das

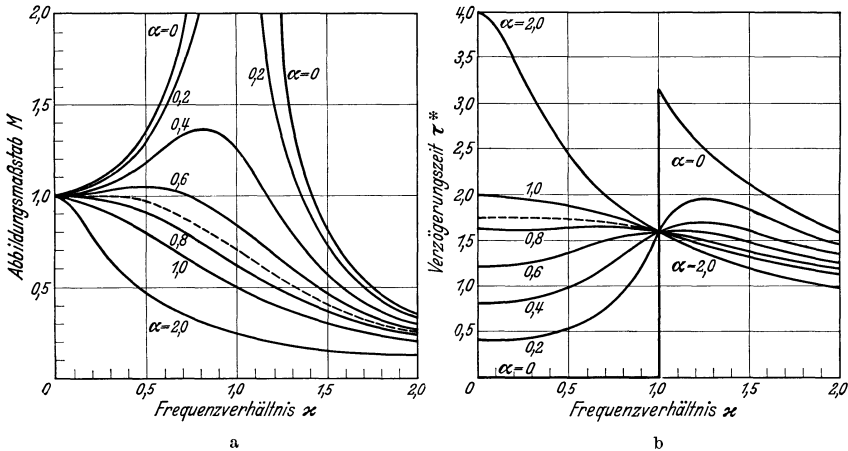


Abb. 32 a und b. Verhalten eines schwingungsfähigen Systems von der Eigenfrequenz  $\omega_0$  gegenüber einer Erregerschwingung von der Frequenz  $\omega$  bei verschiedenen Dämpfungszuständen. a Abhängigkeit des Abbildungsmaßstabes  $M$  vom Frequenzverhältnis  $\alpha$ . b Abhängigkeit der Verzögerungszeit  $\tau$  vom Frequenzverhältnis  $\alpha$ . Frequenzverhältnis  $\alpha = \omega/\omega_0$ , Verzögerungszeit  $\tau = \omega_0 \cdot t$ .

Auflösungsvermögen ist um so höher, je höher die Eigenfrequenz, je geringer also die Trägheit des Meßwerks ist; es läßt sich unmittelbar in Hertz ausdrücken und bezeichnet dann diejenige Frequenz, der das Meßorgan noch ohne Amplituden- und Phasenfälschung zu folgen vermag. Das Verhältnis der Meßfrequenz zur Eigenfrequenz des Meßwerks

$$K = \frac{\omega}{\omega_0}$$

kann als Maß für den Amplituden- und Phasenfehler der Aufzeichnung angesehen werden, wenn der Dämpfungsgrad des Meßwerks bekannt ist. Abb. 32a und b zeigt die Abhängigkeit des Abbildungsmaßstabes  $M$

und der Verzögerungszeit  $\tau = \omega_0 \cdot t$  vom Frequenzverhältnis  $x$  für verschiedene Dämpfungsgrade, Abb. 33 den Amplitudenfehler einer Oszillographenschleife abhängig von der Meßfrequenz. Das Auflösungsvermögen elektrischer Meßgeräte ist im allgemeinen höher als das entsprechender mechanischer Einrichtungen, und gerade in der hohen Eigenschwingungszahl und der kurzen Einstellzeit ist ein erheblicher Vorteil der elektrischen Meßgeräte zu erblicken. Die elektrischen Geräte eignen sich deswegen besonders für Reihenprüfungen großer Stückzahlen, wo die Zeitdauer für die Einstellung des Meßgerätes bereits eine wesentliche Rolle spielt, sowie für laufende Anzeige und Aufzeichnung schnell ablaufender Vorgänge und schneller Schwankungen der Meßgröße. Für Regelvorgänge ist außer der kurzen Ansprechzeit die Möglichkeit ihrer Veränderung durch elektrische Verzögerungsglieder von entscheidender

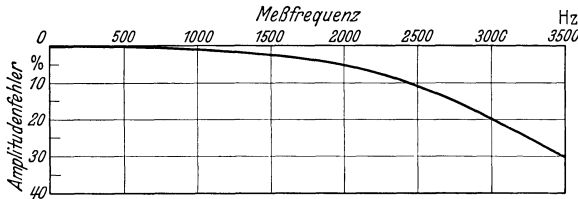


Abb. 33. Amplitudenfehler einer Oszillographenschleife in Abhängigkeit von der Meßfrequenz. Eigenfrequenz der ungedämpften Meßschleife 5500 Hz.

Bedeutung. Einfache Anzeige- und Schreibgeräte für Schalttafeln haben ein Auflösungsvermögen von etwa 1 Hz, Schnellschwinger erreichen 50...80 Hz, Oszillographen 20 kHz, und in den Kathodenstrahlröhren steht ein nahezu trägheitsloses Meßgerät zur Verfügung.

## 5. Übertragungsentfernung [11].

Mit elektrischen Meßverfahren lassen sich nahezu beliebige Entfernungen zwischen Meßstelle und Anzeigeort überbrücken. Es ist also möglich, die Meßwerte von unzugänglichen oder für den Aufenthalt von Menschen ungeeigneten Meßstellen in eine Meßzentrale zu übertragen und dort mit den Meßwerten anderer, örtlich getrennter Meßstellen zu vergleichen oder auch auf demselben Gerät aufzuzeichnen. Für die Übertragung sind im allgemeinen dünnadrätige und leicht verlegbare Meßleitungen hinreichend; wo es notwendig erscheint, können sie mehrfach ausgenutzt oder durch eine drahtlose Übertragung abgelöst werden, in diesem Fall ist allerdings an der Empfangsstelle ein Meßverstärker notwendig. Abgesehen von den Fernmeßverfahren, bei denen die Leitungsdaten keinen Einfluß auf die Anzeige-Genauigkeit haben, wird die Übertragungsentfernung durch die Sendeleistung, die Leitungseigenschaften und den Verbrauch der angeschlossenen Meßgeräte begrenzt, wobei unter Leitungseigenschaften Widerstand, Kapazität, In-

duktivität, Isolationszustand, zulässige Spannungs- und Leistungsbeanspruchung verstanden werden sollen. Diese Vielzahl von Einflußgrößen macht es unmöglich, allgemein gültige Zahlenwerte für die Übertragungsentfernung anzugeben, da die größtmögliche Weite zwischen einigen Metern und mehreren 100 km schwankt und je nach den besonderen Verhältnissen die eine oder die andere Größe die Grenze bestimmt. Sieht man einmal von den Störungseinflüssen auf die Leitung ab und betrachtet nur ihre Widerstandsverhältnisse, so ergibt sich mit den Bezeichnungen von Abb. 34 der Scheinwiderstand der Leitung zu

$$Z = R_v + \frac{Z_1}{2} + \frac{\left(\frac{Z_1}{2} + Z_2\right) \cdot Z_3}{\frac{Z_1}{2} + Z_2 + Z_3}, \quad (5)$$

wobei der Einfachheit halber der gesamte Ableitungswiderstand  $Z_3$  in der Leitungsmitte vereinigt gedacht ist. Es sollen nun die durch den

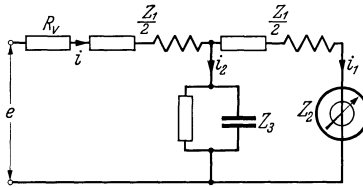


Abb. 34. Ersatzschaltung einer Meßwert-Fernübertragung. [Aus Arch. techn. Messen V 381—1.]  
 $e$  Meßspannung, V;  $i$  Gesamtstrom, A;  $i_1$  Strom für Endausschlag des Instruments, A;  $i_2$  Fehlerstrom, A;  $Z_2 = R_2 + j\omega L_2 =$  Instrumenten-Widerstand,  $\Omega$ ;  $N_2$  Scheinverbrauch des Instruments, VA;  $R_v$  Vorwiderstand zur Temperatur-Kompensation,  $\Omega$ ;  $R_0$  spez. Wirkwiderstand der Leitung  $\Omega/\text{km}$  Doppelleitung;  $\omega L_0$  spez. Blindwiderstand der Leitung  $\Omega/\text{km}$  Doppelleitung;  $n$  Übertragungsentfernung, km;  $Z_1 = n \cdot Z_0 = (R_1 + j\omega L_1) = n \cdot (R_0 + j\omega L_0) =$  Scheinwiderstand der Leitung;  $R_a$  spez. Ableitungswiderstand  $\Omega/\text{km}$  Doppelleitung;  $C_0$  spez. Leitungskapazität  $\mu\text{F}/\text{km}$  Doppelleitung;  $R_f = R_a/n =$  Ableitungswiderstand  $\Omega$ ;  $C = n \cdot C_0 =$  Leitungskapazität  $\mu\text{F}$ ;  $Z_3 = \frac{R_f}{1 + R_f \cdot j\omega C} = \frac{R_a}{n \cdot (1 + Ra j \omega C_0)}$  Scheinwiderstand der Ableitung  $\Omega$ ;  $\Delta t$  Temperaturfehler, %;  $\alpha_1, \alpha_2$  Temperaturkoeffizienten.

Temperaturfehler  $\Delta t$ , d. h. die durch die Wärmeschwankungen der Leitung gezogenen Grenzen gesucht werden. Es seien die Temperaturkoeffizienten von  $Z_1 = \alpha_1$ , von  $Z_2 = \alpha_2$ , von  $R_v = 0$ . Ferner kann für die Berechnung des Temperaturfehlers  $Z_3 = \infty$  gesetzt werden. Dann wird der Temperaturfehler

$$\Delta t = - \frac{(Z_1 \cdot \alpha_1 + Z_2 \cdot \alpha_2) \cdot t}{R_v + Z_1 + Z_2} \cdot 100\% \quad (6)$$

und die Übertragungsentfernung mit Rücksicht auf  $\Delta t$

$$n_t = - \frac{e \cdot \Delta t}{\alpha_1 \cdot t \cdot Z_0 \cdot i \cdot 10^2} - \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \cdot \frac{Z_2}{Z_0} \quad (7)$$

Der mangelhafte Isolationszustand der Leitung kann ebenfalls die Übertragungsentfernung begrenzen. Der von ihm herrührende Ableitungsfehler beträgt

$$\Delta f = - \frac{\left(Z_2 + n \frac{Z_0}{2}\right) \cdot (1 + R_\alpha \cdot j \omega C_0) \cdot n}{R_\alpha} \cdot 100\% \quad (8)$$

und die mit Rücksicht auf  $\Delta f$  zulässige Übertragungsentfernung

$$n_f = - \frac{Z_2}{Z_0} + \sqrt{\left(\frac{Z_2}{Z_0}\right)^2 - \frac{\Delta f \cdot R_\alpha}{50 \cdot Z_0 \cdot (1 + R_\alpha \cdot j \omega C_0)}} \quad (9)$$

Aus diesen Gleichungen lassen sich die Übertragungsentfernungen und die auftretenden Fehler ermitteln, wenn die Leistung des Gebers, die Leitungsdaten und der Verbrauch des Empfangsgerätes bekannt sind. Auf die Angabe von Beispielen wird verzichtet, weil die Fülle der Veränderlichen einem Einzelbeispiel jeglichen praktischen Wert nimmt und, wie bereits gesagt, jede Entfernung überwunden werden kann.

## 6. Ausführung von Rechenoperationen [12].

Die Ausführung von Rechenoperationen kann unmittelbar mit Strömen und Spannungen und dem elektrischen Meßwerk vorgenommen werden. Das Drehspul-Instrument eignet sich zur Summen- und Differenzbildung, das Kreuzspul-Instrument zur Division, das Dynamometer zur Multiplikation von Meßgrößen.

Summen- und Differenzbildung mit dem Drehspulmeßwerk. Das Drehspul-Instrument hat eine bewegliche, stromdurchflossene Spule in dem ringförmigen Luftspalt eines Dauermagnets, in dem an jeder Stelle die gleiche Feldstärke herrscht. Dem elektrischen Drehmoment wirkt das linear mit dem Ausschlag ansteigende Richtmoment einer Feder entgegen. Das Drehmoment des Drehspul-Instruments beträgt

$$D = \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{981} \cdot l \cdot d \cdot i \cdot w \cdot \mathfrak{B} = K \cdot i \cdot w \quad \text{cmg.} \quad (10)$$

Darin bedeuten:

- $D$  = Drehmoment, cmg;
- $l$  = wirksame Höhe der Drehspule, cm;
- $d$  = Durchmesser der Drehspule, cm;
- $i$  = Stromstärke in der Drehspule, A;
- $w$  = Windungszahl der Drehspule;
- $\mathfrak{B}$  = Induktion im Luftspalt, Gauß;
- $K$  = Konstante.

Man erhält demnach in einfachster Weise die Summe mehrerer Ströme durch mechanische Kupplung von Drehspulmeßwerken oder durch Aufbringen mehrerer Drehspulen auf eine gemeinsame Achse; wobei die Drehspulen im gleichen Feld schwingen müssen. Je nach der Stromrichtung in den Einzelspulen ergibt sich dann für das Drehmoment und den Ausschlag  $\alpha$

$$D = K_1 (i_1 w_1 \pm i_2 w_2). \quad (11)$$

Für  $w_1 = w_2$  ergibt sich daraus

$$D = K_2 \cdot (i_1 \pm i_2). \quad (12)$$

Wählt man für beide Drehspulen verschiedene Windungszahlen und setzt das Verhältnis  $w_2:w_1 = \gamma$ , so hat man weiterhin die Möglichkeit, bei der Addition einen Proportionalitätsfaktor zu berücksichtigen

$$D_2 = K_3 (i_1 \pm \gamma \cdot i_2). \quad (13)$$

Produktbildung mit dem dynamometrischen Meßwerk. Erzeugt man beim Drehspulmeßwerk das Feld im Luftspalt nicht durch einen Dauermagnet, sondern durch einen Elektromagnet, so erhält man ein eisengeschlossenes Dynamometer nach Abb. 28 und eine Produktbildung zwischen den Strömen der Erregerspule und der Drehspule. Für das Drehmoment des eisengeschlossenen Dynamometers ergibt sich

$$D = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{981} \cdot \frac{l \cdot d}{2\delta} \cdot i_1 w_1 \cdot i_2 w_2 \cdot \text{cmg} \quad (14)$$

oder

$$D = K \cdot i_1 w_1 \cdot i_2 w_2. \quad (15)$$

Darin sind:

- $l$  = die wirksame Höhe der Drehspule, cm;
- $d$  = der Durchmesser der Drehspule, cm;
- $\delta$  = der einseitige Luftspalt zwischen Kern und Polschuh, cm;
- $i_1$  = Strom in der Drehspule, A;
- $i_2$  = Strom in der festen Feldspule, A;
- $w_1$  = Windungszahl der Drehspule;
- $w_2$  = Windungszahl der Feldspule.

Dabei ist die AW-Zahl für den Eisenweg vernachlässigt, was fast stets zulässig ist. Bei Wechselstrom ist ferner Frequenz- und Phasengleichheit der Felder bzw. der zu multiplizierenden Ströme vorausgesetzt. Sind die Ströme  $i_1$  und  $i_2$  phasenverschoben, so ergibt sich für das Drehmoment

$$D = K \cdot i_1 w_1 \cdot i_2 w_2 \cdot \cos(i_1 i_2). \quad (16)$$

Quotientenbildung mit dem Kreuzspul-Meßwerk. Verdreht man beim Drehspul-Summenmeßwerk die beiden koaxialen Drehspulen um einen Winkel  $\varepsilon$  gegeneinander, macht gleichzeitig den ringförmigen Luftspalt zwischen Kern und Polschuhen verschieden weit und ersetzt die Richtfeder durch richtkraftlose Stromzuführungen, so entsteht ein Kreuzspul-Meßwerk nach Abb. 21, das an Stelle der Summe den Quotienten der Spulenströme anzeigt. Es werden nämlich die Drehmomente der beiden Spulen

$$\begin{aligned} D_1 &= k_1 \cdot i_1 \cdot w_1 \cdot \mathfrak{B}_1 \\ D_2 &= k_2 \cdot i_2 \cdot w_2 \cdot \mathfrak{B}_2, \end{aligned}$$



wobei  $\mathfrak{B}_1$  und  $\mathfrak{B}_2$  die für die Spulenstellungen  $\alpha$  und  $(\alpha + \varepsilon)$  geltenden Werte der Funktion  $\mathfrak{B} = f(\alpha)$  sind. Die Drehmomente wirken einander entgegen und der Zeiger spielt auf den Gleichgewichtspunkt ein, für den

$$\alpha = k \cdot \frac{i_2}{i_1} \quad (17)$$

gilt. Bei den bisher betrachteten Verfahren erfolgte die Ausführung der Rechenoperationen mit den Meßströmen unmittelbar durch das Meßwerk; ebensogut kann aber auch eine mathematische Beziehung durch eine Schaltung hergestellt werden.

**Addition mit Hilfe von Widerständen.** Schaltet man nach Abb. 35 mehrere in Abhängigkeit von den Meßgrößen  $x$  und  $y$  linear veränderbare Widerstände  $R_1 = k_1 x$  und  $R_2 = k_2 y$  in Reihe, so erhält man als Anzeige  $\alpha$  eines Kreuzspul-instruments  $A$  den Summenwert

$$R = \frac{U}{i} = k_1 \cdot x + k_2 \cdot y, \quad (18)$$

woraus für  $k_1 = k_2$  folgt

$$\alpha = k \cdot (x + y). \quad (19)$$

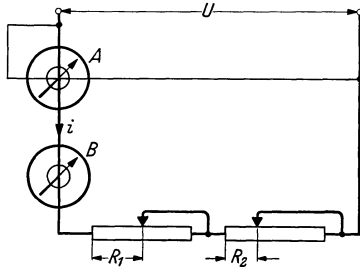


Abb. 35. Addition zweier Werte mit Hilfe von Widerständen.  
 $R = R_1 + R_2$ ;  $R_1 = k_1 x$ ;  $R_2 = k_2 y$ ;  $A$  Kreuzspul-Ohmmeter;  $B$  Drehspul-Strommesser.

Rechenchieber, an Stelle der Summe

$$\alpha' = \frac{U}{i} = k_1 \cdot \log x + k_2 \cdot \log y = \log (x^{k_1} \cdot y^{k_2}), \quad (20)$$

woraus für  $k_1 = k_2 = 1$  folgt

$$\alpha' = \log (x \cdot y). \quad (21)$$

Da die logarithmische Skala des Instruments in den entsprechenden Grundzahlen beschriftet werden kann, erhält man somit eine Produktbildung. Die Fortsetzung dieses Gedankens führt zwangsläufig zum elektrischen Rechenschieber. Auch zur Ausführung einer Division eignet sich diese Schaltung, wenn man an Stelle des Widerstandes die Stromaufnahme mißt. Es ist

$$i = \frac{U}{R_1 + R_2}. \quad (22)$$

Für  $R_1 = k_1 x$ ,  $R_2 = k_2 y$  und  $U = k_3 z$  folgt daraus

$$i = \frac{k_3 z}{k_1 x + k_2 y}, \quad (23)$$

ferner für  $R_1 = 0$

$$i = k_4 \cdot \frac{z}{y}, \quad (24)$$

für  $U = \text{const}$

$$i = k_5 \cdot \frac{1}{y}. \quad (25)$$

Multiplikation mittels Spannungsteilers. Wird an einen linearen Spannungsteiler nach Abb. 36 von der Größe  $R$  eine Spannung  $U_1$  gelegt und an der Stelle  $R_1$  mittels eines veränderbaren Läufers die Spannung  $U_2$  abgegriffen, so ist

$$U_2 = \frac{R_1}{R} \cdot U_1. \quad (26)$$

Ist nun die angelegte Spannung  $U_1$  eine lineare Funktion der Meßgröße  $x$ ,  $U_1 = k_1 \cdot x$  und der Schieberweg eine lineare Funktion der Meßgröße  $y$ ,  $R_1 = k_2 \cdot y$ , so ist die abgegriffene Spannung  $U_2$  dem Produkt  $xy$  verhältnisgleich

$$U_2 = \frac{k_1 \cdot x}{R} \cdot k_2 y = k \cdot xy. \quad (27)$$

Für die Spannung  $U_3 = U_1 - U_2$  ergibt sich

$$U_3 = k_1 x \cdot (1 - k_3 \cdot y). \quad (28)$$

Dabei ist vorausgesetzt, daß die der Spannungsmessung dienenden Instrumente keinen Strom verbrauchen oder der Instrumentenstrom vernachlässigbar klein gegenüber dem Spannungsteilerstrom ist. Trifft das nicht zu, so wird

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot R_1}{R \left( \frac{R_1}{R_2} + 1 \right) - \frac{R_1^2}{R_2}}. \quad (29)$$

Multiplikation mit 2 Widerständen. Die konstante Spannung  $U$  liege über einen Vorwiderstand  $R$  in der Schaltung von Abb. 37 an 2 Widerständen  $(R_1 + R_2)$  und  $(R_3 + R_4)$  und die Spannung  $U_2$  werde mit einem Drehspul-Instrument vernachlässigbaren Stromverbrauchs oder einem elektrostatischen Instrument gemessen. Dann ist

$$U_2 = \frac{U \cdot R_1 \cdot R_3}{(R + R_2)(R_1 + R_3 + R_4) + R_1(R_3 + R_4)}, \quad (30)$$

woraus für  $R_3 + R_4 \gg R_1 + R_2$  und  $R \gg R_1 + R_2$  folgt

$$U_2 = \frac{U \cdot R_1 \cdot R_3}{R(R_3 + R_4)} \quad (31)$$

$U, R, (R_3 + R_4)$  sind Konstanten. Somit ergibt sich für  $R_1 = f(x)$  und  $R_3 = f(y)$

$$U_2 = K \cdot f(x \cdot y). \quad (32)$$

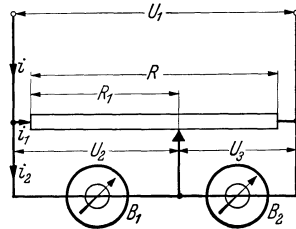


Abb. 36. Produktbildung mittels eines Spannungsteilers.  
 $U_1$  Eingangsspannung;  
 $U_2, U_3$  abgegriffene Spannungen;  
 $B_1, B_2$  Spannungsmesser;  $R$  Gesamtwiderstand;  $U_1 = k_1 x$ ;  $R_1 = k_2 y$ .

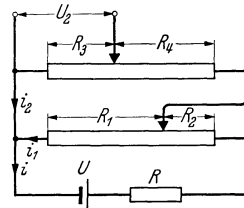


Abb. 37. Multiplikation mit zwei Widerständen.  
 $U$  Eingangsspannung;  $U_2$  Ausgangsspannung;  $R_1 = f(x)$ ;  
 $R_3 = f(y)$ ;  $R$  Vorwiderstand.

In ähnlicher Weise läßt sich die Division zweier Funktionen durchführen. In der Schaltung der Abb. 38 ergibt sich

$$i_2 = \frac{U \cdot R_1}{(R + R_2)(R_1 + R_3) + R_1 \cdot R_3}, \quad (33)$$

daraus folgt für  $R_3 \gg R_1$

$$i_2 = \frac{U \cdot R_1}{R_3 (R + R_1 + R_2)}. \quad (34)$$

Da  $U$ ,  $R$  und  $(R_1 + R_2)$  Konstanten sind, ergibt sich mit  $R_1 = f(x)$  und  $R_3 = f(y)$

$$i_2 = K \cdot f\left(\frac{x}{y}\right). \quad (35)$$

Subtraktion mit einem Spannungsteiler. Gleiten auf einem linearen Spannungsteiler vom Gesamtwert  $R$  zwei Schieber nach Abb. 39

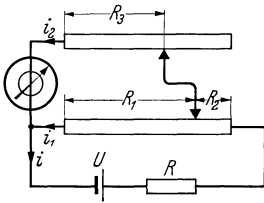


Abb. 38. Division mit zwei Widerständen.  
 $U$  Eingangsspannung;  $i_2$  Meßstrom;  $R_1 = f(x)$ ;  
 $R_3 = f(y)$ ;  $R$  Vorwiderstand.

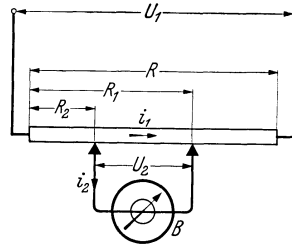


Abb. 39. Subtraktion mit einem Spannungsteiler.  
 $U_1$  Eingangsspannung;  $R$  Gesamtwiderstand;  
 $R_1 = k_1 x$ ;  $R_2 = k_2 y$ ;  $U_2$  abgegriffene Spannung;  
 $B$  Spannungsmesser.

und wird an den Spannungsteiler eine Spannung  $U_1$  angelegt, so ergibt sich für die zwischen den Schiebern abgegriffene Spannung  $U_2$  unter der Voraussetzung, daß  $i_1$  sehr viel größer ist als  $i_2$

$$U_2 = \left( \frac{R_1}{R} \cdot U_1 - \frac{R_2}{R} \cdot U_1 \right) = \frac{U_1}{R} (R_1 - R_2). \quad (36)$$

Sind  $R_1$  und  $R_2$  lineare Funktionen von  $x$  und  $y$ ;  $R_1 = k_1 x$ ;  $R_2 = k_2 y$ , so folgt

$$U_2 = \frac{U_1}{R} \cdot (k_1 x - k_2 y). \quad (37)$$

Wird außerdem  $U_1$  eine lineare Funktion von  $z$

$$U_1 = k_3 \cdot z \quad \text{und} \quad \frac{k_3}{R} = k_4,$$

so wird

$$U_2 = k_4 \cdot z (k_1 x - k_2 y) \quad (38)$$

oder für  $k_1 = k_2 = k_4 = 1$

$$U_2 = z (x - y). \quad (39)$$

Läßt man bei dieser Schaltung die Funktionenschieber anstatt vom Anfang des Spannungsteilers von einem festen Anzapfpunkt aus gemäß

Abb. 40 nach links und rechts wandern, so erhält man an Stelle der Subtraktion eine Addition

$$U_3 = \frac{R_1}{R} \cdot U_1; \quad U_4 = \frac{R_2}{R} \cdot U_1$$

$$U_2 = \frac{U_1}{R} (R_1 + R_2) = \frac{U_1}{R} (k_1 x + k_2 y). \quad (40)$$

Brückenschaltungen. Auch mit Brückenschaltungen können Rechenoperationen ausgeführt werden, wie am Beispiel einer Multiplikation oder Division mit der Wheatstone-Brücke gezeigt werden soll (Abb. 41). Für Brückengleichgewicht ist

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (41)$$

und für  $R_3 = \text{const}$

$$R_2 = k_1 \cdot R_1 \cdot R_4 \quad (42)$$

oder, wenn als Abgleichglied  $R_4$  gewählt wird,

$$R_4 = k_2 \cdot \frac{R_2}{R_1}. \quad (43)$$

Erfolgt der Brückenabgleich durch einen automatischen Kompensator, so ist die Stellung des Kompensationsgliedes ein Maß für die gesuchte Funktion. Durch Kombination von Vorwiderständen, Spannungsteilern und Brücken lassen sich nahezu beliebige Gleichungen elektrisch darstellen, ein Verfahren, das besonders in der Regeltechnik weitgehend gebraucht wird.

Differentiation und Integration. Elektrische Differentiation kann mit Induktivitäten oder Kapazitäten vorgenommen werden; beispielsweise gilt für die Induktionsspannung  $e$  eines vom Strom  $i$  durchflossenen Stromkreises von der Induktivität  $L$

$$e = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad (44)$$

und für den Ladestrom  $i$  eines an der Spannung  $e$  liegenden Kondensators von der Kapazität  $C$

$$i = C \cdot \frac{de}{dt}. \quad (45)$$

Beide Verfahren ermöglichen also die unmittelbare Anzeige des Differentialquotienten einer als Strom oder Spannung darstellbaren Größe, während Integrationen mit summierenden Meßgeräten, etwa mit Zählern, ausgeführt werden können.

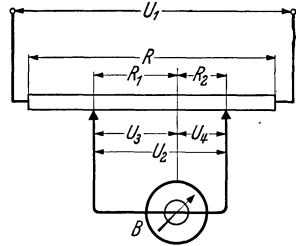


Abb. 40.

Addition mit einem Spannungsteiler.

$U_1$  Eingangsspannung;  
 $U_2$  abgegriffene Spannung;  
 $R$  Gesamtwiderstand;  $R_1 = k_1 x$ ;  
 $R_2 = k_2 y$ ;  $B$  Spannungsmesser.

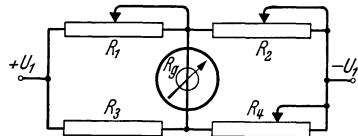


Abb. 41. Multiplikation und Division mit einer Wheatstone-Brücke.

$R_1 \dots R_4$  Brückenwiderstände;  $R_g$  Diagonalwiderstand;  $U_1$  Brückenspannung.

## B. Umwandlung mechanischer in elektrische Größen.

Der Zusammenhang zwischen den mechanischen und elektrischen Größen kann auf mancherlei Art gegeben sein oder geschaffen werden. Am einfachsten gestaltet sich die Messung, wenn ein natürliches Gesetz die mechanischen und elektrischen Werte verbindet, wie etwa Werkstoff, Querschnitt, Länge und Temperatur eines Leiters seinen Widerstand bestimmen. In diesem Fall ergibt sich die mechanische Größe ohne weiteres aus der Messung der elektrischen Werte. Ein natürlicher gesetzmäßiger Zusammenhang besteht auch bei den Umformern, bei denen der mechanische Vorgang eine entsprechende elektrische Größe erzeugt, wofür der Drehzahlgeber als bekanntestes Beispiel genannt sein möge. Bei der dritten Art mechanisch-elektrischer Umwandlung besteht kein unmittelbarer natürlicher Zusammenhang zwischen der zu messenden mechanischen und der gemessenen elektrischen Größe, vielmehr wird von der mechanischen Größe künstlich, mittels eines Umwandlers oder Senders, ein elektrischer Stromkreis beeinflusst, wie es beim Widerstandsender geschieht.

### I. Physikalischer Zusammenhang zwischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften.

#### 1. Abmessungen und Widerstand eines Leiters.

Der Widerstand  $R$  eines metallischen Leiters von der Temperatur  $t$  errechnet sich aus seinen Abmessungen

$$R_t = c [1 + \alpha (t - t_0)] \cdot \frac{l}{q}. \quad (46)$$

Darin bedeuten

- $R_t$  = Widerstand des Leiters bei der Temperatur  $t$ ,
- $c$  = spezifischer Widerstand des Leiters bei der Temperatur  $t_0$ ,
- $\alpha$  = Temperaturkoeffizient,
- $t_0$  = Bezugstemperatur,
- $l$  = Leiterlänge,
- $q$  = Leiterquerschnitt.

Da spezifischer Widerstand und Temperaturkoeffizient Werkstoffkonstanten sind und die Temperatur des Leiters bestimmt werden kann, läßt sich aus der Größe des Widerstandes auf eine der beiden Größen  $l$  oder  $q$  schließen, wenn die andere bekannt ist. Die Ermittlung des Widerstandes erfolgt nach einem der bekannten Meßverfahren, wobei die Temperaturabhängigkeit als lästige Störungsfunktion zu berücksichtigen ist. Temperaturunabhängigkeit der Messung erreicht man dadurch,

daß man dem Meßgerät denselben Temperaturkoeffizienten gibt, den der Leiterwerkstoff aufweist und dafür sorgt, daß beide die gleiche Temperatur annehmen und die Temperaturfehler sich aufheben. Erfolgt die Messung beispielsweise mit einem Kreuzspul-Instrument (S. 16), so erreicht man die Temperaturunabhängigkeit durch Vorschalten eines aus dem Leitermaterial bestehenden Vorwiderstandes passender Größe vor den Richtkreis. Mit den Bezeichnungen der Abb. 42 und unter Vernachlässigung des Spulenwiderstandes des Instruments, also des Instrumentenverbrauchs, ergibt sich

$$i_1 = \frac{U}{c [1 + \alpha_1 (t_1 - t_0)] \cdot \frac{l}{q}} \quad (47)$$

$$i_2 = \frac{U}{R_v [1 + \alpha_2 (t_2 - t_0)]} \quad (48)$$

und für  $\alpha_1 = \alpha_2$  und  $t_1 = t_2$  wird der Ausschlag

$$a = \frac{i_2}{i_1} = \frac{c \cdot l}{R_v \cdot q} = k \cdot \frac{l}{q}. \quad (49)$$

Die Messung ist also unabhängig von der Spannung  $U$  und dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha$ .

Dabei ist selbstverständlich nicht notwendig, daß  $R$  und  $R_v$  aus demselben Material bestehen, notwendig ist nur, daß der Gesamttemperaturgang von Richt- und Ablenkungskreis übereinstimmt. Dasselbe Ziel erreicht man bei konstanter Spannung durch einfache Messung der Stromaufnahme mit einem Drehspul-Instrument, wenn man der Feldstärke des Drehspul-Instruments durch einen temperaturabhängigen magnetischen Nebenschluß denselben Temperaturkoeffizienten verleiht, wie ihn der zu untersuchende Leiter aufweist. Es wird dann der Ausschlag des Drehspul-Strommessers

$$a = k_1 \cdot i \cdot \mathfrak{B} [1 + \beta (t_1 - t_0)] \quad (50)$$

und der Meßstrom

$$i = \frac{U}{R} = \frac{U}{c \cdot [1 + \alpha (t_2 - t_0)] \cdot \frac{l}{q}} \quad (51)$$

oder der Ausschlag

$$a = \frac{k_1 \cdot U \cdot q \cdot \mathfrak{B}}{l \cdot c} \cdot \frac{[1 + \beta (t_1 - t_0)]}{[1 + \alpha (t_2 - t_0)]}, \quad (52)$$

woraus für konstant gehaltene Spannung  $U$ , Gleichheit der Temperaturen  $t_1$  und  $t_2$  und der Temperaturkoeffizienten  $\alpha$  und  $\beta$  ebenfalls folgt

$$a = K \cdot \frac{q}{l}. \quad (53)$$

Die Skala des Instruments kann also in  $q$  oder  $l$  beziffert werden. Der temperaturabhängige magnetische Nebenschluß läßt sich durch einen

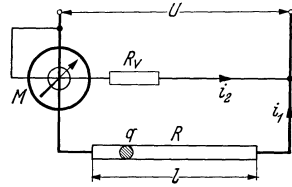


Abb. 42. Messung von Länge oder Querschnitt eines Leiters durch Widerstandsbestimmung.

$U$  Meßspannung;  $R$  Meßwiderstand, dessen Länge  $l$  oder Querschnitt  $q$  bestimmt werden soll;  $i_1$  Meßstrom;  $R_v$  Vorwiderstand des Richtkreises;  $i_2$  Richtstrom.

mittels einer Bimetallfeder verstellbaren Nebenschluß aus weichem Eisen oder durch einen festen magnetischen Nebenschluß aus Material mit temperaturabhängiger Permeabilität verwirklichen.

## 2. Elastischer Spannungszustand und spezifischer Widerstand [13].

Wird ein metallischer Leiter einem allseitigen Druck ausgesetzt oder in bestimmten Richtungen elastisch beansprucht, so ändert sich sein spezifischer Widerstand. Daneben tritt eine weitere Widerstandsänderung durch die elastische Verformung des Leiters auf. Bei allseitigem Druck gilt für den Widerstandskoeffizienten

$$\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial p} = \frac{1}{\varrho} \cdot \frac{\partial \varrho}{\partial p} + \frac{1}{l} \cdot \frac{\partial l}{\partial p} - \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial q}{\partial p}. \quad (54)$$

Bei einseitigem Druck ergibt sich für den longitudinalen Koeffizienten des Widerstandes

$$\frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{S} = \frac{\Delta \varrho}{\varrho} \cdot \frac{1}{S} + \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{1}{S} - \frac{\Delta q}{q} \cdot \frac{1}{S} = \frac{\Delta \varrho}{\varrho} \cdot \frac{1}{S} + \frac{1 + 2\sigma}{E}. \quad (55)$$

Darin bedeuten:

$R$  = Widerstand des Leiters,

$\varrho$  = spezifischer Widerstand,

$l$  = Länge,

$q$  = Querschnitt,

$S$  = Zugkraft,

$p$  = Druck,

$E$  = Elastizitätsmodul,

$\sigma$  = Poissonzahl =  $\frac{\text{Querzusammenziehung}}{\text{Längsdehnung}}$ .

Die gesamte Widerstandsänderung in der Spannungsrichtung setzt sich also aus 3 Anteilen zusammen: der Änderung des spezifischen Widerstandes, den Änderungen des Leiterquerschnittes und der Leiterlänge. Die longitudinalen Koeffizienten des Widerstandes für einige Metalle und die Spannungseinheit  $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  betragen:

Werkstoff	$\frac{1}{S} \cdot \frac{\Delta R}{R}$	Werkstoff	$\frac{1}{S} \cdot \frac{\Delta R}{R}$
Silber . .	$+5,3 \cdot 10^{-6}$	Nickel . .	$-2,5 \cdot 10^{-6}$
Kupfer . .	$+2,9 \cdot 10^{-6}$	Platin . .	$+2,65 \cdot 10^{-6}$
Eisen . . .	$+2,6 \cdot 10^{-6}$		

Der Effekt wurde trotz seiner geringen Größe zur Messung von Zugkraft, Druck und Beschleunigung herangezogen, doch ist das Anwendungsgebiet auf wenige Sonderfälle beschränkt.

### 3. Elastischer Spannungszustand und Permeabilität [14].

Der Verlauf der Magnetisierungsschleife ferromagnetischer Werkstoffe ist in hohem Maße von den elastischen Spannungen abhängig;

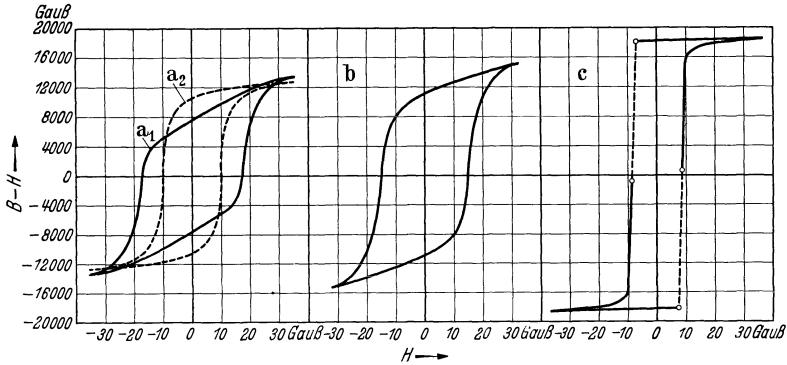


Abb. 43. Magnetisierungskurven einer Nickel-Eisen-Legierung mit 8% Nickelgehalt bei verschiedener Zugspannung. [Aus Ann. Physik Bd. 395 (1929) S. 757.]  
 $a_1$ :  $\sigma = 0$ , kalt bearbeitetes Material;  $a_2$ :  $\sigma = 0$ , Material ausgegüht; b:  $\sigma = 600 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  
 c:  $\sigma = 6000 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

er wurde im Zusammenhang mit dem Barkhausen-Effekt an Nickel und Nickel-Eisen-Legierungen von verschiedenen Seiten eingehend untersucht. Abb. 43 zeigt als Beispiel die Magnetisierungskurven eines kaltgereckten Nickel-Eisen-Drahtes bei verschiedener Zugbeanspruchung. Die Permeabilitätsänderung ist besonders ausgeprägt bei den Nickel-Eisen-Legierungen der Permalloy-Reihe; sie wird als Magnetoelastizität bezeichnet und kann infolge ihres gesetzmäßigen und umkehrbaren Verlaufes zur Messung des elastischen Spannungszustandes, also zur Druck-, Zug- und Torsionsmessung herangezogen werden. Abb. 44 zeigt den Verlauf der Permeabilitätsänderung abhängig von der Zugspannung für eine Nickel-Eisen-Legierung. Zur Messung der Permeabilitätsänderung werden fugenlose Meßkörper mit einer eingefädelt Magnetisierungswicklung versehen oder mehrteilige Meßkörper mit einer eingelegten Magnetisierungswicklung und aufeinander geschliffenen Trennflächen fugenlos verschweißt (Abb. 45). Luftspalte an den Trennflächen, die sich bei Belastung ändern können, vermögen das Meßergebnis erheblich zu fälschen und sind auf jeden Fall zu vermeiden, ebenso ist für eine möglichst gleichmäßige Belastung des Materials zu sorgen. Die spezifische Belastung ist so niedrig zu wählen, daß auch bei den zu erwartenden Überlastungen keine dauernde Verformung des Meßkörpers eintritt. Die Messung erfolgt mit Wechselstrom technischer Frequenz in einer

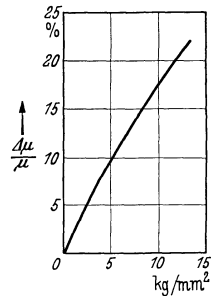


Abb. 44. Änderung der Permeabilität einer Nickel-Eisen-Legierung mit dem elastischen Spannungszustand. [Aus Z. techn. Phys. Bd. 14 (1933) S. 467.]



Brückenschaltung nach Abb. 46. Die Gesamtanordnung besteht aus einer Spannungsgleichhaltung, einer Meßbrücke, einer Anzeigebrücke und einem Tiefpaß zwischen beiden. Die magnetoelastische Meßdose  $R_1$ ,  $L_1$  bildet den einen Zweig einer über den Spannungsgleichhalter  $K$  gespeisten Maxwell-Wien-Bücke, die anderen Zweige werden von den

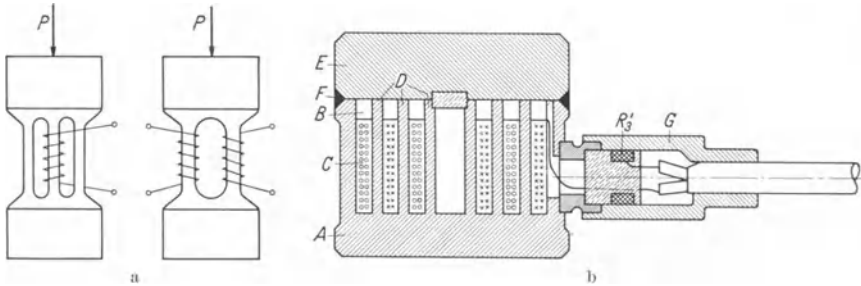


Abb. 45 a und b. Aufbau magnetoelastischer Druckmeßdosen. [Aus Arch. techn. Messen V 132—15.]  
 a Luftspaltlose magnetoelastische Druckmeßdosen; b Schnitt durch geschweißte magnetoelastische Druckmeßdose.  $A$  Druckkörper;  $B$  Nuten;  $C$  Wicklungen;  $D$  Druckfläche;  $E$  Dosendeckel;  $F$  Schweißnaht;  $G$  Kabelanschluß;  $R_3$  Temperaturkompensationswiderstand.

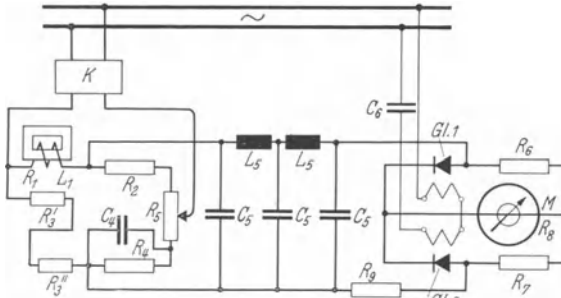


Abb. 46. Maxwell-Wien-Bücke für magnetoelastische Kraftmessung.  
 $R_1$ ,  $L_1$  Magnetoelastische Druckmeßdose;  $R_2 \dots R_5$  Widerstände der Meßbrücke;  $C_4$  Abgleichkondensator;  $L_5$ ,  $C_5$  Siebkreis;  $R_6 \dots R_7$  Widerstände der Anzeigebrücke;  $Gl_1$ ,  $Gl_2$  fremderregte Schwinggleichrichter;  $M$  Drehspul-Anzeigegerät;  $K$  Spannungsgleichhalter.

Widerständen  $R_2 \dots R_5$  und dem Kondensator  $C_4$  gebildet, mit dem der Brückenabgleich erfolgt. Für Brückengleichgewicht gilt:

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}; \quad L_1 = R_2 \cdot R_3 \cdot C_4. \quad (56)$$

Zwischen der Meßbrücke und der Anzeigebrücke glättet der Siebkreis  $L_5$ ,  $C_5$ , die durch die Meßdose verzerrte Stromkurve. In der Anzeigebrücke sind 2 Widerstände  $R_6$ ,  $R_7$  mit zwei fremderregten Schwingkontakt-Gleichrichtern  $Gl_1$ ,  $Gl_2$  und dem Drehspul-Anzeigegerät  $M$  zusammenschaltet. Mit dem Kondensator  $C_6$  wird die Schaltphase der Gleichrichter auf den günstigsten Wert eingestellt.

Da die Induktivität der Meßdose außer vom elastischen Spannungszustand auch von Feldstärke, Temperatur und Frequenz abhängt, müssen besondere Mittel zur Beseitigung dieser Einflüsse vorgesehen werden.

Der Spannungseinfluß auf den Nullpunkt rührt von der Änderung des Scheinwiderstandes  $Z$  der Meßdose mit dem Magnetisierungsstrom  $i$  her, er verschwindet, wenn die Dose auf Permeabilitätsmaximum ausgesteuert ist, also für  $dZ/di = 0$ . Diese Aussteuerung ist außerdem deshalb günstig, weil auch das Maximum der Empfindlichkeit, also der Scheinwiderstandsänderung mit der elastischen Spannung, in der Nähe dieses Punktes liegt.

Der Spannungseinfluß bei Belastung, also auf die Anzeige, ist schwer zu beseitigen, und es muß deshalb ein Spannungsgleichhalter  $K$  mit sinusförmiger Ausgangsspannung vorgesehen werden. Der Spannungseinfluß auf den Nullpunkt beträgt 2...3%, der auf die Empfindlichkeit 10% je 10% Spannungsänderung.

Der Temperatureinfluß ist 10% je 10°, er wird durch den in die Meßdose eingebauten temperaturabhängigen Widerstand  $R'_3$  ausgeglichen, dessen Vergrößerung auf den Diagonalzweig der Brücke in entgegengesetzter Richtung wie eine Temperatursteigerung einwirkt. Nach dem Abgleich verbleibt ein Restfehler von 0,3...0,5%/10°.

Der Frequenzeinfluß ist 10% je 10% Frequenzänderung. Er wird nicht besonders kompensiert, da die Meßfrequenz im allgemeinen genügend konstant gehalten werden kann; den mit dem Frequenzeinfluß parallel laufenden Oberwelleneinfluß gleicht der Siebkreis  $L_5, C_5$  hinreichend aus.

Marktgängige Einrichtungen dieser Art nehmen etwa 6...10 VA auf und geben an das Meßgerät je nach Meßbereich 0,5...25  $\mu$ W ab. Die Genauigkeit beträgt bei Spannungs- und Frequenzkonstanz  $\pm 2\%$  vom Meßbereich-Endwert. Der Fehler durch mechanische Hysterese ist  $< 1\%$ . Für die Messung langsam verlaufender elastischer Spannungsänderungen wird die Einrichtung mit dem technischen Wechselstrom gespeist, für rasch verlaufende Vorgänge kann eine höhere Trägerfrequenz und oszillographische Aufzeichnung gewählt werden. Die Eigenfrequenz der Meßkörper läßt sich infolge ihres einfachen Aufbaues nahezu beliebig hoch machen.

#### 4. Absorption von Röntgenstrahlen [15].

Röntgenstrahlen werden beim Durchgang durch einen Werkstoff teilweise absorbiert. Die Strahlschwächung hängt von der Wellenlänge der verwendeten Strahlen, der Dicke und den Eigenschaften des durchstrahlten Werkstoffes ab. Für Strahlen einer bestimmten Wellenlänge, also eine homogene Strahlung, gilt

$$J_1 = J_0 \cdot e^{-\mu d}. \quad (57)$$

Darin bedeutet:

- $J_0$  = die ungeschwächte Strahlung,
- $J_1$  = die geschwächte Strahlung,
- $\mu$  = den Schwächungskoeffizienten,
- $d$  = die Werkstoffdicke,
- $e$  = die Basis der natürlichen Logarithmus.

Der Schwächungskoeffizient setzt sich aus dem Absorptions- und dem Streukoeffizienten zusammen. Der Absorptionskoeffizient

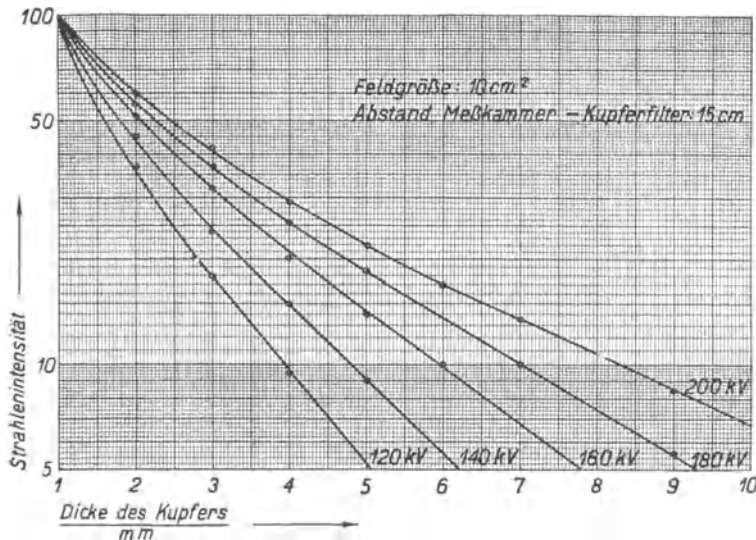


Abb. 47. Verlauf der Röntgenstrahlen-Intensität beim Durchgang durch Kupfer unter Ausschaltung der Streustrahlen ionometrisch gemessen. (Aus BERTHOLD: Grundlagen der technischen Röntgendurchstrahlung, Leipzig: Joh. Ambr. Barth 1930.)

wächst ungefähr mit der 3. Potenz der Ordnungszahl des durchstrahlten Elements, der Streukoeffizient ist unabhängig von ihr; beide ändern sich proportional der Dichte des durchstrahlten Stoffes. Der Absorptionskoeffizient nimmt außerdem mit der 3. Potenz der Wellenlänge der Strahlung zu, langwellige weiche Röntgenstrahlen haben also ein kleines Durchdringungsvermögen. Nun liefern Röntgenröhren keineswegs einwellige homogene Strahlung, sondern ein vielwelliges heterogenes Strahlungsgemisch, dessen kurzwelliger Anteil mit der Röhrenspannung zunimmt. Da der kurzwellige Teil der Strahlung ein größeres Durchdringungsvermögen aufweist, ist es zweckmäßig, für Werkstoffprüfung Röntgenröhren hoher Spannung zu verwenden. Infolge der Abhängigkeit der Absorption von der Wellenlänge ist die Exponentialfunktion  $J_1 = J_0 \cdot e^{-\mu d}$  für die zumeist vorliegende heterogene Strahlung durch eine wesentlich kompliziertere Funktion zu ersetzen, wie das Beispiel der Durchstrahlung

von Kupferplatten verschiedener Dicke mit Strahlen verschiedener Härte (Abb. 47) zeigt.

Die Röntgendurchstrahlung kann demnach zur Dickenmessung herangezogen werden, sie ist besonders für laufende Prüfung von Röhren und Hohlkörpern geeignet, doch liegt ihre Bedeutung in erster Linie in der Ermittlung von Fehlern. Die Eichung erfolgt durch Normalplatten. Zur Anzeige werden Ionisationskammern oder Zählrohre in geeigneter Schaltung verwendet. Die Ionisationskammer enthält 2 Elektroden in einem gasgefüllten Raum, in dem durch die Strahlung Ionen und Elektronen erzeugt werden, und unter dem Einfluß eine Beschleunigungsspannung zu den Elektroden wandern. Bei genügend hoher Spannung erreichen alle Ionen die Elektroden und der Ionenstrom ist unabhängig von weiterer Spannungssteigerung.

Die Größe des Ionisationsstromes wächst linear mit der Größe des bestrahlten Raumes zwischen den Elektroden; ferner steigt der Sättigungsstrom linear mit der Gasdichte in der Kammer und etwa mit der 3. Potenz der Ordnungszahl des Füllgases, er ist weiterhin abhängig von Werkstoff und Dicke der Kammerwand. Die Größe des Ionisationsstromes kann aus der Zeit ermittelt werden, innerhalb deren er einen bekannten Kondensator um einen bestimmten Betrag auflädt oder entlädt. Diese Art der Messung gibt jedoch keine unmittelbare Anzeige. Bei dem unmittelbar zeigenden Gerät der Siemens & Halske AG. wird der vom Ionisationsstrom an einem sehr hohen Widerstand hervorgerufene Spannungsabfall mit einem elektrostatischen Instrument gemessen. Die Empfindlichkeit einer Ionisationskammer läßt sich steigern durch Vergrößerung der Abmessungen, durch Einsetzen von Zwischenwänden aus Schwermetallen und durch Verwendung hochatomigen Füllgases bei hohem Gasdruck. Der Vorteil der Ionisationskammer gegenüber dem Zählrohr ist ihre gute zeitliche Konstanz infolge der weitgehenden Unabhängigkeit des Ionisationsstromes von der Kammer-spannung, ihr Nachteil ist in der geringeren Empfindlichkeit und deshalb längeren Meßdauer zu suchen.

Das Zählrohr enthält ebenfalls 2 Elektroden in einem gasgefüllten Raum, von denen die Anode als Draht in der Achse der zylinderförmigen Kathode ausgespannt ist. Zwischen beiden Elektroden liegt eine Spannung von etwa 1000 V. Die von der Strahlung ausgelösten Elektronen wandern unter dem Einfluß des Feldes zur drahtförmigen Anode und werden durch das starke Feld in ihrer Nähe so beschleunigt, daß sie durch Stoßionisation eine Elektronenlawine von etwa  $1 \cdot 10^{-4}$  s Dauer erzeugen. Der aus vielen solchen Elektronenlawinen bestehende

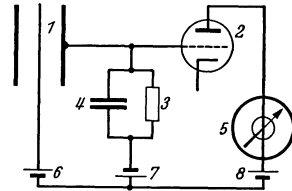


Abb. 48. Schaltung eines Zählrohres.  
 1 Zählrohr, 2 Verstärker,  
 3 Gitterwiderstand, 4 Glättungs-  
 kondensator, 5 Anzeigegerät, 6 Zähl-  
 rohrspannung, 7 Gitterspannung,  
 8 Anodenspannung.

Zählrohrstrom fließt über einen Widerstand mit parallel geschaltetem Glättungskondensator und der Spannungsabfall an diesem Widerstand wird nach entsprechender Verstärkung mit einem Drehspul-Instrument angezeigt (Abb. 48). Der Vorteil des Zählrohres liegt in seiner hohen und in weiten Grenzen veränderbaren Empfindlichkeit, von Nachteil ist seine geringe Konstanz.

## II. Erzeugung einer elektrischen Größe durch eine mechanische.

### 1. Induktionsgesetz.

a) **Spannungsgeber.** Zeitlich unveränderliches Magnetfeld. Bewegt sich eine Leiterschleife von  $w$  Windungen und der Länge  $l$  cm

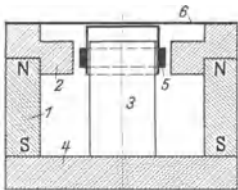


Abb. 49. Schwingungsgeber.  
1 Ringmagnet, 2 Polschuh,  
3 Eisenkern, 4 Grundplatte,  
5 Schwingspule, 6 Aufhängung  
der Schwingspule.

in einem zeitlich unveränderlichen Magnetfeld, das an der Stelle der Spulenseiten die Größe  $\mathfrak{B}_1$  bzw.  $\mathfrak{B}_2$  habe, mit der relativen Geschwindigkeit  $v$  cm · s<sup>-1</sup> senkrecht zum Feld und zur Spulenchse, so wird in ihr eine EMK von der Größe  $e = -w(\mathfrak{B}_2 - \mathfrak{B}_1) \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8}$  V induziert. Da Länge und Anzahl der Leiter Konstanten der Meßeinrichtung sind und die Feldstärke eines Dauermagnets hinreichend unveränderlich ist, gibt dieses Gesetz die Mittel zur Umwandlung einer Geschwindigkeit in eine EMK. Die bekanntesten Geräte dieser Art sind die Drehzahlgeber, die entweder mit feststehenden Magneten und umlaufendem Anker als Gleichstrommaschinen oder mit umlaufenden Magneten und feststehenden Spulen als Wechselstromerzeuger

ausgeführt werden. Tritt an Stelle der Drehbewegung eine hin- und hergehende Bewegung der induzierten Spule, so erhält man einen Schwingungsgeber in der Art eines umgekehrt betriebenen Lautsprecher-systems, wie in Abb. 49 einer gezeigt ist. Die runde Schwingspule ist im ringförmigen Luftspalt eines Topfmagnets an einer Membran oder an Spannbändern leicht beweglich aufgehängt und wird durch die zu untersuchende Schwingung senkrecht zu den radial verlaufenden Kraftlinien bewegt. Da das Feld im Bereich der Bewegung der Schwingspule als homogen angesehen werden kann und der ganze Spulenumfang gleichsinnig induziert wird, gilt in diesem Fall für die induzierte EMK  $e = -w \cdot \mathfrak{B} \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8}$  V, wobei  $l$  den Spulenumfang bedeutet.

Zeitlich veränderliches Magnetfeld. Bei der zweiten Ausführungsform stehen Erregerfeld und die Induktionsspule still und ein beweglicher Eisenschirm oder Eisenanker ruft durch Änderung der

magnetischen Leitfähigkeit Flußschwankungen hervor, durch die in der Spule eine transformatorische EMK von der Größe

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ V} \quad (58)$$

induziert wird, wenn  $w$  wieder die Windungszahl der Spule,  $\Phi$  den Gesamtfluß und  $d\Phi/dt$  die zeitliche Änderung des Flusses bedeuten. Abb. 50 zeigt 2 Ausführungen solcher Geber für Drehbewegung.

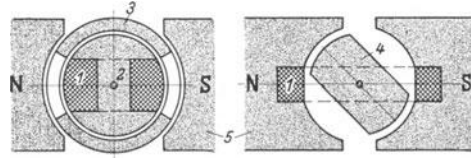


Abb. 50. Drehzahlgeber mit feststehenden Spulen und Magneten und umlaufendem Kraftlinienleitstück.  
1 Induktionsspule, 2 feststehender Anker, 3 umlaufender Eisenschirm, 4 umlaufender Eisenanker, 5 Polschuhe.

Sowohl bei der Ausführung mit konstantem Magnetfeld, wie bei der mit veränderlichem Fluß ist die EMK der Drehgeschwindigkeit proportional. Die Skala des Anzeigeelements wird linear und Rechenoperationen lassen sich leicht ausführen. Das gilt jedoch nur, solange die Stromentnahme so gering ist, daß die Ankerrückwirkung keine wesentliche Feldänderung hervorruft, worauf beim Entwurf und beim Anschluß mehrerer Empfänger geachtet werden muß. Zur Erzeugung des Magnetfeldes können konstante Gleichstromquellen oder Dauermagnete [16] herangezogen werden. Bei Verwendung von Dauermagneten ist eine besondere Temperaturkompensation notwendig, da Remanenz und Koerzitivkraft mit steigender Temperatur abnehmen, wie Abb. 51 für einige Magnetstahlsorten zeigt. Am günstigsten verhalten sich Al-Ni-Stähle. Die Temperaturabhängigkeit der Feldstärke läßt sich durch eine Gleichung von der Form

$$H_t = H_0 (1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (59)$$

darstellen, worin  $H_0$  und  $H_t$  die Feldstärken bei 0 bzw.  $t^\circ$ ,  $t$  die Temperaturänderung,  $\alpha$  und  $\beta$  Konstanten des Magnetmaterials bedeuten. Zumeist sind  $\alpha$  und  $\beta$  negativ und hängen außer von der chemischen

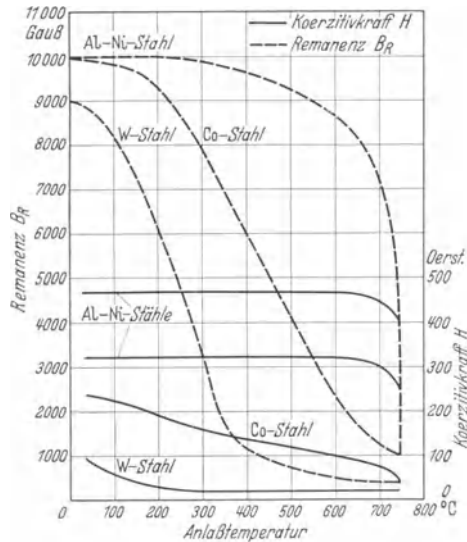


Abb. 51. Temperaturabhängigkeit von Remanenz und Koerzitivkraft verschiedener Magnetstähle. [Aus Z. VDI Bd. 79 (1935) S. 1171—1173.]

Zusammensetzung vom Längenverhältnis, der Magnetisierungstemperatur und von der absoluten Temperatur ab. In Abb. 52 ist der Feldstärkenverlauf abhängig von der Temperatur für einen 9%igen Kobalt-Chrom-Hufeisenmagnet wiedergegeben. Der Temperatureinfluß wird entweder durch Kunstschaltungen mit Widerständen verschiedener Temperaturkoeffizienten im elektrischen Kreis oder durch veränderliche magnetische Nebenschlüsse im magnetischen Kreis kompensiert.

b) **Frequenzgeber.** Völlige Unabhängigkeit von allen ungewollten Änderungen erreicht man bei diesen Gebern, wenn man die Spannungsmessung durch eine Frequenzmessung ersetzt. Während man den

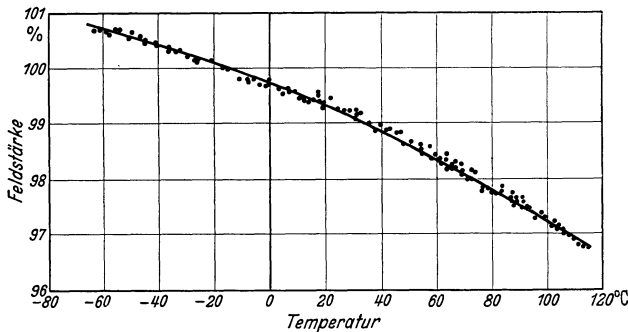


Abb. 52. Abhängigkeit der Feldstärke eines Kobalt-Chrom-Magnets von der Temperatur.  
[Aus J. Instn. electr. Engrs. Bd. 81 (1937) S. 734.]

Temperaturkoeffizienten:  $\alpha = -1,975 \cdot 10^{-4}$ ;  $\beta = -5,33 \cdot 10^{-7}$ . Zusammensetzung des Magnetstahls: 9% Co, 9% Cr, 1% C, 0,2% Si, 0,2...0,4% Mn.

Spannungsgeber auf eine möglichst lineare Drehzahl-Charakteristik züchtet, soll jedoch der Frequenzgeber möglichst bei allen Drehzahlen konstante Spannung abgeben, wozu eine völlig andere Auslegung erforderlich ist. Für die Spannungskonstanthaltung stehen alle Mittel zur Verfügung, die beim Generatorantrieb von Kraftmaschinen stark schwankender Drehzahl, z. B. bei Autolichtmaschinen, erprobt sind, sowie die Spannungsregler und frequenzabhängigen Vorwiderstände aller Arten. Von den Frequenzanzeigern sind nur die Zungen- und Impulsfrequenzmesser weitgehend spannungsunabhängig, alle Zeigerfrequenzmesser sind mehr oder weniger empfindlich gegen Spannungsänderungen.

## 2. Piezoelektrizität [17].

Wird ein piezoelektrischer Kristall parallel zu seiner elektrischen Achse oder senkrecht zur elektrischen und optischen Achse elastischen Spannungen unterworfen, so treten auf den senkrecht zur elektrischen Achse liegenden Schnittflächen elektrische Ladungen auf. Diese Ladungen sind nach Größe und Vorzeichen der elastischen Spannung verhältnismäßig und unabhängig von der Größe der gedrückten Kristallfläche.

Wann die elektrische, wann die neutrale Achse als Druckrichtung vorzuziehen ist, hängt von der Konstruktion des Piezogebers ab. Die Beanspruchung in der elektrischen Achse hat den Nachteil, daß die Druckkräfte über die Elektroden übertragen werden müssen. Nach LANGEVIN ist die Beanspruchung in der elektrischen Achse bei großen, in der neutralen Achse bei kleinen Druckänderungen vorzuziehen. Als piezoelektrische Kristalle kommen Turmalin, Quarz und Seignettesalz in Betracht. Turmalin und Quarz haben gleich gute elektrische und mechanische Eigenschaften und unterscheiden sich nur durch den Preis. Seignettesalz hat einen größeren Piezomodul, ist jedoch temperatur- und feuchteabhängig und schwieriger anzuwenden, da es geringe mechanische Festigkeit hat und der Piezoeffekt nur bei Biegung und Torsion auftritt. Bezeichnet

$Q$  die Ladungsmenge [Coulomb],  
 $\delta e$  den piezoelektrischen Modul [elektrostatische CGS-Einheiten/kg],  
 $P$  die Gesamtkraft [kg],

so gilt

$$Q = \frac{\delta e \cdot P}{3 \cdot 10^9} \text{ (Coulomb)}. \quad (60)$$

Diese Ladung erzeugt zwischen den Elektroden eine Spannung

$$U = \frac{\delta e \cdot P}{C + C_0} \left[ \frac{\text{Coulomb}}{\text{Farad}} = \text{V} \right], \quad (61)$$

wenn  $C$  die Kapazität des durch die Elektroden und den Kristall gebildeten Kondensators und  $C_0$  die Kapazität der Meßeinrichtung bezeichnet. Die Empfindlichkeit der Einrichtung wird gesteigert durch Anordnung mehrerer, mechanisch hintereinander, elektrisch parallel geschalteter Kristalle. Es ist dann

$$U = \frac{n \cdot \delta e \cdot P}{n \cdot C + C_0} = k_1 \cdot P, \quad (62)$$

d. h. die Empfindlichkeitsminderung durch die Schaltungskapazität wird verkleinert. Da  $\delta e$ ,  $n$ ,  $C$  und  $C_0$  Konstanten der Meßeinrichtung sind, kann der piezoelektrische Kristall zur Messung von Kräften verwendet werden. Der meist verwendete Piezokristall Quarz hat einen Piezomodul  $\delta e = 0,0614 \dots 0,0681$  elektrostatische CGS-Einheiten/kg, sein Elastizitätsmodul ist etwa  $0,8 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ , d. h. ein Quarzstück von  $1 \text{ cm}^2$  Querschnitt und  $1 \text{ cm}$  Länge wird durch eine Kraft von  $1 \text{ kg}$  um  $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ cm}$  zusammengedrückt; die Kraftmessung erfolgt also nahezu weglos. Die Beanspruchung kann infolge der hohen mechanischen Festigkeit des Quarzes bis  $800 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-2}$  getrieben werden. Der piezoelektrische Modul des Quarzes ist in geringem Maße temperaturabhängig und hat offenbar in der Nähe von  $10^\circ$  seinen Höchstwert. Zwischen  $20$



und  $200^\circ$  beträgt der Temperaturkoeffizient des Piezomoduls etwa  $-0,15 \dots -0,18\%/10^\circ$ . Der Wert wird von verschiedenen Beobachtern verschieden angegeben, und ich führe die Unstimmigkeit auf Wärmedeh-

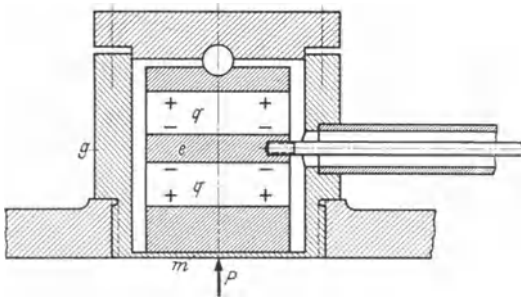


Abb. 53. Schnitt durch eine Quarz-Druckmeßkammer.  
[Aus Phys. Z. Bd. 38 (1937) S. 73—78.]

*e* Mittelelektrode; *g* Gehäuse; *m* Membran; *q* Quarz;  
*P* Meßdruck.

nungen der Versuchseinrichtung zurück, insbesondere halte ich bei technischen Druckdosen den Temperaturfehler durch die Wärmedehnung der Armaturteile für wesentlichlicher als den Temperaturkoeffizienten des Piezomoduls, weshalb ich bei jeder Neukonstruktion eine Messung des Temperatureinflusses für unerlässlich halte.

Das piezoelektrische Verfahren eignet sich infolge der hohen Eigenfrequenz des Piezokristalls zum Messen rasch verlaufender Kraft-

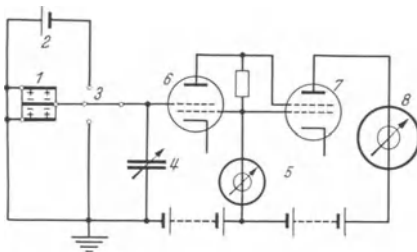


Abb. 54. Schaltung einer piezoelektrischen Meßeinrichtung.

1 Piezoquarz; 2 Eichspannung, 3 Umschalter: Eichen — Messen — Erden; 4 Justierkondensator; 5 Röhrenvoltmeter; 6 hochisoliertes Eingangsrohr; 7 zweite Verstärkerstufe; 8 Oszillograph.

änderungen; es wird angewendet zur Dehnungs-, Kraft-, Druck-, Schwingungs-, Beschleunigungs- und Erschütterungsmessung. Abb. 53 ist ein Schnitt durch eine einfache Druckmeßdose mit zwei Quarzplättchen. Die piezoelektrische Spannung wird mit einem Röhrenvoltmeter gemessen und zumeist mit Schleifen- oder Kathodenoszillographen angezeigt; ein Schaltungsbeispiel zeigt Abb. 54.

### III. Mechanische Beeinflussung eines elektrischen Stromkreises.

Bei diesen Meßverfahren wird der Gleich- oder Wechselstromwiderstand eines elektrischen Stromkreises oder die Kopplung zwischen 2 Stromkreisen mit besonderen Gebern durch die mechanische Größe verändert.

#### 1. Impulssender [18].

Die einfachste Art, einen Gleich- oder Wechselstromkreis durch eine mechanische Größe zu beeinflussen, ist die sprunghafte Veränderung

seines Widerstandswertes durch teilweise oder völlige Überbrückung und Unterbrechung. Zur Anzeige der Meßgröße dienen Häufigkeit, Dauer oder Verhältnis der Stromschwankungen, keinesfalls aber die Stromstärke. Die Verfahren sind somit in sehr weiten Grenzen unabhängig von der Höhe der Hilfsspannung.

Impulszahl- und Impulsfrequenzverfahren. Beim Impulszahl- und Impulsfrequenzverfahren wird an der Sendestelle die mechanische Meßgröße lichtelektrisch, magnetisch oder mechanisch in eine verhältnisgleiche Impulshäufigkeit umgewandelt und an der Empfangsstelle die Impulszahl pro Zeiteinheit gemessen. Soll der Mittelwert der mechanischen Größe während einer bestimmten Zeit gemessen werden, so genügt als Impulsempfänger ein einfaches Zählwerk in Verbindung mit einer Uhr. Für die Anzeige des Augenblickswertes werden von den

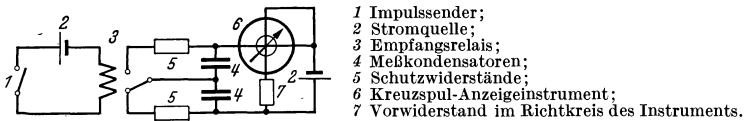


Abb. 55. Schaltbild einer Impulsfrequenzmessung mit Kreuzspul-Instrument.

auf der Empfangsseite ankommenden Impulsen 2 Meßkondensatoren taktmäßig geladen und entladen und der Mittelwert des Ladestromes mit einem stark gedämpften Kreuzspul-Instrument gemessen (Abb. 55). Durch die Kondensatorschaltung wird Unabhängigkeit von der veränderlichen Impulsdauer, durch das Kreuzspul-Instrument Spannungsunabhängigkeit erreicht. Bei niedriger Impulsfrequenz wird die Kondensatorumladung mechanisch von einem Umschaltrelais, bei hohen Impulsfrequenzen trägheitslos von Ionenröhren gesteuert. Der Hauptstrom des Kreuzspul-Instruments ist

$$i_1 = 2 \cdot f \cdot c \cdot U \text{ A} \quad (63)$$

der Richtstrom

$$i_2 = k_1 \cdot U \quad (64)$$

und seine Anzeige  $\alpha = K \cdot f$ ; sie ist also nur von der Anzahl der Stromstöße pro Sekunde abhängig. In der Gleichung bedeutet

- $f$  die Impulsfrequenz in Hertz,  
 $C$  die Kapazität jedes Meßkondensators in Farad,  
 $U$  die Meßspannung in Volt.

Die Kondensatorschaltung zur Umwandlung der Impulse in einen Meßstrom ist nur ein Beispiel. Beim Impulskompensationsverfahren steuern die Impulse die Drehgeschwindigkeit einer Welle, und es wird die zur mechanischen Kompensation dieser Geschwindigkeit erforderliche Stromstärke gemessen. Eine weitere Möglichkeit ist die Messung der Impulsfrequenz mit einem Zungenfrequenzmesser, sie wird bei der

Prüfung von Nummernscheiben in der automatischen Telephonie angewendet. Die Impulsfrequenzverfahren eignen sich besonders für Drehzahlmessung von Wellen mit geringem Drehmoment; die Impulshäufigkeit beträgt 1...50 J/s.

**Impulsverhältnisverfahren.** Bei den Impulsverhältnissendern wird durch die mechanische Meßgröße das Verhältnis von Impulsdauer zu Impulspause oder das Verhältnis der Dauer zweier Impulse durch Verdrehen einer Kontaktscheibe oder eines Kontaktarmes verändert und der Strommittelwert bzw. der Stromquotient gemessen. Die sekundliche Impulszahl kann konstant gehalten werden oder mit der Meßgröße schwanken, sie spielt nur insofern eine Rolle, als die Dämpfung des Anzeigeinstruments entsprechend angepaßt und bei niedrigen Impulszahlen ein Mittelwert-Instrument verwendet werden muß. Das Verfahren eignet sich für Drehbewegungen, Stellungsanzeige und Geschwindigkeitsmessungen und wird ebenfalls zur Nummernscheibenprüfung verwendet.

**Impulszeitverfahren.** Bei den Impulszeitverfahren wird von der mechanischen Größe die Dauer eines oder der Abstand mehrerer Impulse gesteuert. Auf der Empfangsseite werden Zeitschreiber, Oszillographen oder Kurzzeitmesser eingesetzt. Die Verfahren eignen sich für Stellungs- und Geschwindigkeitsanzeige, insbesondere bei rasch ablaufenden einmaligen Vorgängen.

## 2. Widerstandssender [19].

Im Gegensatz zu den Impulssendern wird bei den Widerstandsgebern, ebenso wie bei allen folgenden Sendeeinrichtungen, der Widerstand des Stromkreises von der mechanischen Größe stetig oder in sehr kleinen Stufen verändert. Die Verfahren beruhen auf einer Intensitätsmessung und setzen deshalb spannungsunabhängige Anzeigeinstrumente oder konstante Meßspannung voraus. Wir unterscheiden feste Widerstände mit kleinem Temperaturkoeffizienten und mechanischer Steuerung durch Verdrehen oder Verschieben eines Abgriffes oder durch Eintauchen in Quecksilber, ferner feste Widerstände mit großem Temperaturkoeffizienten und thermischer Steuerung, Halbleiterwiderstände mit Drucksteuerung, Elektrolytwiderstände mit mechanischer Steuerung und lichtelektrische Widerstandssender.

**Mechanisch gesteuerte feste Widerstände.** Zu den Widerstandssendern mit kleinem Temperaturkoeffizienten und mechanischer Steuerung zählen alle Dreh- und Schiebewiderstände. Der Widerstandsdraht kann geradlinig ausgespannt oder in Form einer Raupe oder Wendel auf einen Isolierkörper aufgebracht sein. Zuweilen werden auch dünne, leitende Kohle- oder Metallschichten auf keramischen Trägern verwendet. Neben den Ausführungen mit linearem Widerstandsverlauf spielen Widerstände besonderer Stufung, beispielsweise logarithmisch

zunehmende Widerstände, eine gewisse Rolle. Besonderer Sorgfalt bedürfen in jedem Fall die Stromabnehmer, zumal bei niedrigem Widerstandsbereich, geringem Drehmoment, aggressiver Atmosphäre oder erschütterungsreichem Betrieb. Anwendungsgebiet und Ausführungsformen der Widerstandssender sind nahezu unübersehbar und dementsprechend schwankt das erforderliche Antriebsdrehmoment von wenigen mgcm bis zu einigen mkg. Abb. 56 zeigt als Beispiel einen Widerstandssender für große geradlinige Wege und große Verstellkraft, er besteht aus 4 parallelen Schleifdrähten, auf denen ein Schleifer mit 4 Abgriffen gleitet. Zwei der Drähte sind aus Widerstandsmaterial, die beiden anderen aus Bronze und dienen nur der Stromzuführung. In der Schaltung der Abb. 57 liegt in der Mittelstellung des Schleifers keine Spannung am Anzeigeelement, in den beiden Endstellungen wird positive oder negative Höchstspannung erreicht. Die nächste Abb. 58

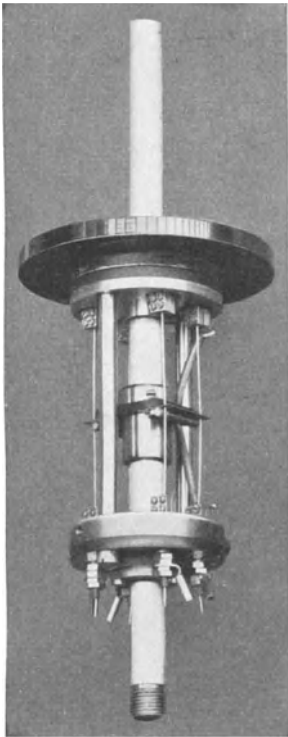


Abb. 56. Widerstandssender für geradlinige Bewegung und große Wege. (Ausführung Siemens & Halske A.G.)

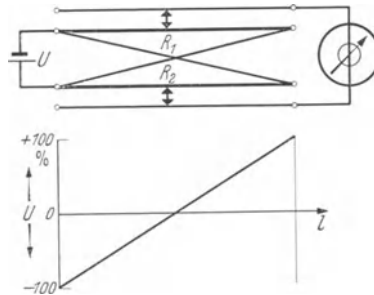


Abb. 57. Schaltung des Widerstandssenders für geradlinige Bewegung.

ist ein Drehwiderstandsgeber für einen Winkelweg von  $270^\circ$ . Als Widerstandsmaterial wurde Silber-Palladium-Draht, als Stromabnehmer eine Bronzebürste mit Platin-Iridium-Kontakt verwendet. Das Gerät ist 55 mm im Durchmesser, 35 mm hoch, wiegt 125 g und ist staubdicht geschlossen. Die größte Abweichung vom linearen Widerstandsverlauf ist  $\pm 0,5\%$ , die Genauigkeit 1% und das erforderliche Drehmoment 2 gcm. Der Gesamtwiderstand beträgt  $100 \Omega$ , der Widerstand der Zuführungsfeder  $0,5 \Omega$ .

Widerstandssender für sehr kleine Wege werden durch Auftragen einer dünnen Graphitschicht auf einen dehnbaren Isolierstoffstreifen

hergestellt. Ein solcher Widerstand ändert seinen Wert mit der Zugspannung und kann zu Dehnungsmessungen verwendet werden.

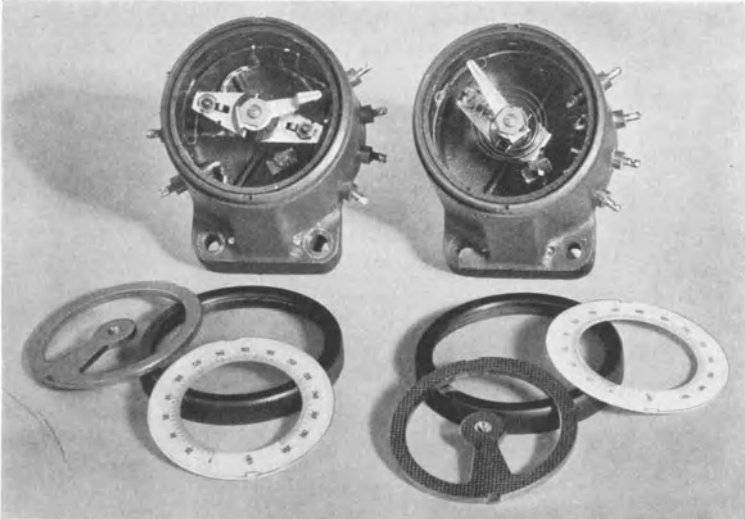


Abb. 58. Widerstandsgeber für Drehbewegung. (Ausführung Siemens & Halske AG.)



Abb. 59. Ringrohr-Widerstandssender in Potentiometerschaltung. (Ausführung Siemens & Halske AG.)

Quecksilbergesteuerte Widerstandssender. Kontakt- und Korrosionsschwierigkeiten werden bei Widerstandsendern mit Quecksilbersteuerung völlig vermieden, bei denen der Widerstand durch Eintauchen in Quecksilber kurzgeschlossen wird und deren bekannteste Ausführungsform der in Abb.59 gezeigte Ringrohrsender ist. Der Geber besteht aus einem kreisförmig gebogenen und zur Hälfte mit Quecksilber gefüllten Glasrohr, in dem ein kalibrierter Platin-Iridium-Draht ausgespannt ist. Der Widerstandsdraht kann als Einfachwiderstand, die eine Ringrohrhälfte, oder als Potentiometer mit Mittenanzapfung beide

Ringrohrhälften umfassen. Das Ringrohr eignet sich besonders für die Übertragung großer Drehwinkel. Der Kraftbedarf ist einige cmg, das Gewicht einschließlich der Quecksilberfüllung 20 g. Der Temperaturfehler

ist  $0,5\%/10^\circ$  und der durch die Oberflächenspannung des Quecksilbers hervorgerufene Meniskusfehler  $\pm 1\%$ . Dieser Fehler läßt sich durch Mittel zur Beseitigung der Oberflächenspannung weitgehend vermindern.

Bei der zweiten Ausführungsform werden kalibrierte Quecksilberkapillaren verwendet, in die in gleichmäßigen Abständen Kontaktdrähte eingeschmolzen sind, zwischen deren Anschlußenden die Meßwiderstände

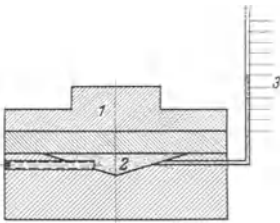


Abb. 60.  
Schnitt durch eine Quecksilber-Druckmeßdose.  
1 Druckplatte;  
2 Quecksilberbehälter;  
3 Meßkapillare mit Kontaktdrähten.

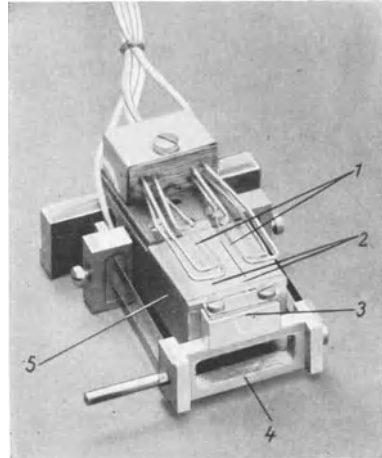


Abb. 61. Thermisch gesteuerter Widerstandssender (Bolometer). (Ausführung Siemens & Halske A.G.)  
1 Bolometerwendeln; 2 Schlitzdüsen;  
3 Glimmertähe; 4 Übertragungsgestänge;  
5 Membranebläse.

liegen (Abb. 60). Zur Kompensation der Wärmedehnung des Quecksilbers ist eine in den Vorratsbehälter ragende Einstellschraube vorgesehen.

Thermisch gesteuerter Widerstandssender [20]. Widerstandssender mit thermischer Steuerung haben mit konstantem Strom beheizte Widerstände mit hohem Temperaturkoeffizienten, deren Abkühlungsverhältnisse durch die Meßgröße gesteuert werden. Die Steuerleistung ist bei diesen Gebern außerordentlich gering. Das mechanisch gesteuerte Düsenbolometer (Abb. 61) besteht aus 4 Nickeldrahtwendeln 1, von denen je zwei in Reihe geschaltet zwei Zweige einer Wheatstone-Brücke bilden, deren beide andere Zweige aus unveränderlichen Widerständen bestehen. Die beiden beheizten Wendeln liegen über den beiden Schlitzdüsen 2 eines Membranebläses (Abb. 62), das einen scharf begrenzten Luftstrom gegen die stromdurchflossenen Nickelwendeln richtet. An dem blattfederelagerten Gestänge 4 sitzt eine leichte Steuerfahne 3 aus Glimmer. In der Ruhestellung des Gebers steht das Glimmer-

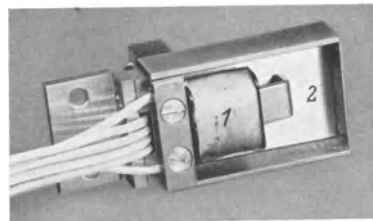


Abb. 62.  
Membranebläse des Bolometergebers.  
1 Erregerspule; 2 Schwingmembran.

plättchen zwischen beiden Düsen, die beiden Wendeln werden vom Luftstrom gleichmäßig gekühlt und haben gleiche Temperaturen und Widerstände. Bei jeder Bewegung des Gestänges wird einer der beiden Luftströme durch die Glimmerfahne abgeschirmt und die zugehörige Nickelwendel erhitzt sich unter entsprechender Widerstandszunahme von etwa 200 auf etwa 400°. Durch die Lage der Abdeckfahne relativ zu den Schlitzen oder durch ihre Formgebung kann der Verlauf der Widerstandsänderung beeinflusst werden. Die thermische Trägheit der Wendeln bringt eine Verzögerung von 0,2...0,5 s. Die Gesamteinrichtung wird zweckmäßig über einen Konstanthalter mit Gleichrichtern aus dem 50 Hz-Netz gespeist, da Spannungsschwankungen sowohl das Gebläse wie die Brücke beeinflussen. Die Welligkeit des gleichgerichteten Stromes genügt für die Erregung des Gebläses. Frequenzänderungen von  $\pm 10\%$  haben keinen meßbaren Einfluß, dagegen zeigt der Geber eine gewisse Temperaturabhängigkeit. Der Bolometersender eignet sich besonders für die Übertragung sehr kleiner Bewegungen und geringer Kräfte. Eine Verschiebung der Fahne um 30...50  $\mu\text{m}$  genügt bereits zur vollen Aussteuerung der Brücke und für die Betätigung eines Tintenschreibers. Die Vergrößerung der Bewegung ist etwa 1:3000, die höchste abgebbare Leistung etwa 50 mW.

Bei einer zweiten Ausführungsform des bolometrischen Widerstandsensors steht der geheizte Bolometerdraht in natürlichem Wärmeaustausch mit seiner Umgebung unter Verzicht auf eine künstliche Belüftung. Den Hauptanteil des vom Bolometerdraht ausgehenden Wärmestromes übernimmt eine in geringem Abstand parallel zu ihm verlaufende kalte Metallschneide. Die Temperatur des Bändchens ist in hohem Maße vom Abstand dieser Schneide abhängig. Abstandsänderungen von 0,1 mm haben bereits in einer Brücke meßbare Widerstandsänderungen zur Folge. Für kleine Verschiebungswege ist der Skalenverlauf linear. Das Widerstandsbändchen besteht aus Platin, ist 20 mm lang und  $50 \times 5 \mu\text{m}$  dick. Die Einrichtung eignet sich zur Messung kleiner Wege, beispielsweise bei elektrischen Waagen. Nach ähnlichen Grundsätzen arbeitet das Hitzdraht-Mikrometer der Cambridge Instrument Co., bei dem 4 Drahtspiralen in Brückenschaltung verwendet werden, von denen 2 fest angeordnet sind, während am äußersten Gang der beiden anderen die mechanische Größe angreift und die Spiralen um einen geringen Betrag auf- oder zudreht. Die Abkühlungsverhältnisse einer solchen Spirale hängen sehr stark vom Gangabstand ab, und man erhält auf diese Weise ebenfalls ein empfindliches Mikrometer.

Druckabhängige Halbleiterwiderstände [21]. Der Widerstand von Halbleitern setzt sich, wie wir bereits bei der Besprechung der Kohledruckregler erfuhren, aus einem konstanten inneren Widerstand und einem druckabhängigen Übergangswiderstand zusammen

$$R = R_i + \frac{K}{p}. \quad (65)$$

Bei der üblichen Ausführung in Form dünner Plättchen ist der innere Widerstand klein gegen die Übergangswiderstände, so daß man den rein hyperbolischen Zusammenhang  $K = R \cdot p$  erhält. Das Halbleitermaterial soll große mechanische Festigkeit und geringen Temperaturkoeffizienten aufweisen und frei von elastischen Nachwirkungen und Hystereseerscheinungen sein. Als Halbleiterwerkstoff wird fast ausschließlich künstliche Kohle in Form von Tabletten verwendet, von denen mindestens zwei zu einer Kohlesäule vereinigt sind. Vorzugsweise ordnet man zwei solcher Kohlesäulen zu beiden Seiten des Kraftangriffspunktes mit hinreichender Vorspannung an, so daß sich bei Kraftänderungen der Druck auf die eine Säule vermehrt, auf die andere vermindert. Die Längenänderung beträgt nur einige hundertstel Millimeter, weshalb die Temperaturdehnungen der Einspannteile sorgfältig kompensiert werden müssen. Die Temperaturabhängigkeit der Kohle selbst ist bis  $50^\circ$  vernachlässigbar klein, die erreichbare Gesamtgenauigkeit beträgt 1...3%. Kohle-druckgeber werden wegen ihrer geringen Längenänderung hauptsächlich zum Messen größerer Kräfte in Druck-, Beschleunigungs-, Erschütterungs- und Dehnungsmessern verwendet, sie sind infolge ihrer hohen Eigenfrequenz für die Aufnahme rasch verlaufender Vorgänge und oszillographische Wiedergabe geeignet. Die Eichung kann statisch erfolgen; eine eventuell notwendige künstliche Alterung wird durch Wechselbelastung mit dem mehrfachen Meßbereichendwert erzielt.

**Elektrolytische Widerstandssender.** Die elektrolytischen Widerstandssender beruhen auf der Veränderung des Querschnittes oder der Länge der Strombahn durch die mechanische Meßgröße. Der Einfachsender hat 2 Flüssigkeitskammern mit einem Verbindungskanal, dessen Querschnitt durch die mechanische Größe verändert wird. Der Potentiometergeber enthält in einem Flüssigkeitsgefäß zwei feste und eine bewegliche Elektrode, durch deren Lage das Verhältnis der beiden Teilwiderstände bestimmt ist. Die Elektrolytsender sind stark temperaturabhängig und werden deshalb meist in Verhältnisschaltung betrieben. Elektrolytische Einfachsender dienen der Druckmessung bei großen verfügbaren Kräften, Potentiometersender zur Stellungsanzeige und Dehnungsmessung bei sehr kleinen Kräften.

*Die Schaltung der Widerstandssender.* Die Bestimmung des Widerstandes erfolgt ursprünglich aus Strom und Spannung mit 2 Meßgeräten, ab und zu auf der Flächenskala eines aus Strom- und Spannungsmesser bestehenden Kreuzzeiger-Instruments, weitaus am häufigsten aber mit dem Kreuzspul-Instrument. Einige gebräuchliche Kreuzspul-Schaltungen sind in Abb. 63 a bis f dargestellt. Die Anzeige ist bei allen Schaltungen unabhängig von den Schwankungen der Meßspannung  $U$ .

Schaltung a: Der zu messende Widerstand  $R_x$  liegt in Reihe mit der Ablenkspule des Kreuzspul-Instruments, der Ausschlag  $\alpha$  wird also mit



zunehmendem Widerstand kleiner. Die Schaltung eignet sich für große Widerstände und große Widerstandsänderungen. Der Widerstand der Zuleitungen zum Widerstand  $R_x$  wird mitgemessen. Es gilt:

$$i_1 = \frac{U}{R_i + R_x}, \quad (66)$$

$$i_2 = \frac{U}{R}, \quad (67)$$

$$\alpha = K \cdot \frac{i_1}{i_2} = K \cdot \frac{R}{R_i + R_x}. \quad (68)$$

Schaltung b: Der zu messende Widerstand  $R_x$  liegt parallel zu der Ablenkspule des Kreuzspul-Instruments, der Ausschlag  $\alpha$  wird also mit zunehmendem Widerstand  $R_x$  größer. Die Schaltung eignet sich für kleine Widerstände und große Widerstandsänderungen. Der Widerstand der Zuleitungen zum Widerstand  $R_x$  wird mitgemessen. Es gilt:

$$i_1 = \frac{U}{R_i + R_v \cdot \left(1 + \frac{R_i}{R_x}\right)}, \quad (69)$$

$$i_3 = \frac{U}{R}, \quad (70)$$

$$\alpha = K \cdot \frac{i_1}{i_3} = K \cdot \frac{R}{R_i + R_v \cdot \left(1 + \frac{R_i}{R_x}\right)}. \quad (71)$$

Schaltung c und d: Der Widerstand  $R_x$  liegt in einer Wheatstone-Brücke. Die Schaltung eignet sich für kleine Änderungen des Meßwiderstandes  $R_x$ . Es gilt:

$$i_g = i \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 - R_x \cdot R_4}{\Delta}, \quad (72)$$

$$\Delta = R_g (R_x + R_2 + R_3 + R_4) + (R_x + R_3)(R_2 + R_4), \quad (73)$$

$$i_2 = i \cdot \frac{R_c}{R_K}, \quad (74)$$

$$\alpha = K \cdot \frac{i_g}{i_2} = K \cdot \frac{(R_2 \cdot R_3 - R_x \cdot R_4) R_K}{\Delta \cdot R_c}. \quad (75)$$

Bei der Zweileiter-Brückenschaltung gehen Änderungen der Zuleitungswiderstände in die Messung ein, während bei der Dreileiterschaltung nach d gleichmäßige Änderungen der Zuleitungswiderstände die Messung nicht beeinflussen, da die Zuleitungen in zwei benachbarten Brückenzweigen liegen.

Schaltung e zeigt einen Potentiometergeber in Brückenschaltung. Die Brückenwiderstände betragen bei Mittelstellung des Potentiometers  $R_1 \dots R_4$ , die Potentiometerverschiebung  $\Delta R$ . Dann ist

$$i_g = i \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 - R_1 \cdot R_4 - \Delta R (R_1 + R_2)}{\Delta_1}, \quad (76)$$

$$\Delta_1 = R_g (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_3)(R_2 + R_4) - \Delta R (R_1 - R_2 + R_3 - R_4) - \Delta R^2. \quad (77)$$

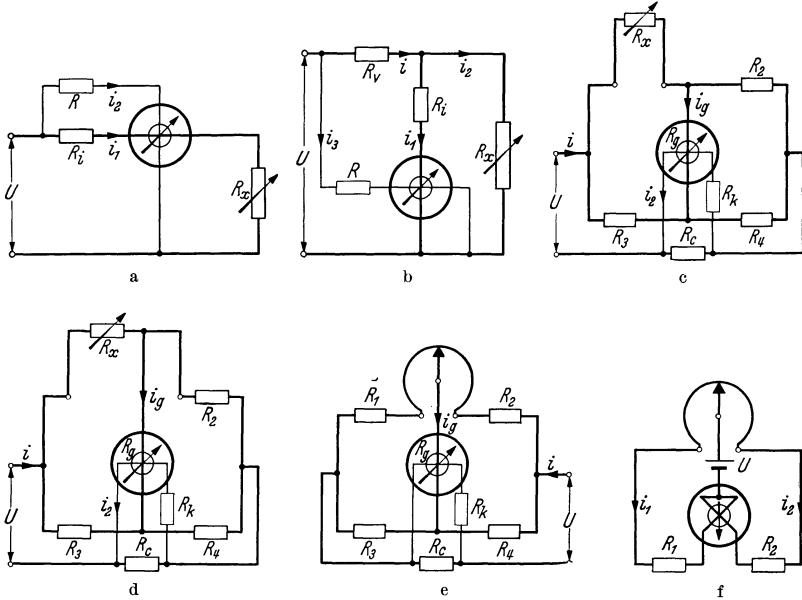


Abb. 63 a bis f. Widerstandmessung mit Kreuzspul-Instrument.

a Serienschaltung; b Parallelschaltung.  $R_x$  Meßwiderstand;  $R_v$  Vorwiderstand;  $R_i$  Widerstand im Ablenkungskreis;  $R$  Widerstand im Richtkreis;  $U$  Meßspannung. c Zweileiter-Brückenschaltung; d Dreileiter-Brückenschaltung.  $R_x$  Meßwiderstand;  $R_2, \dots, R_4$  Brückenwiderstände;  $R_g$  Widerstand des Ablenkungskreises;  $R_k$  Widerstand im Richtkreis;  $R_c$  Nebenwiderstand des Richtkreises;  $U$  Meßspannung. e Brückenschaltung mit Potentiometergeber.  $R_1, \dots, R_4$  Brückenwiderstände;  $R_g$  Widerstand des Ablenkungskreises;  $R_k$  Widerstand des Richtkreises;  $R_c$  Nebenwiderstand des Richtkreises;  $U$  Meßspannung. f Differenzschaltung mit Potentiometergeber;  $R_1, R_2$  Zweigwiderstände;  $U$  Meßspannung.

Schaltung f ist eine Differenzschaltung. Bei Mittelstellung des Potentiometers seien  $R_1$  und  $R_2$  die Widerstände der beiden Zweige,  $\Delta R$  die Potentiometerverschiebung.

$$i_1 = \frac{U}{R_1 + \Delta R}, \quad (78)$$

$$i_2 = \frac{U}{R_2 - \Delta R}, \quad (79)$$

$$\alpha_1 = \frac{i_1}{i_2} = \frac{U}{R_1 + \Delta R} \cdot \frac{R_2 - \Delta R}{U} = \frac{R_2 - \Delta R}{R_1 + \Delta R}. \quad (80)$$

Die gezeigten Schaltungen stellen selbstverständlich nur einige einfache Fälle aus der großen Zahl der Widerstands-Meßschaltungen dar.

### 3. Lichtelektrische Sender [22].

**Photoelemente.** Alle Metalle, insbesondere die Alkali- und Erdalkalimetalle und einige Metalloxyde entsenden beim Auftreffen von Lichtwellen genügend hoher Frequenz Elektronen, deren Zahl der absorbierten Lichtenergie proportional ist. Die photoelektrische Umwandlung geht im Vakuum streng proportional, trägheitsfrei, nahezu temperaturunabhängig und sehr gut reproduzierbar vor sich, die Ausbeute beträgt etwa  $1 \cdot 10^{-4}$  C/Cal. Sie kann durch eine Gasfüllung von einigen mm Quecksilberdruck bis zum Tausendfachen gesteigert werden, doch ist dann die Proportionalität zwischen Lichtintensität und Elektronenstrom auf einen verhältnismäßig kleinen Intensitätsbereich beschränkt, nicht mehr temperaturunabhängig und die Umwandlung nicht mehr völlig trägheitsfrei. Die Elektronen treten unter dem Einfluß der Lichtenergie aus der Alkalikathode aus und werden durch eine Beschleunigungsspannung zur Metallanode befördert. Oberhalb der Sättigungsspannung, bei der alle freigewordenen Elektronen die Anode erreichen, ist der Strom der Vakuumphotozellen von der Beschleunigungsspannung unabhängig, während er bei Gaszellen durch Bildung von Sekundärelektronen mit der Beschleunigungsspannung wächst. Für genaue Messungen über längere Zeiträume wird die Vakuumphotozelle wegen ihrer größeren Konstanz, für schwache Lichteindrücke die gasgefüllte Zelle wegen ihrer größeren Ausbeute vorgezogen.

Im Gegensatz zu den Alkaliphootelementen arbeiten die Sperrschichtphotozellen bei Atmosphärendruck und ohne Beschleunigungsspannung. Die Elektronen werden in einem Halbleiter ausgelöst und wandern durch die Sperrschicht in die aufgewachsene metallische Gegenelektrode. Proportionalität zwischen Photostrom und Lichtintensität ist nur bei Kurzschluß des äußeren Stromkreises gewahrt; bei endlichem äußeren Widerstand tritt eine merkliche Krümmung der Charakteristik ein. Die Sperrschicht-Photozellen, deren bekannteste Vertreter die Kupferoxydul- und die Selenzelle sind, weisen infolge der temperaturabhängigen Leitfähigkeit der Halbleiter einen erheblichen Temperaturgang auf und arbeiten infolge ihrer Kapazität nicht völlig trägheitsfrei.

**Lichtabhängige Widerstandssender.** Eine bestimmte Modifikation des Selen ändert ihren spezifischen Widerstand mit der Belichtung und kann deshalb zu einem lichtelektrischen Widerstandssender verwendet werden. Die Selenwiderstände bestehen aus einer dünnen Selen-schicht auf einem Isolierkörper, auf den von 2 Seiten her kammartig ineinandergreifende Elektroden aufgebracht wurden, so daß ein möglichst großer Querschnitt bei geringer Länge entsteht. Diese Halbleiterwiderstände haben keine lineare Charakteristik und eine erhebliche Trägheit. Infolge geringer Konstanz und Abhängigkeit von Spannung, Temperatur und Vorgeschichte haben sie gegenüber den Photoelementen nur sehr geringe Bedeutung.

Die lichtelektrischen Sender bestehen grundsätzlich aus einer Lichtquelle und einem lichtelektrischen Element (Abb. 64), zwischen denen eine von der mechanischen Meßgröße verstellte Blende oder ein Spiegel angeordnet ist. Die Empfindlichkeit dieser Einrichtungen läßt sich mit optischen Mitteln nahezu beliebig steigern. Die Zellen sind vor jedem Fremdlicht sorgfältig zu schützen, am besten durch eine besondere Optik im Zellenhalter, welche nur das Bild der leuchtenden Fläche des Lichtsenders auf der Zelle entwirft. Voraussetzung für linearen Zusammenhang zwischen dem Weg des Steuergliedes und dem Photostrom ist gleichmäßige Empfindlichkeit der lichtelektrischen Zelle innerhalb des Aussteuerungsbereiches. Die Helligkeitsschwankungen der Lichtquelle können durch Differenzschaltung zweier Photozellen gleicher Empfindlichkeit oder ein Gegentaktverfahren unwirksam gemacht werden. Bei diesem Verfahren wird der Lichtstrom der Lichtquelle in zwei getrennte Strahlengänge aufgespalten, von denen der eine über den Prüfling, der andere über einen Graukeil zur lichtempfindlichen Zelle führt, wo sie sich wieder vereinigen. Beide Wege werden nacheinander in raschem Wechsel so unterbrochen und geschlossen, daß die Summe der Lichtströme

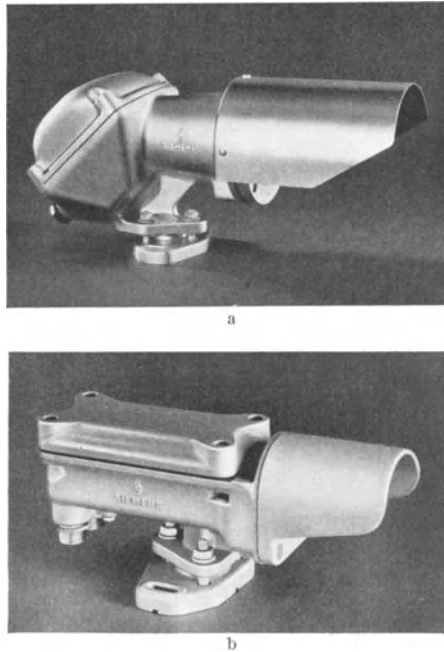


Abb. 64 a und b. Wasserdichter Lichtsender und Zellenhalter mit Störlightschutz (Ausführung Siemens & Halske A.G.) [Aus Siemens-Z. Bd. 91 (1939) S. 235.]

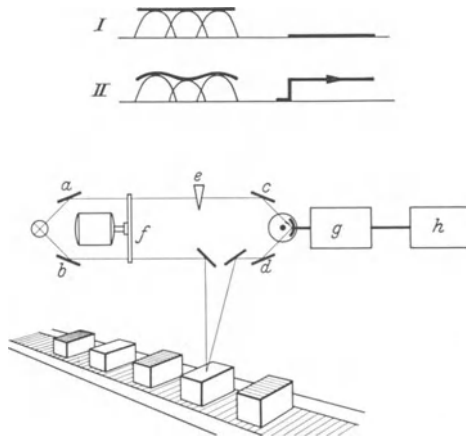


Abb. 65. Grundsätzliche Darstellung des optischen Gegentaktverfahrens. I. Der Prüfling entspricht dem Normal. II. Der Prüfling entspricht nicht dem Normal. [Aus Siemens-Z. Bd. 19 (1939) S. 256.]

a...c Vergleichslichtweg; b...d Prüflichtweg;  
e Graukeil; f Zahnscheibe; g Wechselstromverstärker;  
h Anzeiginstrument.

in jedem Augenblick konstant, die Zelle also stets gleichmäßig ausgeleuchtet ist. Der Vergleichslichtstrom wird mit dem Graukeil auf den einem Normalprüfling entsprechenden Lichtstrom eingestellt. Weicht nun ein Prüfling von diesem Normalwert ab, so erhält die Zelle eine mit der Zerhackerfrequenz schwankende Wechselbeleuchtung und die entsprechenden Schwankungen des Zellenstromes steuern einen Wechselstromverstärker (Abb. 65). Das lichtelektrische Verfahren eignet sich besonders für rasch verlaufende Vorgänge und für Meßeinrichtungen, bei denen nur geringe Kräfte zur Verfügung stehen. Es wird angewendet zur Behälterstandanzeige, für selbsttätige Wägung und als elektrisches Mikrometer, ferner zur Anzeige von Bewegungsvorgängen.

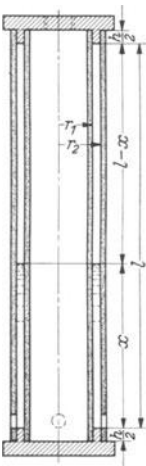


Abb. 66.  
Zylinderkondensator  
als kapazitive Sonde für  
Flüssigkeitsstand-Messung.  
 $r_1$  Außenradius des Innen-  
zylinders;  $r_2$  Innenradius des  
Außenzylinders;  $l$  Meßlänge;  
 $x$  Füllhöhe;  $h$  Verlustlänge.

#### 4. Kapazitive Sender [23].

Die Kapazität eines Plattenkondensators ist gegeben durch die Beziehung

$$C = \varepsilon \cdot \frac{F}{4 \pi a} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^5} \mu\text{F}, \quad (81)$$

worin  $F$  die Fläche der Kondensatorplatten in  $\text{cm}^2$ ,  $a$  ihren Abstand in  $\text{cm}$  und  $\varepsilon$  die Dielektrizitätskonstante des Zwischenmediums bedeuten. Die Kapazität des Kondensators kann demnach durch die zu messende mechanische Größe durch Verändern des Plattenabstandes, der Plattengröße oder der Dielektrizitätskonstante beeinflusst werden.

Kapazitive Sender mit veränderbarem Dielektrikum. Diese Sender werden in 2 Ausführungsformen, als Zylinder- und als Plattenkondensatoren hergestellt. Der Zylinderkondensator ist als kapazitive Sonde zum Eintauchen in Flüssigkeitsbehälter, meist in Form zweier konzentrischer Rohre nach Abb. 66 ausgeführt. Am unteren Ende des Außenzylinders sind Durchlaßöffnungen, deren geringer Querschnitt eine wirksame Dämpfung der Oberflächenbewegung der Flüssigkeit herbeiführt. Die Kapazität eines konzentrischen Zylinderkondensators von der Länge  $l$   $\text{cm}$ , der Dielektrizitätskonstante  $\varepsilon$  und den Radien  $r_1$  und  $r_2$  für den Außenmantel des Innenzylinders bzw. den Innenmantel des Außenzylinders ist:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot l}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^5} \mu\text{F}. \quad (82)$$

Die Gesamtkapazität der kapazitiven Meßsonde kann als Summe dreier parallelgeschalteter Einzelkapazitäten aufgefaßt werden, der Grundkapazität  $C_0$ , der Kapazität des mit Flüssigkeit gefüllten Teiles  $C_x$  und

der Kapazität des mit Luft und Flüssigkeitsdampf gefüllten Teiles  $C_l$

$$C = C_0 + C_x + C_l. \tag{83}$$

Sind  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_x$  und  $\epsilon_l$  die zugehörigen Dielektrizitätskonstanten, so wird

$$C = \frac{K}{2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} [\epsilon_0 \cdot h + \epsilon_l \cdot l + X \cdot (\epsilon_x - \epsilon_l)]. \tag{84}$$

$$C = K_1 \cdot [K_2 + K_3 \cdot X]. \tag{85}$$

Der Plattenkondensator wird meist als Durchlaufkondensator zur laufenden Überwachung der Dicke oder Zusammensetzung bandförmiger Güter verwendet. Er kann nach Abb. 67 als Reihenschaltung zweier Kondensatoren mit den Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_x$  und  $\epsilon_l$  und den Plattenabständen  $x$  bzw.  $a - x$  aufgefaßt werden, wobei  $x$  die zu messende Dicke der Stoffbahn ist.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \tag{86}$$

$$C = \frac{\epsilon_x \cdot \epsilon_l \cdot F}{4 \pi [a \epsilon_x - X (\epsilon_x - \epsilon_l)]} \tag{87}$$

$$C = \frac{K_1}{K_2 - K_3 \cdot X}. \tag{88}$$

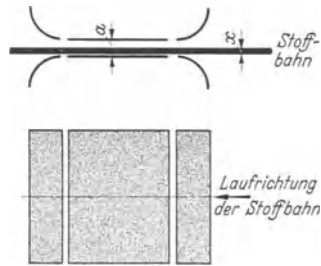


Abb. 67. Plattenkondensator als kapazitiver Geber für Durchlaufmessung.  
 $a$  Plattenabstand;  
 $x$  Dicke der Stoffbahn.

Kapazitive Sender mit veränderbarer Plattengröße. Sender mit veränderbarer Plattengröße sind die bekannten Drehkondensatoren; sie werden zweckmäßig so gestaltet, daß gleichen Winkelwegen gleiche prozentuale Kapazitätsänderungen entsprechen und dienen der Messung von Drehbewegungen.

Kapazitive Sender mit veränderbarem Elektrodenabstand. Die kapazitiven Sender mit veränderbarem Elektrodenabstand werden als Platten- oder Zylinderkondensatoren ausgeführt. Beim einfachen Plattenkondensator entspricht der Abstandsänderung  $\Delta a$  eine Kapazitätsänderung

$$\Delta C = - \frac{\epsilon \cdot F \cdot \Delta a}{4 \pi a (a + \Delta a)}, \tag{89}$$

d. h. solange  $\Delta a$  klein gegen  $a$  ist, bleibt die Kapazitätsänderung der Abstandsänderung proportional und der Skalenverlauf linear

$$\Delta C = K \cdot \Delta a. \tag{90}$$

Für den als kapazitiver Spannungsteiler nach Abb. 68 ausgebildeten Dreiplattenkondensator mit einer beweglichen und zwei festen Platten gilt

$$\Delta U = U_1 - U_2 = U \cdot \frac{\Delta a}{a}. \tag{91}$$

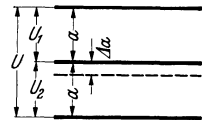


Abb. 68. Kapazitiver Spannungsteiler.  
 $U$  Gesamtspannung;  
 $U_1, U_2$  Teilspannungen;  
 $a$  Plattenabstände.

Wenn  $U$  die Gesamtspannung,  $U_1$  und  $U_2$  die Teilspannungen und  $a$  die Plattenabstände in der Mittellage bedeuten. Einrichtungen dieser Art haben einen geringen Temperaturfehler, da Abstandsänderungen der festen Platten durch Temperatureinflüsse nur als Fehler zweiter Ordnung in die Messung eingehen. Um eine lineare Eichkurve zu erhalten, muß auch hier der Weg  $\Delta a$  klein sein gegen den Plattenabstand  $a$  und die Schaltungskapazität klein gegen die Meßkapazität. Die Spannungsdifferenz an beiden Teilkapazitäten wird mit einem Röhrenvoltmeter gemessen. Die kleinste meßbare relative Kapazitätsänderung ist

$$\frac{\Delta C}{C} = 1,25 \cdot 10^{-5}$$

die kleinste meßbare Verschiebung

$$\Delta a = 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ cm.}$$

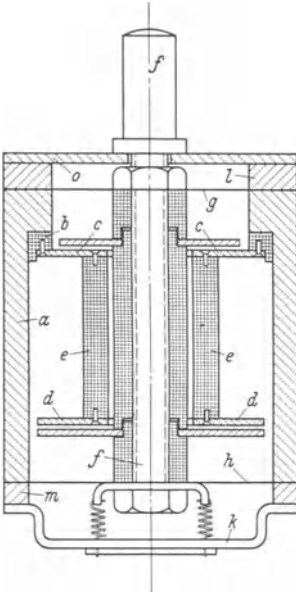


Abb. 69. Kapazitiver Geber mit zwei festen und einer beweglichen Elektrode. [Aus ETZ Bd. 55 (1934) S. 1276.]

$a$  Gehäuse;  $b, e$  Isolation der festen Elektroden;  $f$  Druckbolzen mit beweglicher Elektrode;  $g$  und  $h$  Aufhängung des Druckbolzens;  $k, l, m, o$  Gehäuseteile.

ruht die feste Platte auf der Erdoberfläche, während die bewegliche von einer in der Erde liegenden leitenden Schicht gebildet wird.

Eine ausgeführte Dreielektroden-Druckdose zeigt Abb. 69, die Ausführung eines kapazitiven Mikrometers für Drahtdickenmessung (Abb. 70).

Bei einer Sonderausführung für Flughöhenmessung wird die feste Platte von der Erdoberfläche, die bewegliche vom Flugzeug oder einem Teil des Flugzeuges gebildet, bei einer anderen zur Lagerstättenforschung

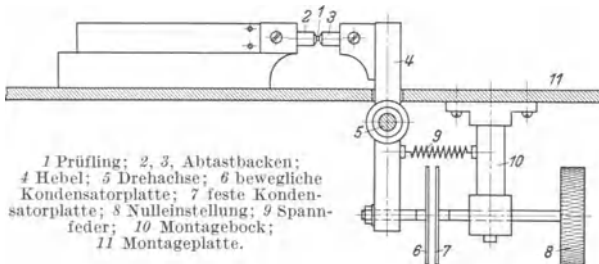


Abb. 70. Kapazitives Mikrometer. [Z. techn. Phys. Bd. 9 (1928) S. 415.]

Beim Zylinderkondensator nach Abb. 71 wird der Luftspalt durch Stauchen des Innenzylinders verändert. Bezeichnet  $a$  den Elektroden-

abstand und  $F$  die wirksame Kondensator-Oberfläche, so gelten für die Kapazitätsänderung dieselben Gleichungen wie für den Plattenkondensator. Bei allen Ausführungen kann das Dielektrikum ein Gas oder eine Flüssigkeit sein, doch werden auch feste Dielektrika angewendet, die den Luftspalt teilweise oder völlig ausfüllen, in letzterem Fall allerdings elastisch deformierbar sein müssen. Eine feste dielektrische Schicht, beispielsweise ein Zaponlacküberzug der Elektroden, hat den großen Vorzug, auch bei sehr kleinen Elektrodenabständen Kurzschlüsse zu verhindern. Die Kapazität dieser Sender liegt in der Größenordnung von einigen 100 pF.

Die kapazitiven Sender mit veränderbarem Luftspalt sind weit verbreitet und werden in den verschiedensten Ausführungsformen für kleine und große Verstellkräfte, Eigenfrequenzen und Plattenbewegungen zur Messung von Wegen, Kräften, Schwingungen und Beschleunigungen hergestellt.

Messung der Kapazitätsänderung. Für die Messung der Kapazitätsänderung oder einer durch sie bedingten Frequenz- oder Spannungsänderung werden außer den bekannten Wechselstrombrücken [19] eine große Anzahl von Sonderschaltungen angegeben. Abb. 72 zeigt die Schaltung einer verstärkerlosen Kapazitätsmeßbrücke für 50 Hz Netzanschluß zur Messung geringer Kapazitätsänderungen, bei der die Grundkapazität nicht in die Messung eingeht. Die Differenz-Meßbrücke mit dem Meßkondensator  $C_1$  und dem Vergleichskondensator  $C_2$  wird über den Netzanschlußwandler  $T_1$  aus dem 50periodigen Starkstromnetz gespeist. Die Spannung  $U_1$  ist konstant zu halten oder als Meßgerät  $M$  ein Kreuzspul-

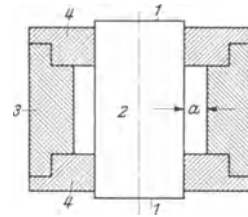


Abb. 71. Zylinderkondensator. 1 Druckflächen; 2 Stauchzylinder; 3 Mantelelektrode; 4 Isolation.

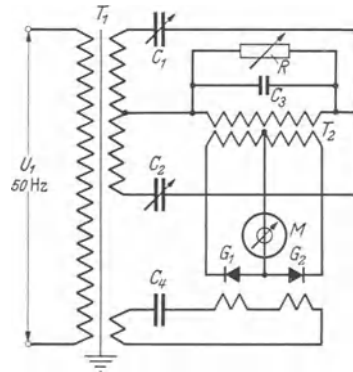


Abb. 72. Verstärkerlose Schaltung zur Messung kleiner Kapazitätsänderungen.  $U_1$  Netzwechselfspannung;  $T_1$  Netzanschlußwandler;  $T_2$  Anpassungswandler;  $R$  Empfindlichkeitsregler;  $G_1, G_2$  fremdgesteuerte Gleichrichter;  $M$  Meßgerät;  $C_1$  Meßkondensator;  $C_2$  Vergleichskondensator;  $C_3$  Resonanzkondensator;  $C_4$  Kunstkondensator für die Gleichrichter-Erregung.

Instrument zu wählen. Im Differenzzweig der Brücke liegt über den Anpassungswandler  $T_2$  eine Gleichrichterschaltung mit zwei fremdregerten Gleichrichtern  $G_1$  und  $G_2$  und dem Anzeige-Instrument  $M$ . Die Gleichrichter-Erregung wird mit dem Kondensator  $C_4$  auf Phasengleichheit mit dem Meßstrom gebracht, um höchste Empfindlichkeit zu erzielen. Die Primärwicklung des Anpassungswandlers  $T_2$  ist durch die



Kapazität  $C_3$  auf Resonanz abgestimmt, wodurch einerseits die Empfindlichkeit gesteigert, andererseits bei Betätigung des Empfindlichkeitsreglers  $R$  eine unerwünschte Phasendrehung vermieden wird. Der Differenzstrom und somit die Anzeige des Meßgerätes ist unabhängig von der Größe der Grundkapazität und nur abhängig von der absoluten Kapazitätsänderung  $\Delta C_1$ , solange der Scheinwiderstand des Differenz-

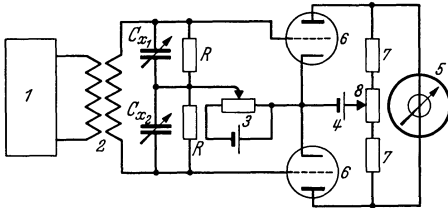


Abb. 73. Schaltung eines kapazitiven Spannungsteilers mit Röhrenvoltmeter.

1 Hochfrequenzsender; 2 Übertrager; 3 Gitterbatterie; 4 Anodenbatterie; 5 Meßgerät; 6 Verstärkerröhren; 7 Brückenwiderstände; 8 Nulleinstellung;  $C_{x1}$ ,  $C_{x2}$  Meßkondensator;  $R$  Gitterableitwiderstände.

kondensatoren  $C_{x2}$  und  $C_{x1}$  mit der Spannung  $U$ ; die Teilspannungen  $U_1$  und  $U_2$  liegen an den Gittern zweier Verstärkerröhren und die Differenz der Anodenströme wird mit dem Drehspul-Instrument 5 gemessen. Diese

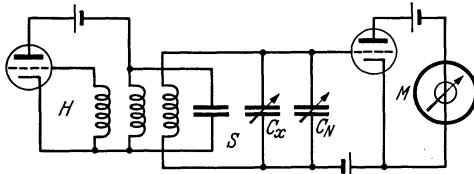


Abb. 74. Kapazitätsmessung nach dem Verfahren der halben Resonanzkurve.

$H$  Hochfrequenzgenerator;  $S$  Schwingkreis;  $C_x$  Meßkondensator;  $C_N$  Justierkondensator;  $M$  Anzeigegerät.

gegen die Geberkapazität, die Gitterableitwiderstände  $R$  groß und der Verbrauch des Meßgerätes gegen den Anodenstrom klein sein. Eine häufig angewendete Schaltung ist die Methode der halben Resonanzkurve (Abb. 74). Ein Hochfrequenzgenerator  $H$  erregt einen Schwingungskreis  $S$ , in dem der kapazitive Sender  $C_x$  und ein Abstimmkondensator  $C_N$  liegen. Mit dem Abstimmkondensator wird die Eigenfrequenz dieses Schwingungskreises auf einen Wert etwas unterhalb der Senderfrequenz eingestellt, so daß sich der Arbeitspunkt bei Mittellage des kapazitiven Senders im geradlinigen Teil auf etwa halber Höhe der Resonanzkurve befindet. Änderungen der Senderkapazität führen dann zu proportionalen Amplitudenschwankungen im Schwingungskreis  $S$  und verhältnismäßigen Änderungen des vom Meßgerät  $M$  angezeigten Anodenstromes. Die Kapazitätsänderung wird demnach zunächst in eine proportionale

kreis klein gegen den des kapazitiven Gebers ist.

Abb. 73 zeigt eine Differenzschaltung mit Röhrenvoltmeter, wie sie für einen kapazitiven Spannungsteiler mit zwei festen und einer beweglichen Elektrode in Frage kommt. Ein Hochfrequenzgenerator 1 speist mit einer Wellenlänge von 300 m über den Übertrager 2 die Meß-

Differenz ist der Verschiebung der beweglichen Mittelelektrode des Spannungsteilers proportional. Um diesen linearen Zusammenhang zu gewährleisten, muß der Weg der Mittelelektrode  $x$  klein gegenüber dem Plattenabstand  $a$  sein, ferner muß die Schaltungskapazität klein

Frequenzänderung und diese in eine Spannungsänderung umgesetzt. Die Frequenz des Senders wird zu etwa 3000 kHz gewählt, die erreichbare Vergrößerung der Plattenbewegung liegt in der Größenordnung von  $10^6$ .

Beim Schwebungsverfahren (Abb. 75) werden zwei Hochfrequenzschwingungskreise  $H_1$  und  $H_2$  nahezu gleicher Frequenz gegeneinander geschaltet, so daß im Anodenkreis die Schwebungsfrequenz auftritt. In einem der Schwingungskreise liegt der kapazitive Sender  $C_x$  und seine Änderungen rufen eine Änderung der Schwebungsfrequenz hervor. Der zweite Teil der Schaltung entspricht dem Verfahren der halben Resonanzkurve. Die Schwebungsfrequenz wird auf einen niederfrequenten Schwingungskreis  $S$  gegeben, der so abgestimmt ist, daß der Arbeitspunkt bei Mittelstellung des Meßgebers  $C_x$  auf der halben Höhe der Resonanzkurve liegt. Jede Änderung von  $C_x$  und die entsprechende Änderung der Schwebungsfrequenz ruft nun am Schwingungskreis  $S$  eine proportionale Spannungsänderung hervor, die nach entsprechender Verstärkung von dem

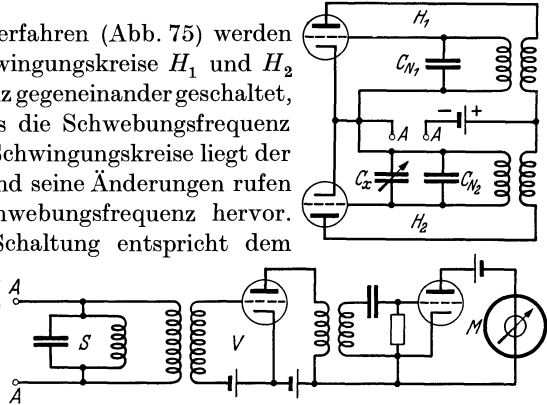


Abb. 75. Kapazitätsmessung nach dem Schwebungsverfahren.  $H_1, H_2$  Hochfrequenzschwingkreise;  $C_{N1}, C_{N2}$  Abstimmkondensatoren;  $C_x$  kapazitiver Geber;  $A \dots A$  Anschluß für den Meßkreis nach dem Verfahren der halben Resonanzkurve;  $S$  niederfrequenter Schwingkreis;  $V$  Verstärker;  $M$  Anzeigeelement.

Meßgebers  $C_x$  auf der halben Höhe der Resonanzkurve liegt. Jede Änderung von  $C_x$  und die entsprechende Änderung der Schwebungsfrequenz ruft nun am Schwingungskreis  $S$  eine proportionale Spannungsänderung hervor, die nach entsprechender Verstärkung von dem

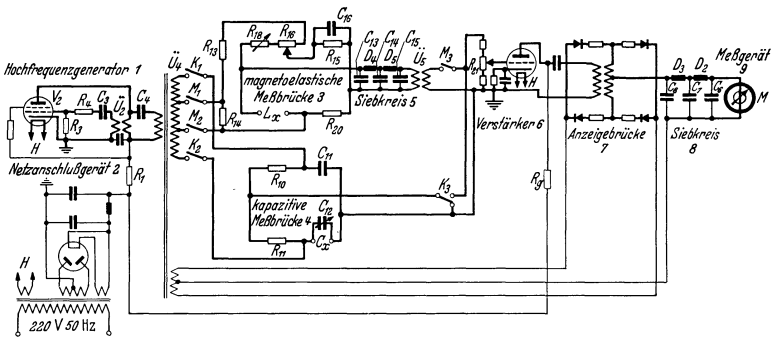


Abb. 76. Schaltung des Kraftverlaufmessers von Siemens & Halske AG.

1 Hochfrequenzgenerator; 2 Netzanschlußgerät; 3 magnetoelastische Meßbrücke; 4 kapazitive Meßbrücke; 5 Siebkreis; 6 Verstärker; 7 Anzeigebrücke; 8 Siebkreis; 9 Meßgerät.

Meßgerät  $M$  angezeigt wird. In der Schaltung von HUTH-KÜHN wird der kapazitive Geber in den Anodenkreis gelegt und die Veränderung des Gitterstromes abhängig von der Größe der Rückkopplung als Maß für die Kapazität  $C_x$  genommen. Abb. 76 zeigt die Schaltung des Kraftverlaufmessers von Siemens & Halske, eines Netzanschlußgerätes, mit

dem der zeitliche Verlauf mechanischer Vorgänge bis zu Frequenzen von 1200 Hz mit einer Trägerfrequenz von 5000 Hz angezeigt, aufgezeichnet oder oszillographiert werden kann. Das Gerät kann wahlweise mit magnetoelastischen oder kapazitiven Gebern betrieben werden und enthält zu diesem Zweck zwei getrennte Meßbrücken, ferner ein Netzanschlußgerät, einen 5 kHz-Einröhrengenerator, einen Einrohrverstärker und eine Anzeigebrücke mit gesteuerten Trockengleichrichtern. Der rückgekoppelte Hochfrequenzgenerator besteht aus dem Rohr  $V_2$  und dem Schwingungskreis  $\dot{U}_2$  und  $C_4$ ; seine Leistung wird über den Übertrager  $\dot{U}_4$  auf die Meßbrücken übertragen. Die kapazitive Meßbrücke baut sich aus dem kapazitiven Geber  $C_x$  und dem parallel dazu liegenden Abstimmkondensator  $C_{12}$ , dem Vergleichskondensator  $C_{11}$  und den Widerständen  $R_{10}$  und  $R_{11}$  auf. Die magnetoelastische Meßbrücke besteht aus dem induktiven Geber  $L_x$  und den Widerständen  $R_{15, 16, 18, 20}$ . Der Verlustwinkel des magnetoelastischen Gebers wird mit dem Kondensator  $C_{16}$  kompensiert. Am Brückenausgang liegt eine Siebkette aus den Drosseln  $D_4$  und  $D_5$  und den Kondensatoren  $C_{13 \dots 15}$  zur Reinigung der durch die Meßdose verzerrten Kurve von der dritten Oberwelle. Die Diagonalspannung der Brücke, deren Amplitude proportional der Meßgröße ist, wird auf einen Einrohrverstärker gegeben, der eine Gleichrichter-Anzeigebrücke speist. Mit dem Widerstand  $R_{21}$  kann die Empfindlichkeit eingestellt werden. Die Gleichrichter werden von dem Übertrager  $\dot{U}_4$  mit einer konstanten und synchronen Spannung gesteuert, arbeiten also phasenabhängig. An der Diagonale der Gleichrichterbrücke liegt über einen Siebkreis mit der Grenzfrequenz 3 kHz als Anzeigeelement im allgemeinen ein Oszillograph. Das Gerät enthält außerdem noch Kontroll- und Eicheinrichtungen und wird wegen seiner starken Spannungsabhängigkeit zweckmäßig über einen Konstanthalter betrieben.

### 5. Induktive Sender [24].

Die Induktivität eines kreisförmigen, gleichförmig gewickelten Solenoids von  $l$  cm mittlerer Länge und  $q$  cm<sup>2</sup> Querschnitt ist

$$L = \frac{0,4 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot q}{l} \cdot 10^{-8} \text{ Hy}, \quad (92)$$

und die Möglichkeiten der Induktivitätsänderung sind zunächst in einer Änderung der mechanischen Abmessungen, Querschnitt, Länge und Windungszahl zu suchen. Ein viel bequemerer Mittel ist jedoch das Einbringen eines Eisenkerns von der Permeabilität  $\mu$ . Die Induktivität des eisengeschlossenen Solenoids ist nämlich  $L' = \mu \cdot L$ . Durch Wahl der Größe, Form und Stellung des Eisenkerns hat man es in der Hand, alle Werte von  $L$  bis  $L'$  zu durchlaufen.

Induktiver Sender mit veränderbarer Windungszahl. Der Sender besteht aus einer eisengeschlossenen Ringspule mit Grob- und

Feineinstellung nach Abb. 77. Die Feinreglerspannung wird zu der des Grobreglers über einen Wandler mit dem Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  addiert, so daß bei einer Grobstufenspannung von  $a\%$  die Stufenspannung des Feinreglers  $a/\ddot{u}\%$  wird (Abb. 78). Die Anordnung kann auch

so getroffen werden, daß einer vollen Umdrehung des Feinabgriffs eine Grobstufe entspricht und nach jeder Umdrehung des Feinreglers der Grobregler um eine Stufe weitergeschaltet wird. Eine besonders einfache Feinregelung wird erreicht, wenn man einige Windungen des Grobreglers durch ein Widerstandsband überbrückt,

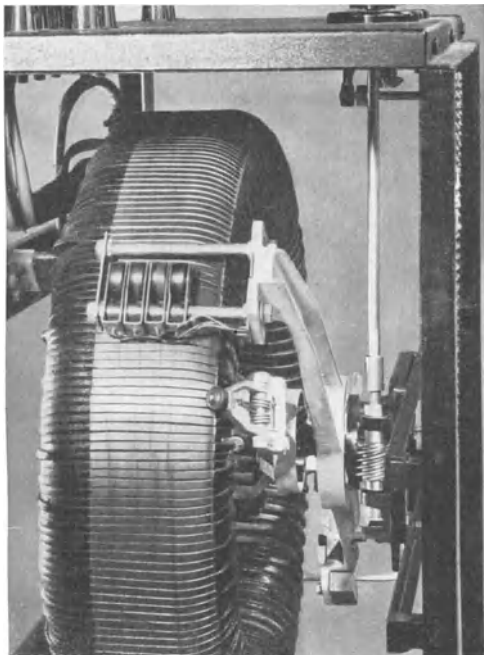


Abb. 77.

Abb. 77. Induktiver Geber mit veränderbarer Windungszahl.

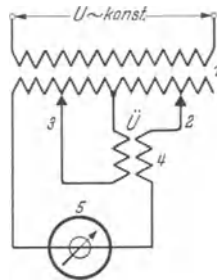


Abb. 78.

Abb. 78. Schaltung eines induktiven Gebers mit veränderbarer Windungszahl sowie Grob- und Feineinstellung.

1 Drehregler; 2 Grobabgriff; 3 Feinabgriff; 4 Wandler; 5 Anzeigeinstrument.

an dem die feingeregelte Spannung mit einer Schleifbürste abgegriffen wird. Das Verfahren wird besonders zur Stellungsanzeige verwendet.

Induktiver Sender mit verschiebbarem Eisenkern. Der Sender besteht aus einer eisenlosen Spule, in die von der zu messenden mechanischen Größe ein Eisenkern eingebracht wird. Abb. 79 zeigt als Beispiel den Verlauf des Blind- und des Scheinwiderstandes einer zylindrischen Spule, abhängig vom Weg eines gleichfalls zylindrischen Eisenkerns durch die Spule. Die Widerstandsänderung kann in einer Wechselstrombrücke nach Abb. 80 gemessen werden. Als Anzeigeinstrument ist dabei ein dynamometrisches Doppelpul-Meßgerät vorgesehen, dessen Anzeige in weiten Grenzen unabhängig von Spannungsänderungen ist. Über dem Schaltbild ist gleichzeitig der Stromverlauf im Diagonalzweig

aufgetragen, aus dem die Notwendigkeit hervorgeht, den Hub des Eisenkerns zu begrenzen, da sonst Doppeldeutigkeit entsteht. An Stelle des Dynamometers kann natürlich ein beliebiges anderes Instrument, etwa ein Gleichrichter-Kreuzspul-Instrument oder ein Gleichrichter-Drehspul-Instrument treten. Im letzteren Fall ist die Meßbrücke über eine Konstanthaltung zu betreiben. Geber dieser Art dienen ebenfalls vorwiegend der Stellungsanzeige.

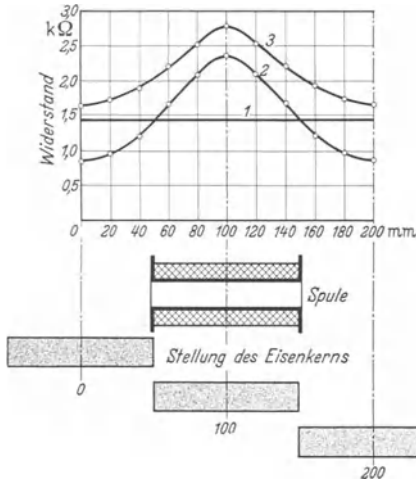


Abb. 79. Änderung des Widerstandes einer eisenlosen Spule beim Durchwandern eines zylindrischen Eisenkerns.

1 Wirkwiderstand; 2 Blindwiderstand;  
3 Scheinwiderstand.

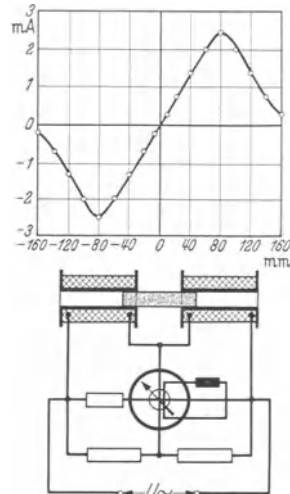


Abb. 80. Schaltung einer induktiven Wechselstrombrücke mit dynamometrischem Doppelspul - Anzeigeelement und Stromverlauf im Brückenast, abhängig von der Stellung des Eisenkerns.

Induktiver Geber mit veränderbarem Luftspalt. Als Sender dient eine eisengeschlossene Drossel mit veränderbarem Luftspalt  $\delta$ , deren Induktivität  $L/w^2$  durch eine Gleichung von der Form

$$L = K_1 + \frac{K_2}{\delta + K_3} \quad (93)$$

dargestellt werden kann und deren Luftspalt von der mechanischen Größe entweder unmittelbar oder durch Einbringen eines Eisenkerns mittelbar verändert wird. Die Form des Luftspalts oder des Eisenkerns gibt die Möglichkeit, den Verlauf der Induktivitätsänderung beliebig zu gestalten. In der Ausführung nach Abb. 81 wird von der mechanischen Größe eine Eisenzunge zwischen 2 Spulen so verstellt, daß sich der Abstand von der einen Spule verringert, der von der anderen gleichzeitig vergrößert.

Messung der Induktivitätsänderung. Die folgenden Bilder zeigen einige der ausgeführten Meßschaltungen. Abb. 82 ist eine Gleichrichter-Differenzschaltung. Vom Wandler  $T$  wird über einen Empfind-

lichkeitsregler  $R$  eine Wechselstrombrücke aus 4 Induktivitäten  $C_1, C_2, D_1, D_2$  gespeist. Bei der Verstellung des Eisenkerns im Luftspalt zwischen

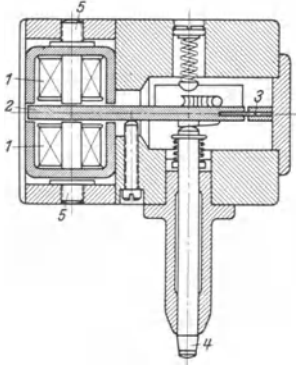


Abb. 81.  
 Tastkopf eines induktiven Mikrometers.  
 1 Meßspulen; 2 bewegliche Eisenzunge;  
 3 Einspannung der Eisenzunge; 4 Tastbolzen;  
 5 Nullstellungsschrauben.

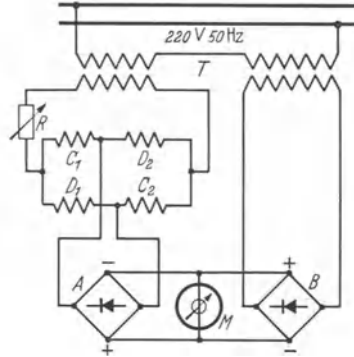


Abb. 82. Anordnung eines induktiven Mikrometers mit Gleichrichter-Differenzschaltung.  
 T Netzanschlußwandler; R Empfindlichkeitsregler;  $C_1, C_2, D_1, D_2$  Wechselstrom-Meßbrücke; A, B Gleichrichter in Graetz-Schaltung; M Anzeigeeinstrument.

den 4 Geberspulen nimmt die Induktivität zweier Spulen zu, die der beiden anderen gleichzeitig ab. Die Spulen liegen über Kreuz in der Brücke, so daß sich ihre Wirkungen unterstützen. Im Diagonalzweig der Brücke liegt ein Gleichrichter in Graetz-Schaltung. An eine Hilfswicklung des Wandlers  $T$  ist ein zweiter Gleichrichter angeschlossen, der einen Vorstrom durch den ersten Gleichrichter schiebt, um den Schwellenwert des Gleichrichters zu überwinden und den Gleichrichter auf seine günstigste Empfindlichkeit auszusteuern. Der Nullpunkt des Anzeigeeinstruments  $M$  liegt in der Mitte und Nullanzeige bedeutet Gleichheit der beiden Gleichrichterströme, die bei einer bestimmten Brückenverstimung eintritt. Die Brücke arbeitet also unsymmetrisch, wodurch trotz der Gleichrichtung ein eindeutiger Ausschlag gewährleistet ist.

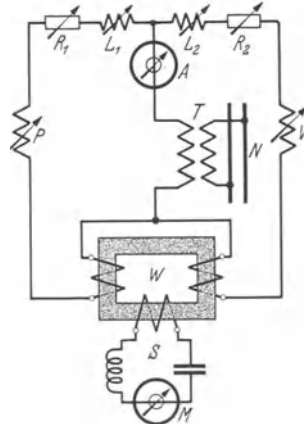


Abb. 83. Schaltung eines induktiven Gebers mit Differenzwandler.  
 N Mittelfrequenznetz; T Netzanschlußwandler; A Strommesser für die Gesamtstromaufnahme;  $R_1, L_1, R_2, L_2$  Abgleichwiderstände und Induktivitäten für beide Zweige; P induktiver Sender; V einstellbare Vergleichsinduktivität; W Differenzwandler; S Sperrkreis für die Netzfrequenz; M Anzeigegerät.

Abb. 83 zeigt die Schaltung eines induktiven Gebers mit Differenzwandler. Von einer Mittelfrequenzstromquelle  $N$  wird über den Netz-

anschlußwandler  $T$  eine Brückenschaltung gespeist, in deren einem Zweig der induktive Sender  $P$ , in deren anderem Zweig eine einstellbare Vergleichsinduktivität  $V$  liegt. Die Justierung beider Zweige erfolgt mit den Abgleichgliedern  $R_1, R_2, L_1, L_2$ . In der dritten Wicklung des

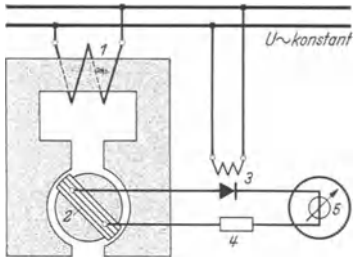


Abb. 84. Schaltung eines eisengeschlossenen Dynamometers als induktiver Sender mit veränderbarer Kopplung.

1 Erregerspule; 2 mechanisch verstellte Drehspule; 3 gesteuerter Gleichrichter; 4 Vorwiderstand; 5 Drehspul-Anzeigeelement.

Differenzwandler  $W$  wird vom Differenzfluß eine der Meßgröße proportionale Spannung induziert und von dem Oszillographen  $M$  angezeigt. Eine etwaige Phasenverschiebung zwischen den Strömen der Differenzspulen spielt keine Rolle, da sie auch bei der Eichung vorhanden ist, ebenso sind Frequenzschwankungen von  $\pm 10\%$  ohne Einfluß auf die Anzeige. Voraussetzung sind jedoch gleiche magnetische Eigenschaften von Prüf- und Vergleichsinduktivität, während eine ungleichmäßige Erwärmung durch die Abgleichglieder  $R_1, R_2$  ausgeglichen werden kann.

Die induktiven Geber mit veränderbarem Luftspalt gestatten, Luftspaltänderungen von  $1 \cdot 10^{-3}$  mm zu messen und werden vorwiegend als elektrische Lehren, Dehnungs- und Erschütterungsmesser angewendet.

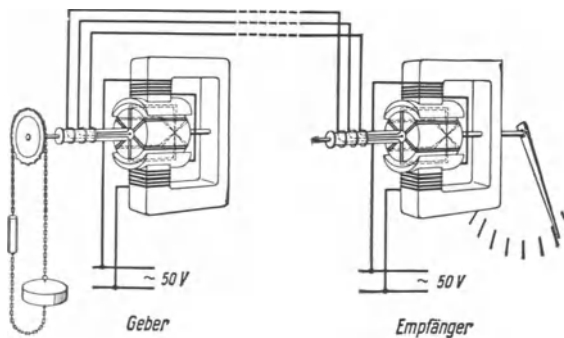


Abb. 85. Stellungsanzeige nach dem Drehfeldsystem.  
(Aus Siemens & Halske-Druckschrift S. H. 7132, 1. 8. 38 Cal.)

Änderung der gegenseitigen Induktion. Eine weitere Art induktiver Sender beruht auf der Änderung der gegenseitigen Induktion zweier Spulen durch Änderung ihrer Lage oder der Lage eines Schirmbleches. Eine bekannte Ausführungsform besteht aus einem eisengeschlossenen Dynamometer, dessen Feldwicklung am Wechselstromnetz liegt und dessen Drehspule von der mechanischen Größe verstell wird. Die in der Drehspule induzierte Spannung wird mit einem Gleichrichter-Instrument gemessen (Abb. 84). Das am weitesten verbreitete Verfahren

mit induktivem Geber aber ist das Drehfeldverfahren, von Siemens & Halske als S-System, in den englisch sprechenden Ländern als Selsyn-Verfahren bezeichnet (Self-synchronous oder self-synchronizing). Es benutzt als Geber und Empfänger gleichartige Induktionsapparate mit einphasiger synchron erregter Primär- und dreiphasiger Sekundärwicklung; wobei es unerheblich ist, ob die dreiphasige Wicklung auf Ständer oder Läufer untergebracht ist. Ein solches aus Geber und einem oder mehreren Empfängern bestehendes System ist im Gleichgewicht, wenn die induzierten Spannungen in allen Systemen gleich groß sind. Wird der Läufer des Gebersystems mechanisch verstellt, so treten Ausgleichströme auf und erzeugen im Empfänger ein Drehmoment, das ihn in dieselbe Lage zu bringen versucht und beim Erreichen dieser Lage verschwindet. Das System synchronisiert sich selbst, d. h. Geber und Empfänger stellen sich nach vorübergehender Stromunterbrechung wieder auf die gleiche Lage ein. Ein einfaches Ausführungsbeispiel zeigt Abb. 85. Die Genauigkeit der Einstellung hängt von der Belastung des Empfängers ab; sie beträgt bei normalen Empfängern etwa  $0,5^\circ$ . Eine Steigerung der Meßgenauigkeit ist ohne weiteres dadurch möglich, daß man dem Gesamt-Meßbereich mehrere Ankerumdrehungen zuordnet und eine Grob- und Feinanzeige vornimmt. Das Verfahren wird vorwiegend zur Stellungsanzeige verwendet.

## C. Meßverfahren.

### I. Wegmessung.

#### 1. Stellungsanzeige [25].

Die augenblickliche Lage beweglicher Teile, also die Stellung von Ventilen, Rudern, Reglern, Schleusentoren, Dreh- oder Hebebrücken, Schwimmern u. dgl., kann mit allen Arten von Sendern übertragen werden, mit denen eine Beeinflussung elektrischer Stromkreise möglich ist. Die Wegmessung soll kraftlos erfolgen, d. h. die Energie für die Bewegung des Meßsenders soll klein sein gegenüber der für den Bewegungsvorgang selbst erforderlichen Kraft, da sonst eine Beeinflussung des Bewegungsablaufs durch den Meßsender eintritt. Für eine verzerrungsfreie Übertragung des Bewegungsvorganges ist ferner schnelle und schwingungsfreie Einstellung des Geberorgans erforderlich. Linearer Zusammenhang zwischen der Bewegung des Gebers und der Änderung der elektrischen Größe ermöglicht eine bequeme Ablesung und leichte Ausführung von Rechenoperationen. Die meist großen Wege der bewegten Teile sollen dabei häufig viel genauer angezeigt werden, als der normalen Anzeigetoleranz elektrischer Meßgeräte entspricht, und es wird deshalb notwendig, den Meßbereich zu unterteilen oder eine Grob- und Feinanzeige vorzunehmen. Für die Grob- und Feinanzeige werden etwa



drei im Verhältnis 1:10:100 angetriebene Geber und drei Empfänger verwendet, so daß das Feinanzeigergerät seine volle Skala bestreicht, wenn das mittlere 10% und der Grobzeiger nur 1% seiner Skalenlänge durchläuft. Auch mit einem Geber kann man Grob- und Feinanzeige erreichen, wenn man ihn beispielsweise mehrere Umdrehungen ausführen läßt und

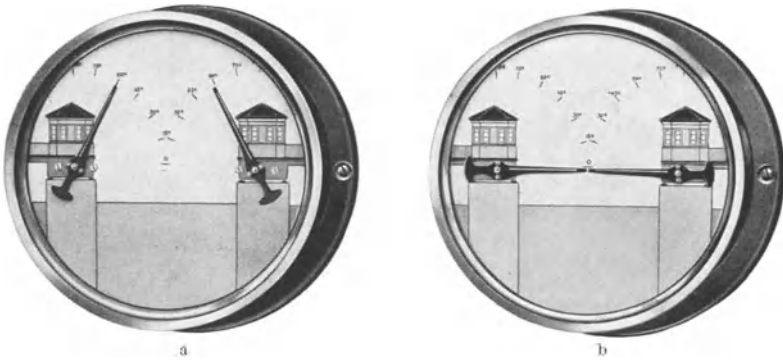


Abb. 86 a und b. Stellscheiber für eine Klappbrücke. a geöffnet; b geschlossen. (Aus Siemens & Halske-Druckschrift S. H. 2971.)

nach jeder Umdrehung einen Stufenschalter um eine Grobstufe weiterdreht. Die Anzeige kann an 2 Meßgeräten, einem Meßgerät mit Grob- und Feinanzeiger oder einem Meßgerät mit Feinanzeiger und Zählwerk

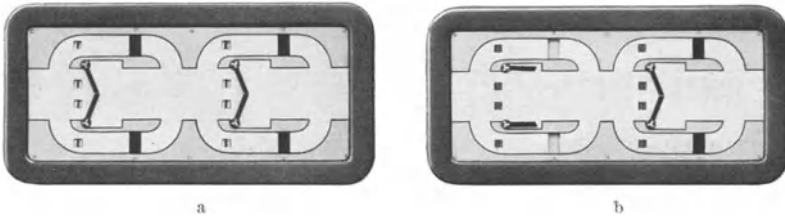


Abb. 87 a und b. Schleusenanzeiger. a Stromlos, Schütze und Stemmtoore geschlossen; b Schütze und Stemmtoore der linken Seite geöffnet. (Aus Siemens & Halske-Druckschrift S. H. 2971.)

erfolgen. Der Stufenschalter beim Sender kann gesparrt werden, wenn man das Meßgerät selbst mit Grenzkontakten ausrüstet und beim jedesmaligen Erreichen des oberen oder unteren Meßbereich-Endwertes das Zählwerk um eine Grobstufe vor- oder zurückschaltet. Um die Anzeige recht sinnfällig zu machen, erhalten die Skalen der Anzeigeegeräte zuweilen bildliche Darstellungen, wie es in Abb. 86 an einem Beispiel gezeigt ist. Zur Überwachung mehrerer zusammenhängender Bewegungen werden ferner zuweilen mehrere Meßwerke in annähernd richtiger räumlicher Lage in einem gemeinsamen Gehäuse zu einem Schaubild vereinigt (Abb. 87).

Schraubenlagenzeiger. Bei Mehrschraubenantrieben ist es zur Vermeidung von Schwingungserscheinungen wünschenswert, außer dem Gleichlauf der Antriebswellen auch eine bestimmte gegenseitige Lage der Propellerblätter einzuhalten. Zur Messung der Propellerlage werden mit

beiden Wellen kleine Drehstromgeneratoren gekuppelt, deren Ständer vom gleichen Netz erregt und deren Läufer von den Propellerwellen entgegen dem Drehfeld angetrieben werden. Die Phasenanlage der Läuferspannungen ist ein Maß für die gegenseitige Lage der

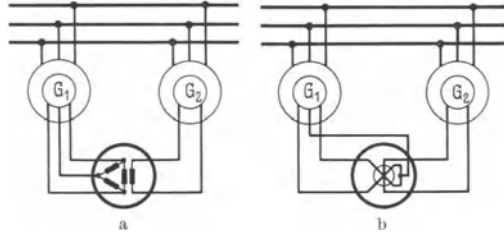


Abb. 88 a und b. Schraubenlagen-Anzeige.  
a Mit Synchronoskop als Anzeigesystem;  
b mit Leistungsfaktormesser als Anzeigesystem.

Propeller; sie wird mit einem dynamometrischen Meßwerk nach Art eines Synchronoskops oder eines Leistungsfaktormessers ermittelt (Abb. 88). Ist die Propellerdrehzahl  $n_s$  und soll bei einem Propeller mit  $k$ -Flügeln die

gegenseitige Verdrehung der Propeller um  $(360^\circ/k)$  dem vollen Meßbereich des Anzeigeapparates entsprechen, so ist der Geberdrehzahl  $n = k \cdot n_s$  zu wählen. Die Ausführung des Anzeige-Instruments zeigt Abb. 89. Wenn der Anbau von Generatoren nicht möglich ist, kann der Gleichlauf zweier Wellen und ihre gegenseitige Winkelverdrehung auch mit einem Kontaktverfahren mit mechanischer oder lichtelektrischer Impulsgebung nach Abb. 90 gemessen werden. Von der Gleichspannungsquelle  $U$  fließt der Strom abwechselnd über die beiden Ionen-

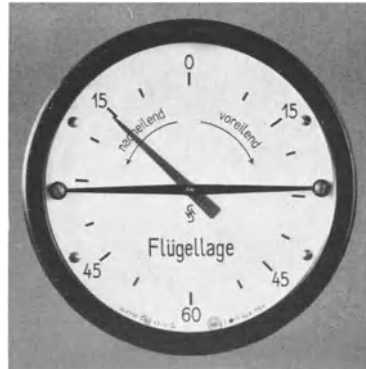


Abb. 89. Schraubenlagenzeiger für Schiffe (Ausführung Siemens & Halske A.G.).

rohre  $T_1$  und  $T_2$  und die Umschaltung erfolgt durch Gittersteuerung mittels der auf den Wellen angebrachten Schalter  $S_1$ ,  $S_2$ . Der Strom fließe zunächst über das Rohr  $T_1$ , das andere  $T_2$  sei gesperrt, dann lädt sich der Kondensator  $C$  in der in Abb. 90 angegebenen Weise auf. Wird nun mit dem Schalter  $S_2$  ein positiver Gitterspannungsstoß auf  $T_2$  gegeben, so zündet dieses Rohr, der Kondensator  $C$  wird umgeladen und löscht dabei das Rohr  $T_1$ . Werden nun die Kontakte  $S_1$  und  $S_2$  so gesteuert, daß beide Röhren gleich lang brennen, so hat man einen symmetrisch arbeitenden Wechselrichter und am Löschkondensator  $C$  liegt eine reine Wechselspannung. Das Drehspul-Meßgerät  $A$  zeigt demgemäß keinen Ausschlag. Verdrehen

sich aber die beiden Wellen oder Wellenquerschnitte gegeneinander, so erfolgt die Wechselrichtung unsymmetrisch, und es tritt ein der Verdrehung proportionaler Gleichspannungsanteil  $u_g$  am Kondensator auf, der mit dem Drehspul-Instrument  $A$  gemessen wird. Bezeichnet  $z$  die Zahl der Kontaktstücke auf beiden Wellen,  $\alpha$  den Verdrehungswinkel,  $R_0$  den Gesamtwiderstand des Meßkreises, bestehend aus dem Instrumentenwiderstand und den Vorwiderständen  $R'$ ,  $U_1 = U - U_2$  die Gesamtspannung  $U$ , vermindert um den konstanten Spannungsabfall  $U_2$  der Ionenröhren, so wird

$$u_g = \alpha \cdot \frac{z}{\pi} \cdot \frac{R_0}{R + R_0} \cdot U_1 = \alpha \cdot K \cdot U_1. \quad (94)$$

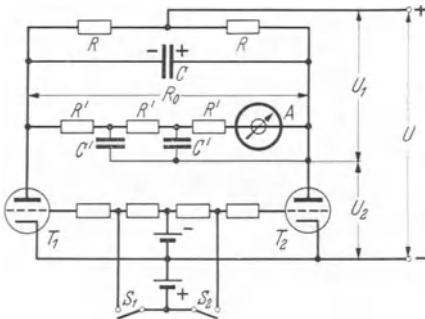


Abb. 90. Meßeinrichtung für die Messung kleiner Winkel an umlaufenden Wellen.

$U$  Gesamtspannung;  $U_1$  Meßspannung;  $U_2$  Spannungsabfall an den Stromtoren;  $A$  Anzeigeelement;  $C$  Meßkondensator;  $R$  Vorwiderstände;  $R', C'$  Glättungskreis;  $S$  Wellenschalter;  $T$  Stromtore.

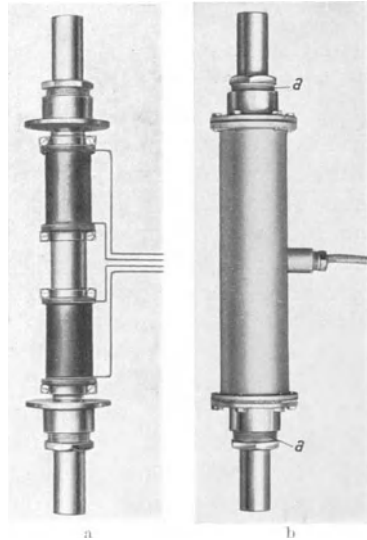


Abb. 91 a und b.  
Induktiver Wasserstandgeber für hohe Drücke und kleinen Meßbereich in geöffnetem und geschlossenem Zustand. [Aus Siemens-Z. Bd. 7 (1927) S. 495.]

Die Anzeige des Drehspul-Instruments ist direkt proportional dem Verdrehungswinkel und unabhängig von der Drehzahl. Der Wechselstromanteil der Kondensatorspannung wird durch den aus den Widerständen  $R'$  und den Kondensatoren  $C'$  bestehenden Kettenleiter vom Instrument ferngehalten. Die Einrichtung eignet sich zur Überwachung des Gleichlaufs von Wellen, zur Untersuchung von Pendelerscheinungen und zur Verdrehungsmessung. Ihre Empfindlichkeit läßt sich durch Vermehrung der Kontaktzahl  $z$  nahezu beliebig steigern.

Flüssigkeitsstandmessung. Die Anzeige des Flüssigkeitsstandes mittels eines Schwimmers entspricht der gewöhnlichen Stellungsanzeige und kann mit allen Geberarten durchgeführt werden. Als Beispiel ist in Abb. 91 ein induktiver Geber für Hochdruckkessel gezeigt. Die zylindrischen Geberspulen sitzen in einem dem Meßbereich entsprechenden Abstand auf einem starkwandigen Bronzerohr, innerhalb dessen der ebenfalls zylindrische Eisenkern vom Schwimmer verstellt wird,

sofern man es nicht vorzieht, ihn unmittelbar auf einer Quecksilbersäule schwimmen zu lassen. Die elektrische Einrichtung ist durch das Bronzerohr vom Flüssigkeitsbehälter völlig getrennt, und es sind keinerlei Dichtungen beweglicher Teile erforderlich. Für linearen Skalenverlauf sind Spulenlänge, Spulenabstand und Länge des Eisenkerns ungefähr gleich. Durch Änderung der Spulen- und Eisenkernlänge läßt sich der Meßbereich, durch Änderung des Spulenabstandes der Skalenverlauf verändern, ein Mittel, von dem zuweilen Gebrauch gemacht wird, wenn die normalen Spiegelschwankungen wenig interessieren, dagegen die

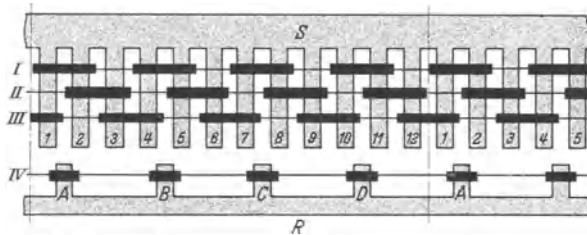


Abb. 92. Abwicklung eines Impulspfängers für Wasserstandfernübertragung. *S* 12poliger Ständer; *R* 4poliger Läufer; *I...III* Ständerwicklung; *IV* Läuferwicklung.

Grenz- oder Gefahrenwerte sehr genau erfaßt werden sollen. Der Eisenkern muß eine Hubbegrenzung erhalten, da beim völligen Durchschreiten einer Spule die Anzeige umkehrt. Die Schaltung der Einrichtung zeigt Abb. 80. Das Meßverfahren eignet sich besonders für Hochdruckbehälter und kleine Spiegelschwankungen; es gibt eine Genauigkeit von etwa  $\pm 1\%$  v. H.w. Große Pegelschwankungen an Stauseen, Flüssen und Gezeitenmeeren werden zweckmäßig mit Impulsverfahren übertragen, von denen eines nachstehend beschrieben ist: Ein Schwimmer überträgt die Flüssigkeitsstandschwankungen auf eine Nockenwelle, die bei einer Umdrehung  $2 \times 6$  verschiedene Kontaktschlüsse ausführt. Der Empfänger hat einen vierpoligen, dauernd eingeschalteten Läufer und einen zwölfpoligen Ständer mit drei um je  $\frac{1}{12}$  des Umfanges gegeneinander versetzten vierpoligen Wicklungen, die so angeordnet sind, daß je zwei nebeneinanderliegende Pole von einer gemeinsamen Erregerspule umfaßt werden (Abb. 92). Betrachten wir den Läuferpol *A*, so nimmt er während der 6 verschiedenen Schaltstellungen nacheinander folgende Lagen ein:

Schaltstellung	Eingeschaltete Wicklungen	Stellung des Läuferpols <i>A</i>
1	I	zwischen Pol 1 und 2
2	I + II	unter Pol 2
3	II	zwischen Pol 2 und 3
4	II + III	unter Pol 3
5	III	zwischen Pol 3 und 4
6	III + I	unter Pol 4
1	I	zwischen Pol 4 und 5
	usw.	

Der Läufer bewegt sich also bei jeder Schaltung um eine halbe Polteilung weiter und hat mit 24 Schritten eine Umdrehung vollendet. Durch

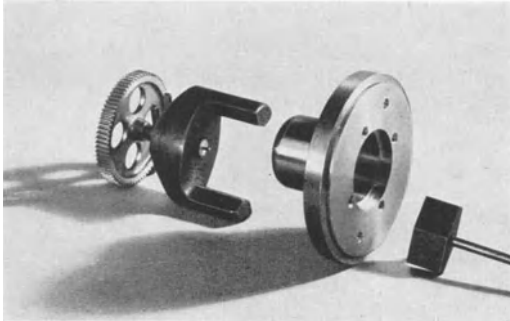


Abb. 93. Magnetkupplung des Schwimmerflüssigkeitstandmessers für Druckbehälter. Bauart Siemens & Halske AG. (Aus Arch. techn. Messen V 1123—4.)

Wahl der Übersetzung zwischen Schwimmer und Nockenrad hat man es in der Hand, die Anzeige beliebig feinstufig zu machen. Die Bewegung des Empfängers wird mit einer Bandkupplung auf die Schreibfeder übertragen, die den Schwimmerweg in rechtwinkligen Koordinaten aufzeichnet. Bei einer ausgeführten Anlage der Seewarte Hamburg entspricht  $\frac{1}{24}$  Umdrehung des Empfängers 0,2 mm Diagrammhöhe und 4 mm Wasserstandänderung. Auf dem Diagramm

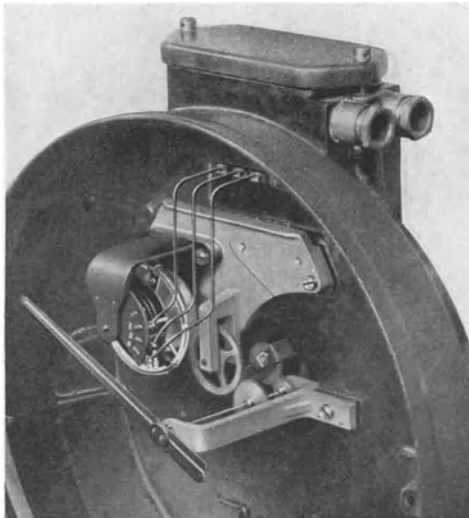


Abb. 94. Geöffnetes Anzeigeelement des Flüssigkeitstandmessers für Druckbehälter mit angebaute Ringrohrfernseher. Bauart Siemens & Halske AG. (Aus Arch. techn. Messen V 1123—4.)

kann eine Fahrplankurve vorgezeichnet sein, damit man sofort die Abweichungen vom Normalverlauf erkennt. Ferner kann mit der Anzeige eine Steuerung verbunden werden. Der Vorteil aller Impulsverfahren liegt in der Unabhängigkeit von Stromschwankungen und Isolationsfehlern. Die Anlage arbeitet richtig, solange der Strom überhaupt noch kräftig genug ist, um den Empfänger weiter zu schalten.

Beim Schwimmerverfahren für Druckbehälter der Siemens & Halske AG. wird die Bewegung der vom Schwimmer verdrehten Seiltrommel über eine magnetische Kupplung (Abb. 93) nach außen übertragen, so daß das Meßsystem nicht durch die Reibung einer druckdichten Durchführung belastet wird. Außerhalb des Druckraumes verdreht die Meßachse einen

Zeiger für die unmittelbare Anzeige, sowie einen Ringrohr-Widerstandsender für die Fernanzeige (Abb. 94).

Das kapazitive Verfahren ermöglicht eine schwimmerlose Wasserstandmessung und eignet sich überall da, wo jede Beeinflussung der Strömungsverhältnisse durch die Meßeinrichtung vermieden werden muß, beispielsweise bei Messungen in Modellgerinnen. Dabei werden die beiden fest miteinander verbundenen Elektroden  $P_1$  und  $P_g$  eines elektrostatischen Spannungsteilers über der Wasseroberfläche aufgehängt (Abb. 95)

während die dritte Elektrode  $P_2$  vom Wasserspiegel gebildet wird. Der Potentialunterschied zwischen der Mitte des Eingangswandlers und der Mittelelektrode des kapazitiven Spannungsteilers steuert das Gitter einer Pentode  $V_1$ . Mit der Hilfsplatte  $C$  wird die Spannungsteilung so eingestellt, daß die Kapazität zwischen  $P_2$  und  $P_g$  auch bei niedrigstem Wasserstand noch etwas größer ist als zwischen  $P_g$  und  $P_1$ . Mit steigendem Wasserspiegel steigt dann die Gitterspannung und der Anodengleichstrom nimmt ab. Die zweite Röhre  $V_2$  mit fester Gitterspannung vermindert den Spannungseinfluß und gestattet gleichzeitig die Unterdrückung des konstanten Anodengleichstromes. Durch Wahl der Widerstände  $r_b$ ,  $r_e$ , und  $r_m$  kann der Meßbereich des Anzeige-Instruments, durch den Widerstand  $R_3$  die Skalenmitte beliebig eingestellt werden. Der temperaturfreie Widerstand  $r_m$

dient außerdem der Verkleinerung des Temperatureinflusses. Das Verfahren eignet sich für kleine Spiegeländerungen und gibt bei einem Meßbereich von 50 mm eine Genauigkeit von 0,25...0,5%. Wegen der Röhrenalterung ist in Abständen von einigen Wochen eine Nacheichung vorzunehmen. Die Spannungen sind selbstverständlich konstant zu halten.

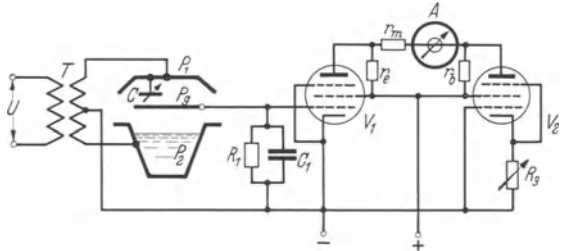


Abb. 95. Schaltung eines kapazitiven Wasserstandmessers für ein Versuchsgerinne.

$U$  Konstante Eingangsspannung;  $P_1, P_g, P_2$  kapazitiver Spannungsteiler;  $T$  Eingangswandler mit Mittenanzapfung;  $V_1$  Meßpentode;  $V_2$  Kompensationspentode;  $r_e, r_b$  Abgleichwiderstände;  $r_m$  Vorwiderstand;  $A$  Anzeigeinstrument.

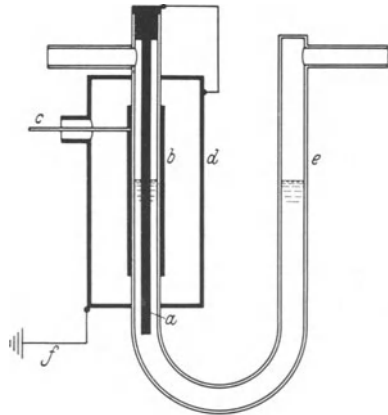


Abb. 96. Kapazitiver Geber zur Messung kleiner Spiegelschwankungen oder Druckunterschiede.

[Aus Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 900.]

$a$  innere Elektrode;  $b$  äußere Elektrode;  $c$  Zuleitung zum Verstärker;  $d$  Schirmelektrode;  $e$  Glasrohr;  $f$  Erdung.

Statt als Elektrode kann die Flüssigkeit auch als Dielektrikum eines kapazitiven Gebers nach Abb. 96 verwendet werden. Bei leitenden Flüssigkeiten sind die Kondensatorelektroden zu isolieren. Ferner kann die Standhöhe leitender Flüssigkeiten durch Kurzschließen eines Widerstandsenders gemessen werden. Bei bekanntem spezifischem Gewicht kann endlich die Flüssigkeitsstandmessung durch Einbau von Druckmeßdosen am Boden des Gefäßes auf eine Druckmessung zurückgeführt werden.

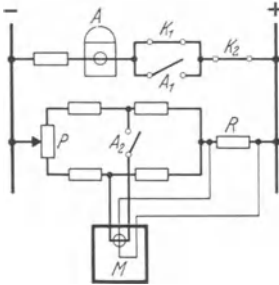


Abb. 97.

Schaltung des Seilrutschmessers.

$A$  Hilfsschütz;  $K_1$  Selbsthalteschalter;  $K_2$  lichtelektrischer Schachtschalter;  $A_1$  und  $A_2$  Einschalter des Schützes  $A$ ;  $P$  Potentiometer;  $R$  Nebenwiderstand für den Richtkreis des Kreuzspulschreibers;  $M$  Schreibgerät.

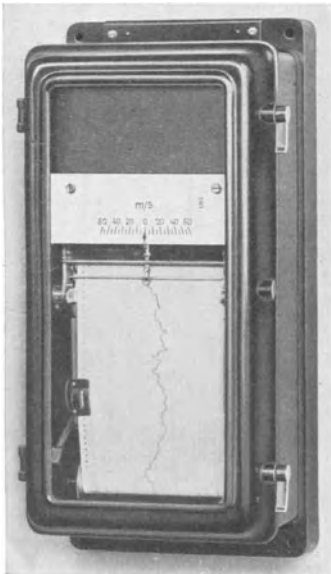


Abb. 98. Kreuzspulschreiber für Seilrutsch-Registrierung, Meßbereich  $\pm 60$  m (Ausführung Siemens & Halske AG.).

Bei leitenden Flüssigkeiten sind die Kondensatorelektroden zu isolieren. Ferner kann die Standhöhe leitender Flüssigkeiten durch Kurzschließen eines Widerstandsenders gemessen werden. Bei bekanntem spezifischem Gewicht kann endlich die Flüssigkeitsstandmessung durch Einbau von Druckmeßdosen am Boden des Gefäßes auf eine Druckmessung zurückgeführt werden.

Seilrutschmessung. Bei Fördermaschinen mit Koescheiben-Antrieb besteht infolge der Abnutzung des Koescheibenfutters und Rutschens des Seils auf der Scheibe kein fester Zusammenhang zwischen der Anzeige des vom Koescheiben-Antrieb betätigten Teufenzeigers und der wahren Stellung des Förderkorbes im Schacht, und die am Seil selbst angebrachten Marken können nur als Notbehelf angesehen werden. Es erscheint deshalb wünschenswert, dem Fördermaschinenisten einen Seilrutsch unmittelbar und so rechtzeitig anzuzeigen, daß er in der Lage ist, etwa mit einer zusätzlichen Seilbremse den Förderkorb in der richtigen Stellung zum Stillstand zu bringen. Eine derartige Einrichtung wurde von der Siemens & Halske AG. nach folgendem Grundgedanken entwickelt: Bei einer bestimmten Stellung  $a$  des Teufenzeigers wird ein Zeiger mit dem Teufenzeiger gekuppelt und bei einer bestimmten Stellung  $b$  des Förderkorbes wieder entkuppelt. Stimmt die wahre Stellung des Förderkorbes mit der vom Teufenzeiger angezeigten überein, so ist die vom Meßzeiger zurückgelegte Strecke  $c = b - a$  stets gleich groß, bei-

spielsweise 0 für  $b = a$ . Hat ein Seilrutsch stattgefunden, so wird an Stelle von  $c$  der Wert  $c_1$  angezeigt und die Differenz  $c_1 - c$  gibt den Seilrutsch unmittelbar an. Die Schaltung des Gerätes ist in Abb. 97 gezeigt. In der Ruhestellung sind die Schalter  $K_1$  und  $K_2$  geschlossen.

Erreicht der einstellbare Mitnehmer des Teufenzeigers die Stellung  $a$ , so öffnet er den Schalter  $K_1$  und beginnt, gleichzeitig das Brückenspannungsunabhängige Kreuzspul-Schreiber  $M$  zu verstellen. Der in der Brückendiagonale liegende Spannungsunabhängige Kreuzspul-Schreiber  $M$  beginnt, einen Querstrich über das Papier zu ziehen. Sobald der lichtelektrische Schachtschalter  $K_2$  durch den durchfahrenden Förderkorb vorübergehend geöffnet wird, fällt das Schütz  $A$  ab, die Schalter  $A_1$  und  $A_2$  öffnen sich und der Schreiber geht in seine Nullage zurück. Solange kein Seilrutsch eingetreten ist, haben die bei jeder Fahrt geschriebenen Querstriche

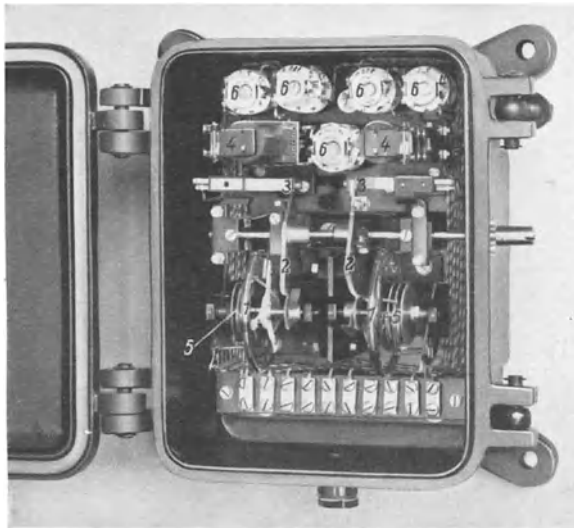


Abb. 99. Doppelgeber mit Potentiometer-Ringrohren für Seilrutsch-Registrierung.  
 1 Ringrohr; 2 Potentiometer-Antrieb; 3 Selbsthalteschalter  $K_1$ ; 4 Hilfsschütz  $A$ ; 5 Stromzuführung zum Ringrohr; 6 Vorwiderstände.

gleiche Länge, etwa bis zur Skalenmitte; eine Abweichung von dieser Normallänge bedeutet einen Seilrutsch in einer oder der anderen Richtung. Nach der Durchfahrt des Korbes schließt sich der Schalter  $K_2$  wieder, das Schütz  $A$  kann aber erst ansprechen, nachdem der Teufenzeiger bei der umgekehrten Fahrt wieder die Stellung  $a$  erreicht hat und den Schalter  $K_1$  schließt; damit ist der Anfangszustand wieder erreicht. Abb. 98 ist eine Ansicht des Schreibers, Abb. 99 ein geöffneter Doppelgeber mit Potentiometer-Ringrohren für 2 Schreibgeräte.

## 2. Elektrische Mikrometer [26].

Elektrische Lehren sind nach verschiedenen Geberverfahren arbeitende elektrische Mikrometer. Sie dienen vorwiegend der Kontrolle der Maßhaltigkeit von Massenerzeugnissen und können mit Regelorganen



unmittelbar in den Fabrikationsgang eingreifen; ferner werden sie zu Feinmessungen bei Forschungsarbeiten herangezogen.

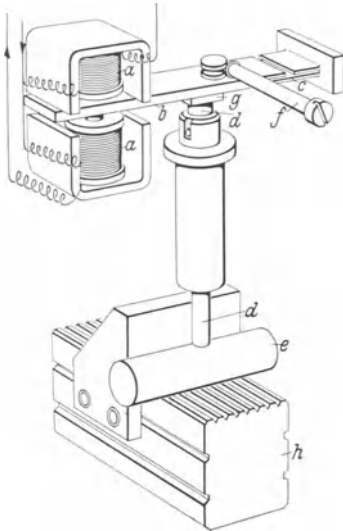


Abb. 100. Induktiver Mikrotaster.  
(Aus AEG-Mitt. 1937 S. 405.)

*a* Meßspulen; *b* Eisenanker; *c* Einspannfeder;  
*d* Taststift; *e* Werkstück; *f* Stellschraube;  
*g* Drehkeil; *h* Meßtisch.

Die grundsätzliche Anordnung eines induktiven Mikrometers mit einem im Luftspalt zwischen 2 Drosselspulen verstellbaren Eisenkern zeigt Abb. 100, die zugehörige Schaltung Abb. 101. Die Drosselspulen liegen in einer über einen Konstanthalter aus dem Wechsel-

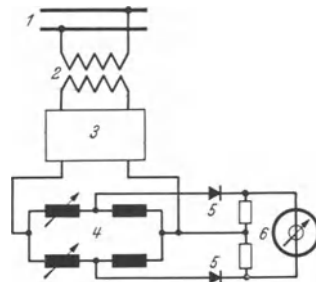


Abb. 101. Schaltung der induktiven Feinmeßlehre (Eltas-Lehre der AEG).

*1* Wechselstromnetz; *2* Netzanschlußwandler;  
*3* Konstanthalter; *4* Meßbrücke mit festen und veränderbaren Induktivitäten; *5* Gleichrichter;  
*6* Anzeiginstrument.

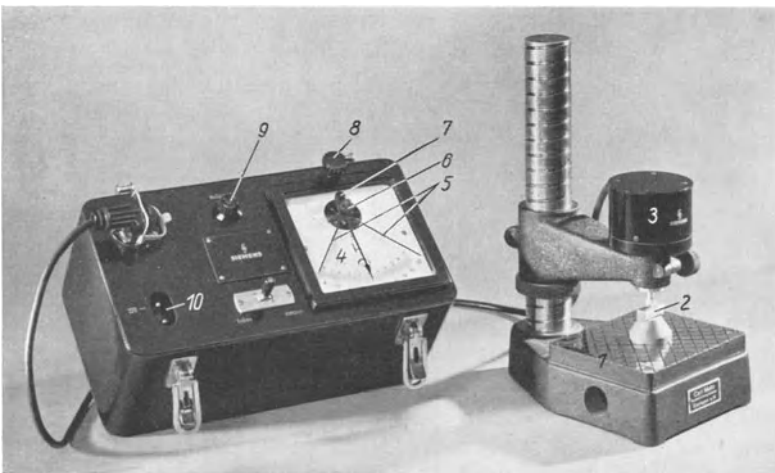


Abb. 102. Elektrische Lehre mit induktivem Geber (Ausführung Siemens & Halske AG).  
*1* Meßtisch, *2* Prüfkörper; *3* induktiver Geber; *4* Anzeiginstrument; *5* Grenzkontakte; *6* Einstellschraube für die Grenzkontakte; *7* Nullstellung des Anzeiginstrumentes; *8* Meßbereich-Umschalter; *9* Nulleinstellung des Gebers; *10* Netzanschlußstecker.

stromnetz gespeisten Brücke, deren Diagonale das Gleichrichter-Instrument enthält. Mit einer Einrichtung dieser Art konnte bei einem Meßbereich von  $\pm 50 \mu\text{m}$  mit einer Genauigkeit von  $\pm 1 \mu\text{m}$  gemessen werden. Der Spannungseinfluß betrug zwischen 200 und 240 V ebenfalls  $1 \mu\text{m}$  und der Frequenzeinfluß zwischen 45 und 55 Hz  $3 \mu\text{m}$  beim Nullpunkt und  $5 \mu\text{m}$  beim Meßbereich-Endwert. Die Nullpunktwanderung während der Messungen war  $\pm 1 \mu\text{m}$ ; der Nullpunkt kann elektrisch um  $\pm 20 \mu\text{m}$  verstellt werden. Der Taster legt sich mit einem Druck von 850 g auf das Werkstück und wird beim Unterlegen eines neuen Prüflings mit

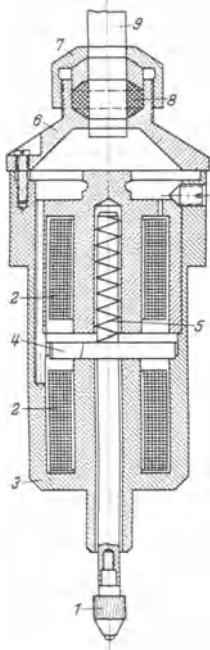


Abb. 103. Schnitt durch einen induktiven Feintaster (Ausführung Siemens & Halske AG.).  
 1 Taststift; 2 Drosselspule; 3 Eisenkörper; 4 beweglicher Eisenanker; 5 Druckfeder; 6 Gehäusekappe; 7 Verschlusschraube; 8 Dichtung; 9 Anschlußkabel.

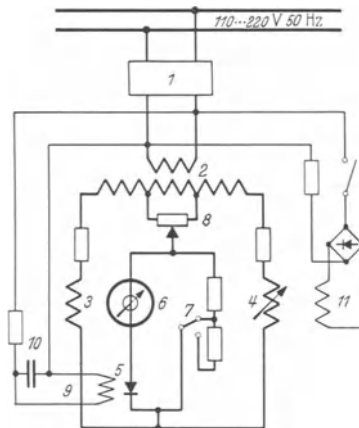


Abb. 104. Schaltung des induktiven Mikrometers der Siemens & Halske AG.  
 1 Spannungskonstanthalter; 2 Anschlußwandler; 3 Vergleichsdrossel; 4 Geberdrossel; 5 fremderregter Gleichrichter; 6 Anzeigeelement; 7 Meßbereichumschalter; 8 Nulleinstellung; 9 Gleichrichter-Erregung; 10 Phasenregler für die Gleichrichter-Erregung; 11 Hubmagnet.

einem Drahtauslöser mechanisch angehoben; gleichzeitig damit wird das Meßgerät kurzgeschlossen, um Prellschläge zu vermeiden.

Abb. 102 ist eine Ansicht einer anderen Ausführung mit den Meßbereichen  $\pm 10$  bzw.  $\pm 50 \mu\text{m}$  und einer Genauigkeit von  $\pm 1,5\%$  v. Hw. Der Taststift liegt bei diesem Gerät mit 250 g auf und kann durch einen Hubmagnet elektrisch angehoben werden. Das Gerät ist mit einem magnetischen Konstanthalter versehen, durch den Spannungsschwankungen soweit ausgeglichen werden, daß bei Spannungsänderungen von 110 auf 220 V nur Anzeigefehler von 5...7% der Anzeige auftreten. Den Geber dieses Gerätes zeigt Abb. 103; die zugehörige Schaltung ist in Abb. 104 dargestellt.

Die Meßbrücke wird über einen Konstanthalter 1 an das Wechselstromnetz angeschlossen; sie enthält eine Vergleichsinduktivität 3 und die mechanisch verstellte Meßdrossel 4, der Nullabgleich der Brücke erfolgt mit dem Potentiometer 8. In der Brückendiagonale liegt ein Drehspul-Instrument 6 über einen fremderregten Gleichrichter 5, dessen Erregung 9 mit Widerstand und Kondensator 10 auf die günstigste Phasenlage eingestellt ist. Mit dem Umschalter 7 kann der Meßbereich verändert werden. Der Hubmagnet 11 hebt den Taststift des Mikrometers beim Einlegen eines neuen Werkstückes an, gleichzeitig wird die Brücke abgeschaltet, um Beschädigungen des Anzeige-Instruments zu vermeiden. Die Ausbildung des Gebers für die Messung der Tiefe von Bohrungen, sowie das zugehörige Anzeige-Instrument zeigt Abb. 105.

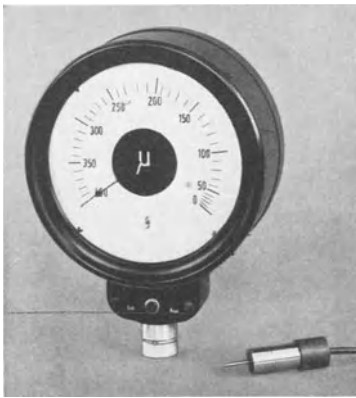


Abb. 105. Kreisskalen-Instrument mit induktivem Feintaster.

Die kapazitiven Mikrometer entsprechen in Schaltung und Aufbau völlig den induktiven Geräten, nur daß an Stelle des Ankers einer Drosselspule eine Kondensatorplatte verstellt wird. Ein mir bekannter Anwendungsfall ist die kapazitive Messung der Verschiebung von Mikrofonkontakten, durch die auf kapazitivem Weg die Frequenz eines Schwingungskreises beeinflußt und die Frequenzänderung gemessen wurde. Eine Verschiebung von  $1 \cdot 10^{-8}$  mm ergab einen Ausschlag des

Lichtzeiger-Instruments von 0,25 mm. Die Schaltung eines kapazitiven Mikrometers nach der Methode der halben Resonanzkurve in Verbindung mit einem Nullgalvanometer und einer automatischen Kompensationseinrichtung zeigt Abb. 106. Vom Hochfrequenzgenerator 1 werden in den Spulen  $L_1$  und  $L_2$  gleich große elektromotorische Kräfte induziert. Der aus  $L_2$ ,  $R_2$ ,  $C_2$  bestehende Schwingungskreis ist auf eine Frequenz etwas oberhalb der Generatorfrequenz abgestimmt, so daß man im annähernd linearen Teil der Resonanzkurve arbeitet. Ebenso wird der Kreis  $L_1$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ , dessen Kapazität sich aus dem Abgleichkondensator  $C'_1$ , dem kapazitiven Geber  $C''_1$  und dem Meßkondensator  $C'''_1$  zusammensetzt, mit  $C'_1$  abgeglichen. Die Spannungen an den Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  werden auf die Gitter zweier Verstärkerröhren gegeben, die mit den Widerständen  $R_3$  und  $R_4$  eine Wheatstone-Brücke bilden in deren Diagonalkreis das Nullgalvanometer 2 liegt. Werden infolge einer Kapazitätsänderung am kapazitiven Geber  $C''_1$  die beiden Gitterspannungen verschieden hoch, so tritt ein Ausgleichsstrom auf, das Galvanometer 2 schließt einen seiner Kontakte und der Umkehrmotor  $M$  wird von einem

der Schütze  $S_1$ ,  $S_2$  angeworfen. Der Motor verstellt den Meßkondensator  $C_1'''$ , solange bis Brückengleichgewicht herrscht. Der Weg, den der

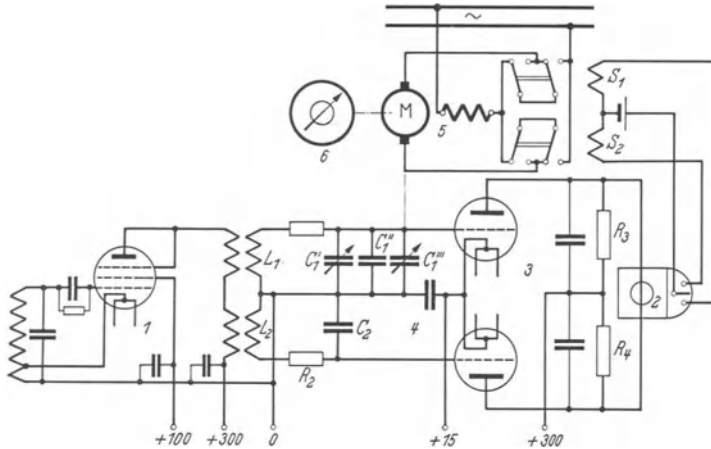


Abb. 106. Messung kleiner Kapazitätsänderungen mit Nullgalvanometer und Kompensograph.  
 1 Hochfrequenzgenerator; 2 Nullgalvanometer; 3 Röhrenbrücke; 4 Schwingungskreis;  
 5 Kompensationsmotor mit Umkehrschaltung; 6 Meßgerät.

Kondensator  $C_1'''$  dabei zurückgelegt hat, ist ein Maß für die Kapazitätsänderung des Gebers, also für die Schwankung der Meßgröße. Von dem

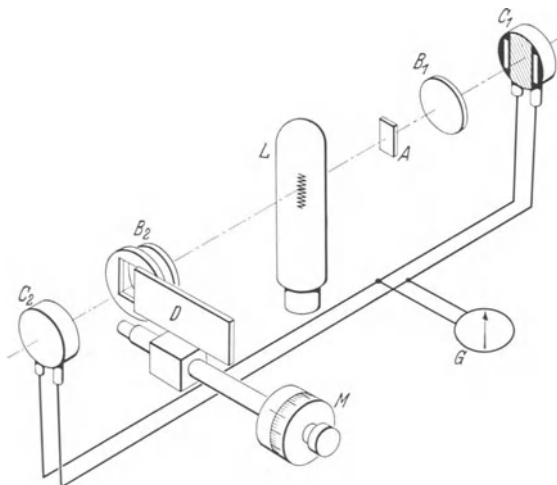


Abb. 107. Lichtelektrisches Mikrometer für Breitenmessung. [Aus Instruments, Pittsb. Pa. Bd. 12 (1939) S. 67—69.]  
 L Lichtquelle;  $B_1$ ,  $B_2$  Optik;  $C_1$ ,  $C_2$  Photozelle; A Prüfling; D Blende; M Mikrometerschraube.

Motor  $M$  wird außer dem Meßkondensator  $C_1'''$  ein Anzeige- oder Schreibgerät verstellt, wie es bei automatischen Kompensationsgeräten üblich

ist. Kleine Änderungen der Frequenz oder Spannung des Hochfrequenzgenerators beeinflussen die Messung ebensowenig wie Temperaturschwankungen, da sie auf beide Schwingungskreise gleichmäßig einwirken; dagegen gehen Änderungen der Röhrencharakteristik voll in die Messung ein.

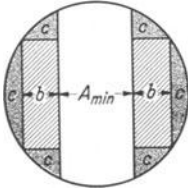


Abb. 108.  
Photozelle mit Maske  
für Breitenmessung.  
 $A_{min}$  Minimalbreite des  
zu messenden Gegen-  
standes;  $b$  Meßbereich;  
 $c$  Abdeckmaske.

Bei den *lichtelektrischen Mikrometern* wird entweder der zu messende Gegenstand unmittelbar durch Lichtstrahlen abgetastet und sein Schattenbild auf der lichtempfindlichen Zelle entworfen, wo es mit einem mechanisch oder optisch aufgebrauchten Normalbild verglichen wird, oder es wird eine im Strahlengang der lichtelektrischen Einrichtung liegende Blende oder ein Spiegel vom Meßobjekt mechanisch verstellbar. Eine Toleranzlehre der ersten Art besteht beispielsweise aus einer Lichtquelle  $L$ , von der aus über die Linsen  $B_1$  und  $B_2$  die Photozellen  $C_1$  und  $C_2$  ausgeleuchtet werden (Abb. 107). Auf der einen Seite wird der zu messende Gegenstand  $A$ , dessen Breite  $A_x$  gemessen werden soll, in den Strahlengang gebracht, auf der anderen Seite liegt eine durch die

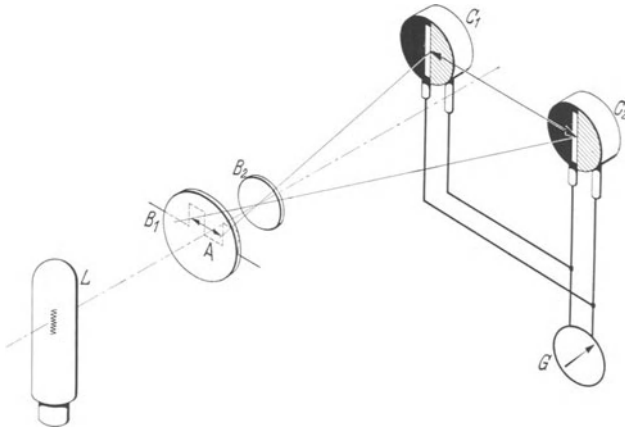


Abb. 109. Lichtelektrisches Mikrometer zur Kontrolle von Teilungen.

[Aus Instruments, Pittsb. Pa Bd. 12 (1939) S. 67—69.]

$L$  Lichtquelle;  $B_1$ ,  $B_2$  Optik;  $C_1$ ,  $C_2$  Photozellen;  $A$  Prüfling;  $G$  Galvanometer.

Mikrometerschraube  $M$  einstellbare Blende  $D$ . Die beiden Photozellen sind gegeneinandergeschaltet, mit einem Drehspul-Galvanometer  $G$  als Nullinstrument. Die Lichtquelle  $L$  ist selbstverständlich als symmetrisch vorausgesetzt. Um höchste Genauigkeit zu erreichen, werden auf die Photozellen Masken nach Abb. 108 aufgesetzt, so daß der innere Maskenrand der Mindestbreite des Gegenstandes  $A_{min}$ , die Breite der rechteckigen Ausschnitte  $b$  dem Meßbereich entspricht. Der Ausschlag

des Galvanometers bzw. beim Nullverfahren die Verstellung des Mikrometers ist dann eine lineare Funktion der Breiten-Abweichung  $\Delta A$  von der Normalbreite  $A_N$ . Vor Beginn der Messung wird ein Normal in den Strahlengang gebracht und die Blende  $D$  so verstellt, daß das Galvanometer 0 zeigt. Von dieser Nullstellung aus kann dann die Toleranz der gemessenen Gegenstände unmittelbar am Mikrometer oder am Ausschlag des Meßgerätes abgelesen werden. Voraussetzung für die Richtigkeit der Messung ist lineare und konstante Empfindlichkeit der Photozelle über die ganze Meßbreite  $b$ .

Soll statt der Breite eines Gegenstandes etwa die Genauigkeit des Abstandes zweier Teile, z. B. einer Zahnteilung, gemessen werden, so werden die beiden Photozellen so nebeneinander angeordnet, daß auf den Zellen zwei aufeinanderfolgende Zahnflanken abgebildet werden (Abb. 109). Die Nulleinstellung für die Normalteilung erfolgt durch Verschieben einer Zelle, die Einstellung auf gleiche Empfindlichkeit beider Zellen durch Vorsetzen von Filtern. Bei konstanter Zahnteilung sind die ausgeleuchteten Flächen auf beiden Zellen gleich groß und das Galvanometer zeigt Null. Teilungsfehler können durch Verschieben einer Zelle mittels eines Feintriebtes abgelesen werden, sofern man nicht den Ausschlag des Galvanometers zur Anzeige benutzen will. Bei einer ausgeführten Anlage mit  $400 \Omega$  Galvanometer-Widerstand gaben Änderungen der Zellenbeleuchtung um 1% einen Galvanometerstrom von  $0,2 \mu A$  und die Meßgenauigkeit betrug  $\pm 2,5 \mu m$ . Im allgemeinen Fall kann zur Überwachung eines Werkstückes eine seiner Form entsprechende Blende auf dem Werkstück selbst oder auf der Lichtzelle optisch abgebildet werden.

Abb. 110 zeigt eine Einrichtung zur Überwachung kleiner Bohrlöcher von 1 mm Dmr. auf zulässige Maßabweichungen von  $\pm 50 \mu m$ ; die Meßgenauigkeit beträgt  $\pm 5 \mu m$ . Die Einrichtung arbeitet mit einem Prüflichtweg und einem Vergleichslichtweg, die beide von einer Lochscheibe abwechselnd so unterbrochen werden, daß auf beiden Wegen die gleiche Lichtmenge auf die Photozelle fällt und diese gleichmäßig ausleuchtet. Nun wird in den Prüflichtweg ein Normal gebracht und

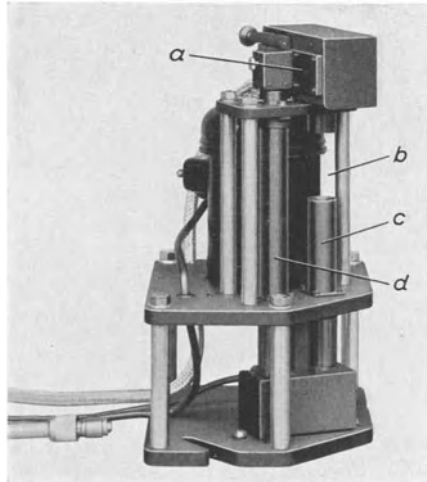


Abb. 110.  
Lichtelektrisches Bohrloch-Überwachungsgerät.  
[Aus Siemens-Z. Bd. 19 (1939) S. 284.]  
a Graukeil; b Raum für den Prüfling;  
c Prüf-Lichtweg; d Vergleichs-Lichtweg.

der Vergleichslichtweg mit einem Graukeil wieder auf gleiche Lichtmenge eingestellt, die Photozelle ist also wieder gleichmäßig ausgeleuchtet und gibt Gleichstrom ab. Weichen die Prüflinge jedoch vom Normal ab, so erhält die Photozelle eine ungleichmäßige Beleuchtung und liefert einen Wechselstrom, der ein Maß für die Größe der Abweichung ist und nach entsprechender Verstärkung angezeigt wird. Bei den Einrichtungen mit mechanisch verstelltem Spiegel liegt zwischen Lichtquelle und Spiegel einerseits, sowie zwischen Spiegel und Photozelle andererseits dasselbe Strichgitter aus abwechselnd lichtdurchlässigen und lichtundurchlässigen Streifen von etwa 0,5 mm Breite im Strahlen-gang. Von der Beleuchtungseinrichtung wird ein Bild des Gitters auf

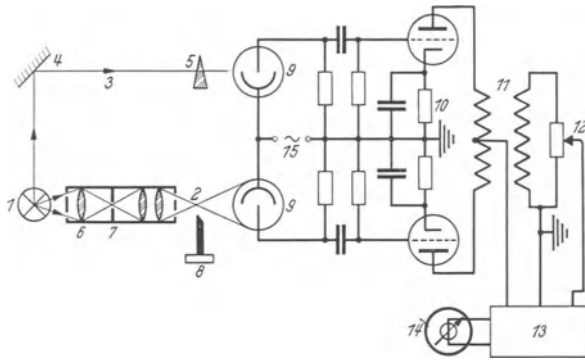


Abb. 111. Lichtelektrische Differenzschaltung mit Wechselstromspeisung.

1 Lichtquelle; 2 Prüf-Lichtweg; 3 Vergleichs-Lichtweg; 4 Umlenkprisma; 5 Graukeil; 6 Kondensator; 7 Spaltblende; 8 von der Meßgröße verstellte Blende; 9 lichtelektrische Zelle; 10 Gegentaktverstärker; 11 Differenzwandler; 12 Empfindlichkeitsregler; 13 Verstärker; 14 Anzeigeelement; 15 Wechselstromhilfsspannung.

dem Spiegel entworfen und von diesem durch das Gitter hindurch auf die Lichtzelle reflektiert. In der Nullstellung fallen die reflektierten Bilder der lichtdurchlässigen Streifen auf die lichtdurchlässigen Streifen des wirklichen Gitters und die Photozelle wird voll ausgeleuchtet, während bereits bei einer geringen Spiegelverdrehung weiß auf schwarz fällt und völlige Dunkelheit herrscht. Die Anordnung eignet sich zur Messung sehr kleiner Wege.

Eine lichtelektrische Differenzschaltung mit Wechselstromspeisung zeigt die Abb. 111. Von der Lichtquelle werden über einen Prüflichtweg 2 und einen Vergleichslichtweg 3 die in einem Gegentaktverstärker 10 liegenden Photozellen 9 angesteuert. Im Prüflichtweg liegt die von der mechanischen Größe verstellte Blende 8, im Vergleichslichtweg der Graukeil 5, mit dem der Nullabgleich erfolgt. Das Anzeigeelement 14 ist über einen weiteren Verstärker 13 und einen Empfindlichkeitsregler 12 angeschlossen. An Stelle der Wechselstromspeisung kann die Modulation auch durch Modulation der Lichtquelle, etwa in der vorher beschriebenen

Weise, mit einer Lochscheibe erfolgen, wobei der Vorverstärker eventuell erspart werden kann.

Bei der *bolometrischen Lehre* wird von der mechanischen Meßgröße die Kühlung eines geheizten Widerstandsdrahtes beeinflusst und die Widerstandsänderung in einer Brückenschaltung gemessen. In Abb. 112 ist die grundsätzliche Anordnung einer Einrichtung gezeigt, bei der die Meßgröße eine Meßfeder spannt und der Bolometer-Brückenstrom das Drehmoment dieser Meßfeder mechanisch kompensiert. Diese Einrichtung ist weitgehend unabhängig von Temperatur- und Spannungsschwankungen. In der Nullstellung steht die Bolometerfahne *i* in der

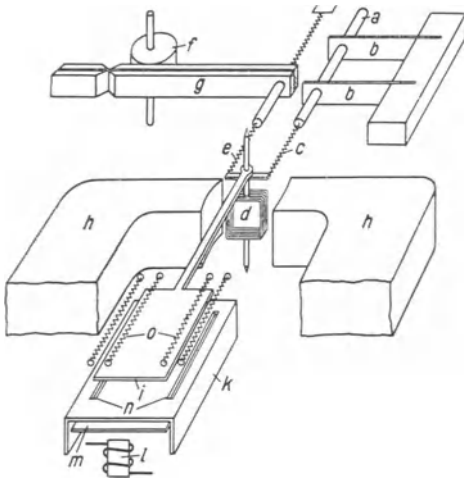


Abb. 112. Bolometerlehre in Kompensationsschaltung. [Aus Wiss. Veröff. Siemens-Werke Bd. 18 (1939) S. 151.]  
*a* Abtaststift; *b* Blattfedern zur reibungsfreien Führung des Taststiftes; *c* Meßfeder; *d* Drehspule des Kompensationssystems; *e* Gegenfeder; *f* Exzenter für Nulleinstellung; *g* federelagerter Einstellhebel; *h* Magnet des Kompensationssystems; *i* Bolometerfahne; *k* Bolometergehäuse; *l* Blasmagnet; *m* Blattfeder; *n* Bolometerdüsen; *o* Bolometerwendeln.

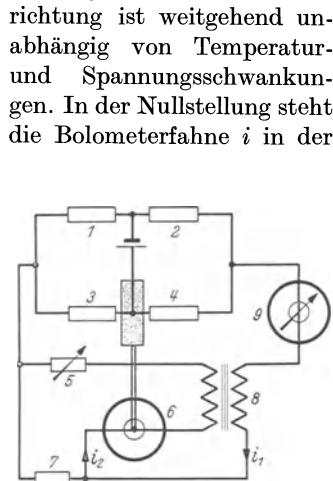


Abb. 113.  
 Schaltung der Bolometerlehre.  
 1, 2, 3, 4 Bolometerbrücke;  
 5 regelbarer Vorwiderstand des Steuergeräts; 6 Steuergerät; 7 Nebenvierstand des Steuergeräts; 8 Überträger für die elektrische Rückführung; 9 Anzeiginstrument;  $i_1$  Diagonalstrom;  $i_2$  Kompensationsstrom.

Mitte zwischen den Düsen *n*, sowie den darüberliegenden Wendeln *o*. Von dem Gebläse *l, m* wird ein feiner Luftstrom gegen die Wendeln gerichtet und ruft auf beiden Seiten gleichmäßige Kühlung hervor. Die Bolometerfahne ist an der Drehspule *d* eines Gleichstrom-Meßgerätes befestigt und wird durch die Meßfeder *c* und die Gegenfeder *e* in ihrer Nullage gehalten. Mit dem Exzenter *f* kann die Spannung der Gegenfeder verändert und der Nullpunkt eingestellt werden. Die zu messende Bewegung wird von dem durch die Blattfedern *b* reibungsfrei geführten Taststift *a* auf die vorgespannte Meßfeder *c* und von dieser auf die Drehspule *d* und die Bolometerfahne *i* übertragen. Die Bolometerfahne bewegt sich aus ihrer Mittellage, wodurch sie den Luftstrom zu einer der Bolometerseiten abschneidet. Damit kommt die Meßbrücke aus dem Gleichgewicht und der Brückenstrom erzeugt in der Drehspule



ein Drehmoment, das dem mechanischen Drehmoment der Meßfeder entgegengerichtet ist. Die Bolometerfahne bewegt sich also so lange, bis die beiden gegeneinander gerichteten Drehmomente gleich groß sind. Da das Drehmoment eines Drehspul-Instrumentes dem Strom proportional ist, kann dieser als Maß für die Bewegung des Taststiftes genommen werden. Die Schaltung ist in Abb. 113 gezeigt. Von einer Stromquelle konstanter Spannung wird die Brücke 1...4 gespeist, deren Widerstände 3 und 4 die Bolometerwendeln sind. In der Brückendiagonale liegt das Meßgerät 9 in Reihe mit dem Wandler 8 und dem Widerstand 7. Der dem Brücken-Ausgangsstrom  $i_1$  proportionale Spannungsabfall am

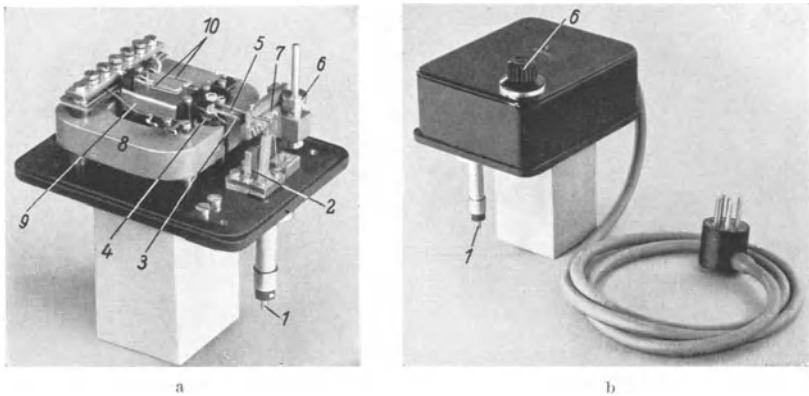


Abb. 114 a und b. Bolometrischer Mikrotaster. a Geöffnet; b geschlossen.  
 1 Taststift; 2 reibungsfreie Hebelübertragung zur Vergrößerung des Tastweges; 3 Meßfeder; 4 Drehspule; 5 Gegenfeder; 6 Exzenter für die Nulleinstellung; 7 federgelagerter Einstellhebel; 8 Magnet des Kompensationssystems; 9 Bolometergehäuse; 10 Bolometerwendeln.

Widerstand 7 wird über den regelbaren Vorwiderstand 5 auf das Steuergerät 6 gegeben. Der Übertrager 8 induziert bei Änderungen des Meßstromes  $i_1$  entgegengesetzt gerichtete Ströme in dem Kreis des Nullinstrumentes und verhindert dadurch Pendelungen, er bildet also eine elektrische Rückführung. Nimmt nun der Diagonalstrom  $i_1$  infolge einer Verstellung der Bolometerfahne zu, so wächst auch der Strom  $i_2$  und erzeugt ein dem ursprünglichen mechanisch auf die Fahne ausgeübten Drehmoment entgegengerichtetes elektrisches Drehmoment; es findet also eine elektrische Drehmomenten-Kompensation statt. Der Meßbereich wird mit den Widerständen 7 und 5 gewählt. Abb. 114 zeigt eine Ausführung des bolometrischen Mikrometerkopfes in geöffnetem und geschlossenem Zustand; Abb. 115 ein vollständiges Gerät mit einer anderen Ausführung der Abtasteinrichtung. Der Meßbereich des Gerätes ist 50 bzw. 150  $\mu\text{m}$ , die Genauigkeit  $\pm 1 \mu\text{m}$ . Die Ausgangsleistung der Bolometerbrücke ist etwa 100 mW, sie reicht also für die Betätigung von Anzeige-, Schreib- oder Regelgeräten völlig aus. Hauptanwendungs-

gebiet ist neben der Messung die Steuerung von Arbeitsmaschinen, besonders von Präzisions-Schleifmaschinen; der Anbau des Mikrotasters an eine solche Maschine ist in Abb. 116 gezeigt.

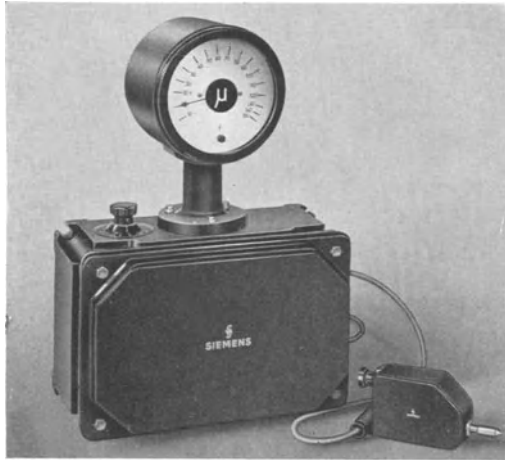


Abb. 115. Bolometrische Meßlehre mit Schaltkasten für Steuerungen.  
[Aus Wiss. Veröff. Siemens-Werke Bd. 18 (1939) S. 158.]

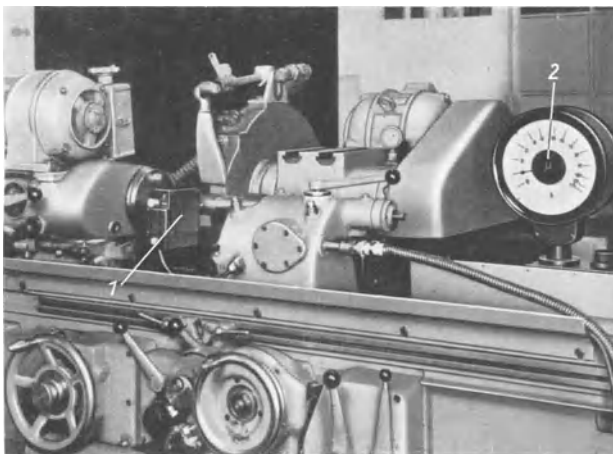


Abb. 116. Mikrotaster an einer Schleifmaschine. 1 Bolometrischer Mikrotaster; 2 Anzeigement.

Abb. 117 sind zwei Anwendungsbeispiele des Mikrotasters zur Prüfung von Oberflächen.

Eine Sonderausführung des bolometrischen Mikrometers ist der in Abb. 118 gezeigte Schallplatten-Abtaster, der die Rillen von Schallplatten mechanisch abtastet und ihren Verlauf stark vergrößert aufschreibt.

Der Meßkopf wird an Stelle des Tonabnehmers über die Schallplatte geführt und sein Taststift überträgt die Amplituden der Tonrille auf

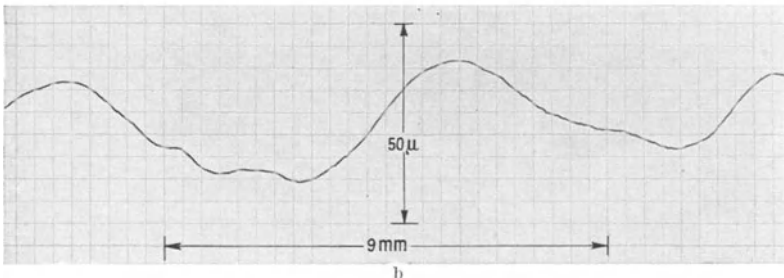
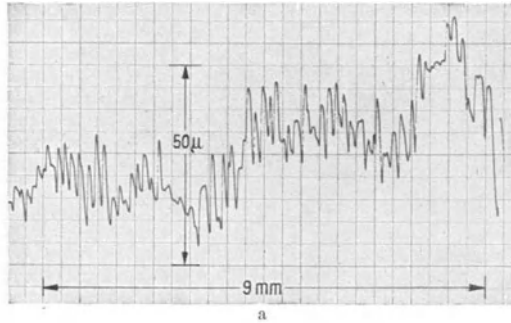


Abb. 117 a und b. Oberflächenabastung mit bolometrischem Mikrotaster. a Grobe Drehriefen an einer Stirnfläche; b Rohglas mit Walzenprägung. [Aus Wiss. Veröff. Siemens-Werke Bd. 18 (1939) S. 158, Bild 21; S. 159.]



Abb. 118. Bolometrisches Abtastgerät für Schallplatten.

die Bolometerfahne. Der Brückenstrom zeichnet auf einem Tintenschreiber den Verlauf der Schallplattenrinne in verkleinertem Längen- und vergrößertem Breiten-Maßstab auf und gibt so die Möglichkeit, die Güte von Schallplatten, sowie die Brauchbarkeit von Werkstoffen, Schneidverfahren und Schneidwerkzeugen optisch zu beurteilen.

### 3. Dickenmesser für Drähte, Bänder, Platten und Rohre [27].

Messung des Durchmessers nichtleitender Fäden. Der Durchmesser dünner Fäden wird mit elektrischen Mikrometern gemessen. Bei genügender Widerstandsfähigkeit kann der Faden mechanisch abgetastet werden, wie im folgenden am Beispiel der Überwachung der Dicke von Seidenfäden mit einem kapazitiven Mikrometer gezeigt ist.

Der Rohseidefaden besteht aus 3...5 leicht verdrehten Spinnfäden der Seidenraupe, die durch natürlichen Klebstoff zusammengehalten sind und von denen 2...15 zu einem webfertigen Seidenfaden verdreht werden. Da die Güte und Gleichmäßigkeit des Erzeugnisses unter anderem von den Durchmesser-Schwankungen des Seidenfadens abhängt, ist es wünschenswert, die Dicke laufend zu überwachen und bei zu großen Abweichungen vom Sollwert Warnsignale zu betätigen oder die Maschine

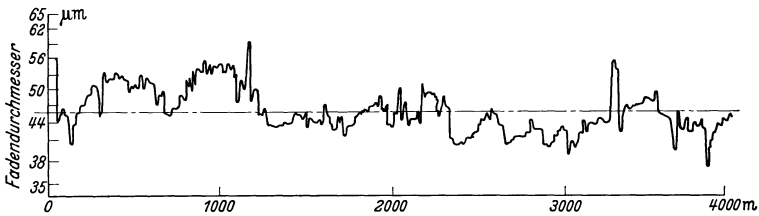


Abb. 119. Schrieb eines Fadendickenmessers, Durchlaufgeschwindigkeit 280 m/min, mittlerer Fadedurchmesser 47  $\mu\text{m}$ . [Aus Electr. Engng. Bd. 55 (1936) S. 991.]

stillzusetzen. Als Geber wird ein kapazitives Mikrometer, als Anzeigergerät ein selbstkompensierendes Nullgalvanometer in der Schaltung der Abb. 106 verwendet. Falls man registrierende Geräte verwendet, wird der Papiervorschub von der Länge des Fadens abhängig gemacht, so daß man Fehlerstellen leicht auffinden kann. Abb. 119 zeigt einen solchen Schrieb. Da kleine Unregelmäßigkeiten keine Rolle spielen, erhält das Nullgalvanometer eine starke Dämpfung, und nötigenfalls wird noch ein besonderes, mittelwertbildendes Glied zwischen Nullgalvanometer und Kompensationseinrichtung geschaltet. Die Genauigkeit des Gerätes wird zu  $\pm 0,75 \mu\text{m}$  bei Fadendicken von 25...75  $\mu\text{m}$  angegeben. Ähnliche Einrichtungen werden zum Messen der Durchmesser-Schwankungen dünner Drähte, z. B. in der Glühlampenfabrikation, benutzt. Fäden, deren geringe Festigkeit keine mechanische Abtastung zuläßt, werden mit dem lichtelektrischen Mikrometer gemessen. Der Faden und ein Normal werden von derselben Lichtquelle auf eine gemeinsame Photozelle projiziert und Abweichungen vom Normalwert treten als Stromschwankungen in Erscheinung. Bei Verwendung von Sperrschicht-Photozellen können Änderungen des Lichtstromes um  $10/100$  bereits nachgewiesen werden. Die Einrichtung eignet sich für Fadedurchmesser von 20...500  $\mu\text{m}$ .

Messung von Metalldrähten. Bei Metalldrähten konstanter spezifischer Leitfähigkeit kann der Querschnitt unmittelbar aus einer

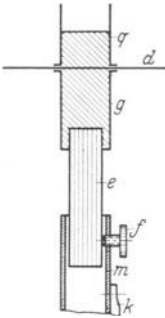


Abb. 120. Quecksilber-Elektrode für Drahtdickenmessung. [Aus ETZ Bd. 57 (1936) S. 1423.]

*e* Eisenstab; *f* Feststellschraube; *g* Glasrohr; *k* Kabelanschluß; *m* Messinghülse; *q* Quecksilber; *d* Prilling.

Widerstandsmessung in einer Wheatstone-Brücke bestimmt werden, in deren einem Zweig der zu messende Draht und in deren Diagonale ein Galvanometer oder ein Schreibgerät mit vorgeschaltetem Verstärker, zweckmäßig einem Bolometerverstärker, liegt. Die Stromzuführung zum Draht erfolgt durch gläserne, diagonal durchbohrte Quecksilbernäpfe, deren Höhe und Entfernung einstellbar sind (Abb. 120). Bei Drahtwiderständen in der Größenordnung von  $100\ \Omega$  kann der Übergangswiderstand dieser Stromabnehmer vernachlässigt werden. Das Verfahren eignet sich also besonders für dünne Drähte hohen spezifischen Widerstandes, z. B. für die Wolfram-Drähte der Glühlampen-Herstellung. Kurze Fehlerstellen und Einzelfehler werden dabei natürlich nicht erfaßt, sondern nur die langsamen Querschnitt-Schwankungen, die im Falle der Glühlampen-Herstellung auch am meisten interessieren. Wenn kleine Fehlerstellen erfaßt werden sollen, müssen

die Elektroden sehr nahe beieinander liegen, und es gehen dann die Übergangswiderstände stärker in die Messung ein. Eine ausgeführte Anlage

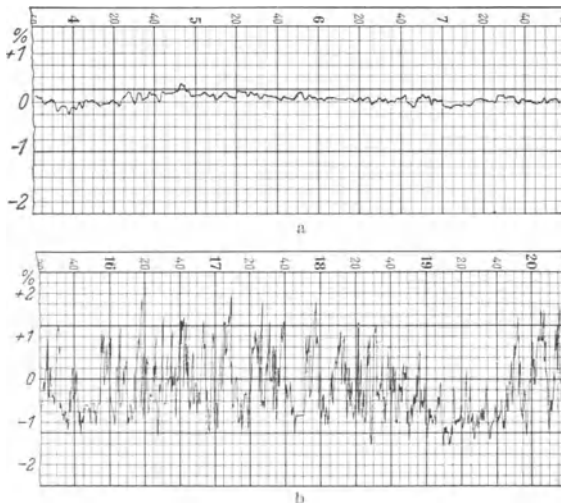


Abb. 121 a und b. Querschnittsschwankung eines Wolfram-Drahtes von  $30\ \mu\text{m}$  Dmr., aufgezeichnet mit einem Bolometerschreiber von Siemens & Halske. [Aus ETZ Bd. 57 (1936) S. 1424.]

a Guter Draht mit einer maximalen Schwankung von  $0,65\%$ ; b schlechter Draht mit einer maximalen Schwankung von  $3,65\%$ .

die Elektroden sehr nahe beieinander liegen, und es gehen dann die Übergangswiderstände stärker in die Messung ein. Eine ausgeführte Anlage

war für Drahtdurchmesser von  $10 \dots 40 \mu\text{m}$  bei einer Durchlaufgeschwindigkeit von  $3 \dots 5 \text{ m/min}$  geeignet und ergab bei einem Elektrodenabstand

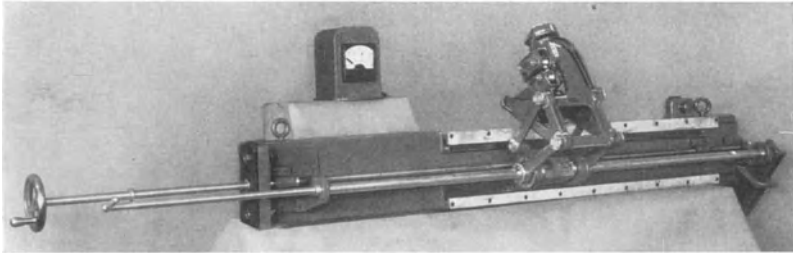


Abb. 122. Gesamtanordnung des Blechdickenmessers (Ausführung Pratt & Whitney).

von  $30 \dots 100 \text{ cm}$  auf  $1/100$  genau reproduzierbare Werte. Abb. 121 zeigt die Diagrammstreifen von einem guten und einem mangelhaften Wolframdraht von  $30 \mu\text{m}$  Durchmesser.

Doppelseitige Abtastung von Bändern und Platten. Die Stärke von Platten und Bändern hinreichender Festigkeit, deren beide Seiten zugänglich sind, kann mit elektrischen Mikrometern mechanisch abgetastet werden. Berührungsfreie Messung ist bei Nichtleitern möglich durch kapazitive, auf der Änderung der Dielektrizitätskonstanten beruhende Mikrometer, bei ferromagnetischen Werkstoffen durch induktive Mikrometer auf der Grundlage der Induktivitätsänderung durch Einbringen eines Eisenkerns in eine Spule, bei paramagnetischen Werkstoffen durch Änderung der Kopplung zweier Kreise. Im allgemeinen läßt jedoch die Festigkeit metallischer Werkstoffe eine laufende mechanische Abtastung zu. Einen Dickenmesser

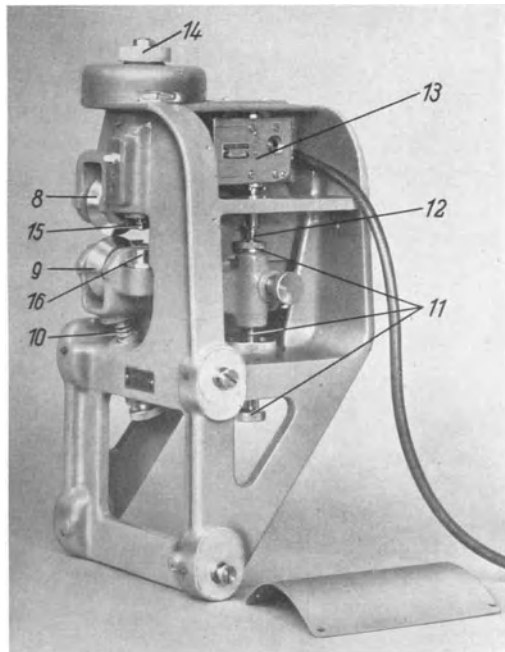


Abb. 123. Abtasteinrichtung für Blechdickenmesser.  
8 Feste Rolle; 9 schwenkbare Rolle; 10 Feder für Druckeinstellung; 11 Justierschraube; 12 Abtastbolzen; 13 Lehrenkopf; 14 Mikrometerschraube; 15 Spindel; 16 Anschlag.

für die laufende Überwachung einer Feinblechwalzenstraße zeigen die folgenden Bilder. Aus Abb. 122 ist die Gesamtanordnung einer von Pratt & Withney hergestellten Einrichtung ersichtlich. Der induktive Geber ist in einen schwenkbaren Leichtmetallgußbock eingebaut und kann mit diesem durch eine Spindel waagrecht verschoben werden, um sich der jeweiligen Blechbreite anzupassen. Der Gußbock ist in Abb. 123 noch einmal größer dargestellt. Die Abtasteinrichtung besteht aus einer festen 8 und einer schwenkbaren, kugelgelagerten Stahlrolle 9, zwischen denen

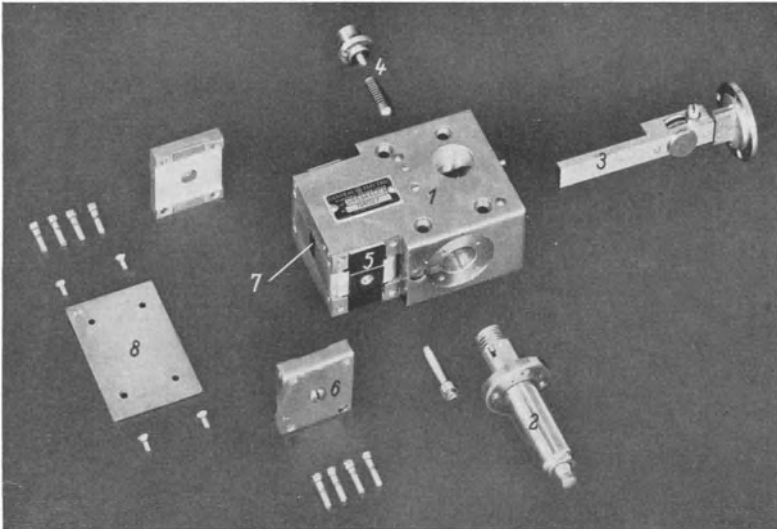


Abb. 124. Einzelteile des Lehrenkopfes zum induktiven Blechdickenmesser.

1 Gehäuse; 2 Abtastbolzen; 3 Eisenzunge; 4 Justierschraube für den Eisenkern; 5 Meßspule, 6 Verschlussplatte und Justierschraube für die Meßspule; 7 Luftspalt zwischen den Meßspulen; 8 Verschlussplatte.

die Blechbahn läuft. Die schwenkbare Rolle wird mit einer einstellbaren Feder 10 gegen die Blechbahn gedrückt. An ihrem Schwenkarm sitzt eine Justierschraube 11, die auf dem Abtastbolzen 12 des Lehrenkopfes 13 ruht. Mit der Mikrometerschraube 14 der Spindel 15 und dem Anschlag 16 wird der Sollwert eingestellt. Die Einzelteile des Lehrenkopfes zeigt Abb. 124; er entspricht dem früher ausführlich beschriebenen induktiven Mikrometer. Die Gesamtschaltung zeigt Abb. 125. Die Netzspannung von 110...115 V, 60 Hz, wird über den thermischen Konstanthalter 1 und den Wandler 2 einer Wechselstrombrücke aus zwei unveränderbaren Induktivitäten 3 und zwei einander gegenüberstehenden Drosselspulen 4 zugeführt, zwischen denen eine bewegliche Eisenzunge 5 liegt. Im Diagonalkreis der Brücke liegt ein Trocken-Gleichrichter 6 mit einem Drehspul-Anzeigeelement 7. Die Leistungsaufnahme der Gesamtschaltung ist etwa 20 W. Da die Gleichrichter im Gegensatz zu den

früher beschriebenen deutschen Einrichtungen nicht phasengesteuert sind, muß die bewegliche Eisenzunge beim Sollwert der Blechdicke unsymmetrisch zwischen beiden Spulen stehen und darf auch bei maximaler Abweichung die Symmetriestellung nicht überschreiten. Das Gerät ist bis zu Blechstärken von 18 mm verwendbar und hat einen Meßbereich von  $\pm 25 \mu\text{m}$  bei einer Meßgenauigkeit von  $\pm 1 \mu\text{m}$ . Da die Abtastrollen an sehr kurzen Armen sitzen, kann die Blechstärke nur am Rande gemessen werden. Die Herstellung des Gebers und insbesondere der Abtasteinrichtung bedarf selbstverständlich großer Sorgfalt, da jedes Spiel der Teile und jede Fabrikationsungenauigkeit zu Meßfehlern führen. Abb. 126 zeigt die entsprechende Ausführung der Siemens & Halske AG.

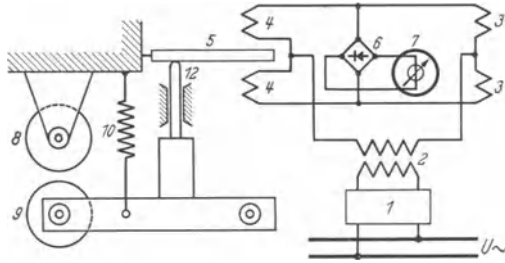


Abb. 125. Anordnung und Schaltung des induktiven Blechdickenmessers.

1 Thermischer Konstanthalter; 2 Anschlußwandler; 3 konstante Induktivitäten; 4 Meßdrosseln; 5 bewegliche Eisenzunge; 6 Trockengleichrichter; 7 Drehspul-Anzeiginstrument; 8 feste Abtastrolle; 9 bewegliche Abtastrolle; 10 Spannfeder.

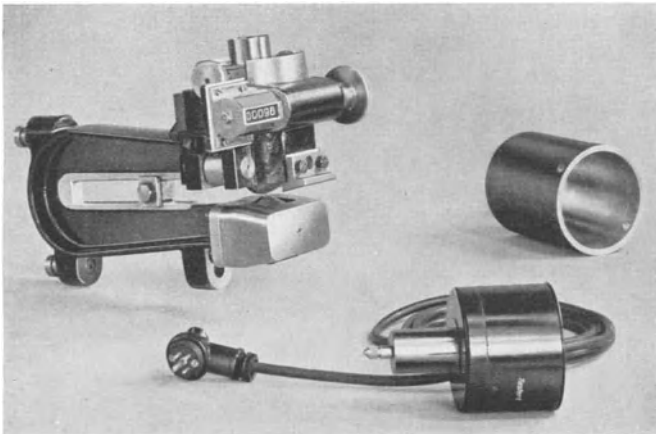


Abb. 126. Elektrisches Blechstärken-Meßgerät (Ausführung Siemens & Halske AG.).

Einseitige Messung von Metallplatten. Die Dicke von Metallplatten bekannter Leitfähigkeit kann von einer Seite aus punktwise bestimmt werden, indem man an zwei Stellen mit bekannter Entfernung Strom zuführt und den Spannungsabfall mißt. Das Gerät ist nach Abb. 127 geschaltet und besteht aus einer konstanten Gleichstromquelle für etwa 6 V und 20 A, einem Regelwiderstand, einem Strommesser,



einem hochempfindlichen Drehspulgalvanometer und vier Elektroden, von denen zwei der Stromzuführung dienen, während an den beiden anderen der Spannungsabfall gemessen wird. Je eine Strom- und Spannungselektrode sind fest miteinander verbunden. Bei der praktischen Ausführung der Messung wird ein bestimmter Ausschlag des Galvanometers konstant eingeregelt und die zu diesem Ausschlag gehörige Stromstärke abgelesen. Aus Eichkurven oder Nomogrammen ist dann der Zusammenhang zwischen Stromstärke, Wanddicke und Leitfähigkeit zu ersehen. Um stets gleichen Abstand der Elektroden und geringen Übergangswiderstand zu gewährleisten, werden die Kontaktpunkte nach einer Schablone angekernt.

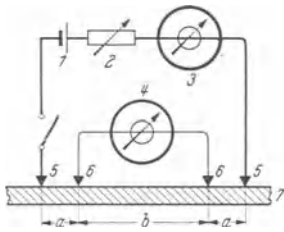


Abb. 127. Wandstärkenmessung aus Strom und Spannung.  
 1 Konstante Gleichstromquelle;  
 2 Regelwiderstand; 3 Strommesser;  
 4 Drehspulgalvanometer; 5 Stromzuführungen;  
 6 Spannungselektroden;  
 7 Prüfling.

Die Kerner werden mit federbelasteten Stahlspitzen geschlagen. Der Elektrodenabstand wird je nach Wanddicke und Ausdehnung des Prüflings verschieden gewählt; er beträgt etwa 15/75/15 mm. Selbstverständlich ist die Messung einer Reihe von Einflüssen unterworfen. Zunächst ist die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit durch Multiplikation des Ergebnisses mit  $\frac{1}{1 + \alpha t}$

zu berücksichtigen, wobei  $\alpha$  den Temperaturkoeffizienten und  $t$  den Unterschied zwischen Betriebs- und Eichtemperatur bedeuten. Außerdem gehen die Abmessungen des Prüflings in die Messung ein. Steht die Meßbasis senkrecht zum Plattenrand, so muß die randnahe Elektrode mindestens 50 mm vom Rand entfernt sein. Verläuft die Meßbasis parallel zum Plattenrand, so machen sich auch in 150 mm Abstand noch Einflüsse bemerkbar. Der Einfluß ist um so größer, je dünner die Platte ist. Auch die angewendete Stromstärke ist bei räumlich begrenzten Platten nicht ohne Einfluß, es muß also annähernd mit der Stromstärke gearbeitet werden, mit der auch die Eichung vorgenommen wurde. Eine weitere Störungsgröße bei der Messung heißer Kesselwände oder Kesselrohre sind Thermospannungen, sowie elektrostatische Spannungen. Solange diese Spannungen konstant sind, können sie dadurch ausgeschaltet werden, daß man als Meßspannungsabfall den Unterschied der Galvanometerausschläge bei offenem und geschlossenem Stromkreis einsetzt. Bei gefüllten Behältern oder Rohren ist ferner die Leitfähigkeit der Füllflüssigkeit zu berücksichtigen, sofern sie nicht gegen die Leitfähigkeit der Behälterwandung verschwindend klein ist. Aus alledem folgt die Notwendigkeit sorgfältiger Eichung mit Normalien bekannter Dicke und Leitfähigkeit und möglichst gleichen Abmessungen, sowie sorgsamer und überlegter Anwendung. Da die Eichkurven linear verlaufen, genügt die Aufnahme weniger Eichpunkte. Der Apparat eignet sich für die Messung von Kesselwänden, Behälterwandungen und Rohren

und gestattet die Feststellung von Anfressungen, der Exzentrizität und der Stauchung von Rohren in Krümmern. Der Meßbereich liegt bei 1...75 mm, die Genauigkeit zwischen 2 und 5%. Für 25 mm dicke Eisenplatten ist eine Meßstromstärke von etwa 10 A erforderlich.

Ist die Leitfähigkeit des Prüflings nicht bekannt, so ist ein anderes Verfahren anzuwenden, das auf der Änderung des Spannungsabfalls zwischen fest angeordneten Elektroden mit dem Verhältnis  $\frac{\text{Elektrodenabstand}}{\text{Plattendicke}}$

beruht, wenn der Platte ein konstanter Strom zugeführt wird. Zur Erklärung dieses Verfahrens dienen folgende Überlegungen: Führt man einer unendlich großen und unendlich dünnen Metallplatte durch zwei aufgesetzte Elektroden Strom zu, so breitet sich der Strom von diesen Elektroden nach allen Seiten radial aus, und die Stromdichte an einer beliebigen Stelle der Platte ist umgekehrt proportional dem Abstand dieses Punktes von der Stromquelle. Die Spannungsdifferenz zwischen zwei Punkten der Platte ist also abhängig von der Entfernung zwischen diesen beiden Punkten  $s$  und von ihrem Abstand von der Stromquelle  $e = \frac{\Delta e \cdot s}{a}$ . Ordnet man die vier Elektroden in Form eines Quadrats nach Abb. 128 an und führt an zwei benachbarten Eckpunkten den Strom zu, während man die Spannung an den beiden anderen Eckpunkten mißt, so ist der gemessene Spannungsabfall für beliebige Werte von  $s$  konstant. Legt man statt der unendlich dünnen Platte einen unendlich dicken Körper mit ebener Oberfläche zugrunde, so geht der Strom ebenfalls von den Berührungspunkten der Elektroden nach allen Seiten radial aus; die Stromdichte an einem beliebigen Punkt ist aber jetzt umgekehrt proportional dem Quadrat des Abstandes dieses Punktes von der Elektrode. Die Potentialdifferenz zwischen zwei beliebigen Punkten der Plattenoberfläche ist nunmehr abhängig von der Entfernung dieser beiden Punkte und dem Quadrat der Entfernung von der Elektrode  $e = \frac{\Delta e \cdot s}{a^2}$ . Bei einer Platte endlicher Dicke liegt das gemessene Spannungsgefälle zwischen beiden Grenzwerten. Solange das Verhältnis der Seitenlänge  $s$  des Elektrodenquadrats zu der Plattendicke  $d$  größer als 1 ist, bleibt der gemessene Spannungsabfall konstant, während er bei Verhältnissen  $\frac{s}{d} < 1$  rasch ansteigt. Die beiden Grenzkurven für zwei- und dreidimensionale Stromausbreitung sind in Abb. 129 eingetragen.

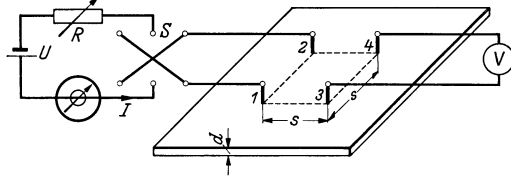


Abb. 128. Messung der Dicke von Metallplatten von einer Seite aus.

1...4 Vierpunktelektrode; U Gleichstromquelle;  
R Regelwiderstand; J Strommesser; V Spannungsmesser  
S Stromwender; d Dicke des Prüflings; s Elektrodenabstand.

Für die Ausführung der Messung werden Vierpunkt-Elektroden mit je nach Plattendicke verschiedener Kantlänge, nämlich 3,125; 6,25; 12,5; 25; 50 und 100 mm verwendet. Die Elektrodenadeln sind in einem Elektrodenhalter federnd gelagert und dringen bei leichtem Anpressen auch durch eine Farb- oder Rostschicht in das Metall ein (Abb. 128). Der Strom  $I$  wird mit dem Regler  $R$  konstant gehalten. Benutzt man zwei aufeinanderfolgende Elektrodengrößen mit den Kantlängen  $s$  und  $2s$ , die beide größer sind als die Plattendicke  $d$ , so mißt man bei konstantem Strom mit der kleinen Elektrode höhere

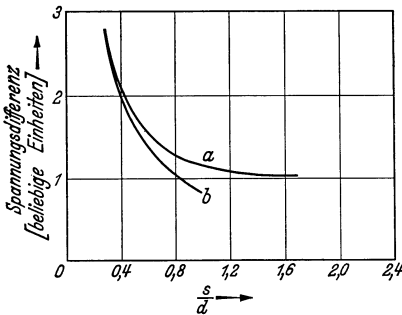


Abb. 129. Spannungsgefälle zwischen den Elektroden für zwei- und dreidimensionale Stromausbreitung, abhängig vom Verhältnis des Elektrodenabstandes  $s$  zur Plattendicke  $d$ . [Aus Inst. Electr. Engr. Bd. 84 (1939) S. 92.]

*a* Zweidimensionale Stromausbreitung;  
*b* dreidimensionale Stromausbreitung.

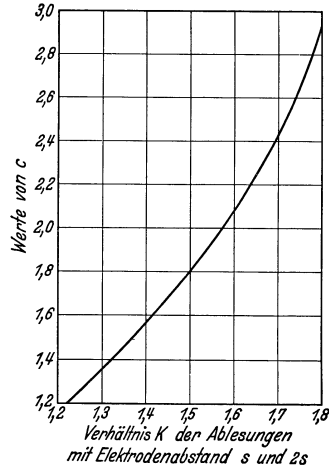


Abb. 130. [Aus Instn. Electr. Engr. Bd. 84 (1939) S. 93.]

Eichkurve  $c = f(K)$ . Plattendicke  $d = c \cdot s$ .  
 $K =$  Verhältnis der beiden Ablesungen mit Elektrodenabstand  $s$  bzw.  $2s$ .

Potentialdifferenzen. Das Verhältnis der gemessenen Werte  $K$  steigt stark an, wenn die Seitenlänge  $s$  sich der Plattendicke  $d$  nähert und gibt die in der Eichkurve Abb. 130 dargestellte Beziehung zwischen Elektrodenabstand und Plattendicke. Es ist dann die Plattendicke  $d = c \cdot s$ . Ein Beispiel soll dies besser verständlich machen. Die verwendeten Elektroden haben die Seitenlängen  $s = 6,25$  und  $2s = 12,5$  mm. Das Verhältnis der mit beiden Elektroden abgelesenen Potentialdifferenzen  $K$  sei 1,41. Dann folgt aus der Eichkurve  $c = f(K)$  (Abb. 130),  $c = 1,6$  und die Plattendicke  $d = c \cdot s = 1,6 \cdot 6,25 = 10$  mm. Das Verfahren ist als Vergleichsmethode unabhängig von den Werkstoffeigenschaften (Leitfähigkeit und Permeabilität) und gibt eine Genauigkeit von etwa 3%. Es eignet sich für die Messung der Dicke von Kesselwänden, Gasbehältern, Schiffswänden usw. und gestattet auch, Lunker und Anfrassungen festzustellen. Um den Einfluß von Thermospannungen auszuschalten, werden stets zwei Messungen mit gewendetem Strom ausgeführt. Bei geblättern und geschichteten Platten können durch den

höheren Übergangswiderstand quer zur Schichtrichtung erhebliche Meßfehler entstehen, da die Stromausbreitung nicht mehr gesetzmäßig erfolgt. Ebenso ist bei mehrlagigen genieteten Platten besondere Vorsicht geboten. Ferner sind in der Nähe von Niet- und Schweißnähten und bei Platten begrenzter Größe besondere Eichkurven notwendig. Immerhin muß die Möglichkeit, unter gewissen Bedingungen und Vorsichtsmaßnahmen, die Dicke einer Metallplatte aus beliebigem Werkstoff von einer Seite aus zu bestimmen, als meßtechnischer Erfolg angesehen werden.

Die Dicke magnetischer Werkstoffe bekannter Zusammensetzung kann von einer Seite aus mit einem magnetischen Dickenmesser nach Abb. 131 bestimmt werden. Das Gerät besteht aus einem H-förmigen Weicheisenkern von den ungefähren Abmessungen  $6 \times 6$  cm, dessen Quersteg etwa  $4 \text{ cm}^2$  Querschnitt hat und auf dessen Schenkeln vom halben Querschnitt zwei gegeneinander geschaltete Prüfpulen aufgebracht sind. In die Enden der Schenkel sind unmagnetische Kegelspitzen von  $25 \mu\text{m}$  Höhe und 1 mm Fußdurchmesser eingeschraubt und bilden eine Dreipunktauflage für die zu prüfende Eisenplatte; sie vermögen eine Rost- oder Farbschicht sicher zu durchdringen. Auf das Joch wird eine Normalplatte von gleichem Werkstoff und ungefähr derselben Dicke wie der Prüfling aufgelegt und die freie Seite des Joches auf die zu prüfende Blechplatte aufgesetzt. Polt man nun die Erregerspule mit einem Momentschalter um, so werden bei gleicher Werkstoffdicke in den beiden Prüfpulen entgegengesetzt gleiche Spannungen induziert und das Galvanometer schlägt nicht aus. Ist die Dicke des Prüflings  $s$  verschieden von der des Normal  $r$

$$s = b \cdot r, \quad (95)$$

so macht das Galvanometer einen Ausschlag

$$\alpha = 2 \cdot K \cdot \frac{s-r}{s+r} \quad (96)$$

und die Dicke  $s$  wird

$$s = r \frac{2 \cdot K + \alpha}{2 \cdot K - \alpha}, \quad (97)$$

worin  $K$  durch Eichung bestimmt werden kann. Um am Galvanometer stets Ausschläge gleicher Richtung zu erhalten, wird es zweckmäßig gleichzeitig mit der Erregerspule umgepolt. Die Einrichtung eignet sich

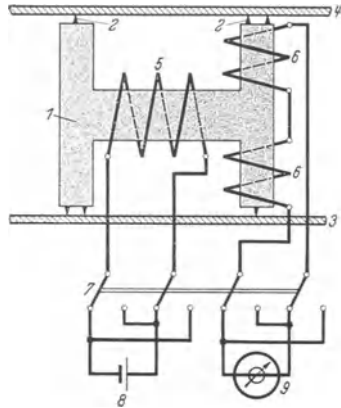


Abb. 131.  
Magnetischer Blechdickenmesser.

- 1 Weicheisenjoch;  
2 unmagnetische Spitzen;  
3 Prüfling; 4 Normal; 5 Erregerspule;  
6 Prüfpulen; 7 Schnappschalter;  
8 Stromquelle; 9 Anzeiginstrument.

für Platten und, mit besonders geformten Polschuhen, auch für Rohre aus magnetisierbarem Werkstoff von 2,5...15 mm Dicke und gibt eine Genauigkeit von etwa  $\pm 0,8$  mm. Die Dicke von Eisenplatten und besonders von Kesselrohren an der Einbaustelle kann auch durch Messung der Leistungsaufnahme eines auf den Prüfling aufgesetzten Wechselstrommagnets bestimmt werden. Der Geber bedeckt  $38 \times 12$  mm<sup>2</sup> und mißt die mittlere Dicke dieser Fläche zuzüglich eines gewissen Streubereiches, er ermöglicht also nicht, die wahre Dicke der am meisten gefährdeten Stelle anzugeben, da dieser Wert natürlich um einen un-

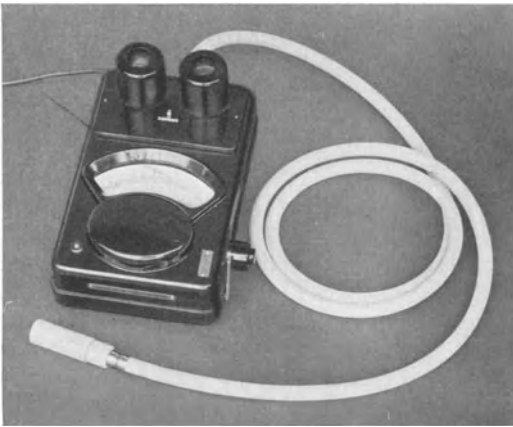


Abb. 132. Röntgen-Wanddickenmesser mit Ionisationskammer und elektrostatischem Lichtzeiger-Instrument (Ausführung Siemens & Halske A.G.).

Meßfehler verursachen; auch Erhitzen der Röhren auf 900° und plötzliches Abschrecken in kaltem Wasser änderte die Eichkurve nicht. Der durchschnittliche Meßfehler bei der Messung von Kesselrohren betrug nicht mehr als 0,13 mm.

Als zweites Verfahren für denselben Zweck wurde ein elektromagnetisches Vergleichsverfahren entwickelt, bei dem zwei gleiche Elektromagnete auf das zu untersuchende Rohr bzw. auf ein Vergleichsrohr aufgesetzt und der Scheinwiderstandsunterschied in einer Brückenschaltung gemessen wurde. Auch mit diesem Verfahren wurden beim Aufsuchen korrodierter Kesselrohre gute Ergebnisse erzielt.

Röntgendurchstrahlung. Die Absorption von Röntgenstrahlen wird besonders zur Messung der Wanddicke von Metallplatten und metallischen Hohlkörpern herangezogen, wobei die Metallschicht als Filter wirkt, hinter dem die Strahlungsintensität mit Ionisationskammer oder Zählrohr gemessen wird. Die Strahlenschwächung ist ein Maß für die Wanddicke. Die Eichung erfolgt mit Platten gleichen Werkstoffes und bekannter Dicke.

bekanntem Betrag unter dem Mittelwert liegen kann. Außerdem ist der Meßbereichumfang des Verfahrens beschränkt, weil das Wattmeter bei sehr dünnen Rohren praktisch die Leerlaufleistung der Erregerspule mißt, während bei sehr starkwandigen Rohren der Skinneffekt Meßfehler verursacht. Die Röhrenfabrikation ist so gleichmäßig, daß Permeabilitäts- und Leitfähigkeitsschwankungen praktisch keine

Abb. 132 zeigt den Wanddickenmesser der Siemens & Halske AG. zum Prüfen von Gasflaschen. Die Ionisationskammer dieses Gerätes hat einen Rauminhalt von nur  $25 \text{ cm}^3$ , ihre Empfindlichkeit ist jedoch durch

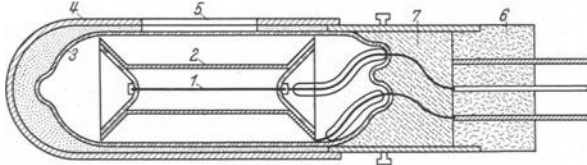


Abb. 133. Zählrohr für Röntgendickenmesser. [Aus Stahl u. Eisen Bd. 58 (1938) S. 669.]  
1 Anodendraht; 2 Metallzylinder; 3 Glaskolben; 4 Bleimantel; 5 Fenster; 6 Bernsteinsockel;  
7 Kittmasse.

Zwischenwände aus hochatomigem Metall und hohen Gasdruck auf die einer  $800 \text{ cm}^3$ -Luftkammer gesteigert. Mit der Kammer können bei

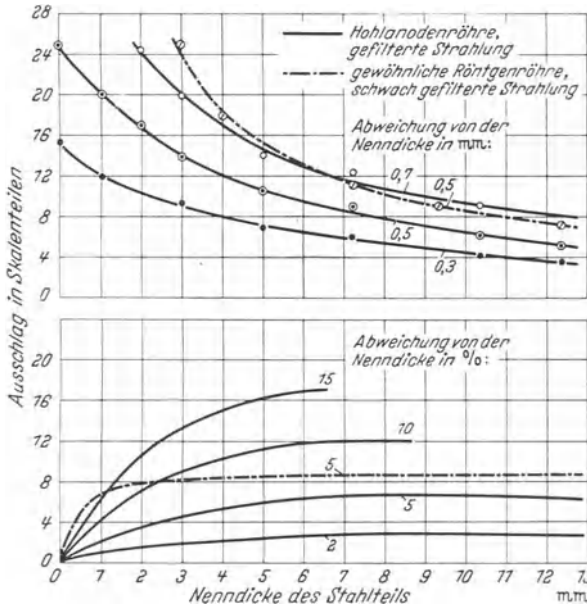


Abb. 134. Empfindlichkeit des Wanddicken-Meßgeräts abhängig von der Dicke der zu durchstrahlen-  
den Wand. [Aus Stahl u. Eisen Bd. 58 (1938) S. 668–670.]

200 kV Röhrensannung und  $12 \text{ cm}^2$  Auffangfläche Stahlplatten bis 60 mm Stärke geprüft werden. 2% Wanddickenänderung rufen eine Ausschlagänderung des elektrostatischen Anzeige-Instruments um 10% hervor.

DE GRAAF und VAN DER TUUK verwenden 2 Ionisationskammern in einem gemeinsamen Gasraum in Gegentaktschaltung. Bei Stahlrohren

von 10 mm Wandstärke und einer Abtastgeschwindigkeit von  $600 \text{ cm}^2/\text{min}$  konnten damit LUNKER von 3 mm Dmr. noch festgestellt werden.

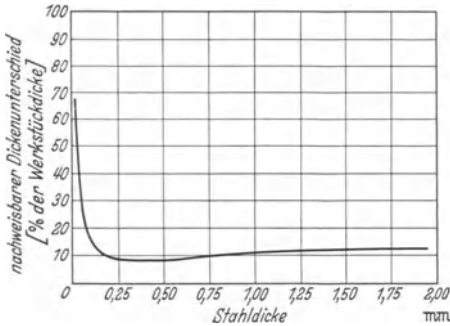


Abb. 135. Empfindlichkeit des Wanddicken-Meßgeräts mit zwei Ionisationskammern in Kompensations-schaltung. (Aus Arch. techn. Messen V 9114—11, Bild 2.)

dem Draht und dem Metallzylinder liegt eine Spannung von 1000 V. Die wirksame Zählrohrfläche betrug bei

Einen Schnitt durch ein Zählrohr zeigt Abb. 133. Innerhalb des Metallzylinders 2 liegt der geradlinig aus-gespannte Draht 1 und ist mit diesem zusammen in einen Glaskolben 3 eingeschmolzen. Die Glasbirne ist mit Gas von geringem Druck (Argon  $0,1 \text{ kg}/\text{cm}^2$  mit geringem Alko-holzusatz) gefüllt und in eine Schutzhülle aus Blei (4) mit einem Fenster (5) passender Größe eingekittet. Zwischen

einer ausgeführten Gerät

$10 \times 20 \text{ mm}^2$  (A. TROST), die Einstelldauer des Meßgerätes  $\frac{1}{10} \text{ s}$ . Die Zählrohrempfindlich-keit wurde auf etwa 1% statistische Ausschlag-schwankung des An-zeigegerätes eingestellt. Die Genauigkeit der Messung ist vom Ab-stand des Zählrohres von der Röntgenröhre, von der Vorfilterung (Fenster der Röntgen-röhre) und von der Wanddicke abhängig; sie beträgt etwa  $\pm 0,5\%$ .

Abb. 134 zeigt die Empfindlichkeit des Meßverfahrens mit Zähl-rohr, abhängig von der Wanddicke für ein gewöhnliches Röntgen-rohr und für eine Hohl-

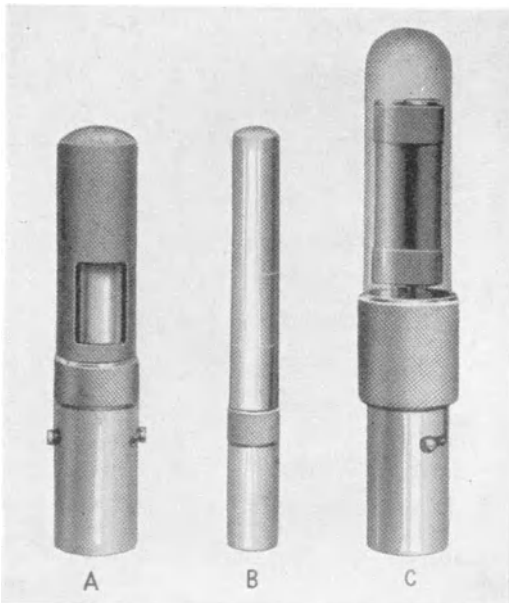


Abb. 136. Betriebsfertige technische Zählrohre für Röntgendickenmessung (Ausführung Siemens & Halske A.G.). (Aus Arch. techn. Messen V 9114—11, Bild 3.)

anodenröhre, Abb. 135 die Empfindlichkeit des Meßverfahrens mit 2 Ionisationskammern in Kompensationsschaltung.

Bei 250 kV Röhrenspannung konnten Stahlplatten bis 25 mm gemessen werden. Verdopplung der Zählrohr-Empfindlichkeit gibt eine Erhöhung des Meßbereiches um 20% bei gleichzeitiger Vergrößerung des Anzeigefehlers um das  $\sqrt{2}$ -fache; Verdopplung der Zählrohrfläche oder der Anzeigedauer gibt ebenfalls 20% Meßbereich-Erhöhung bei gleichbleibender Genauigkeit. Außer den Schwankungen der Wanddicke erfaßt das Meßgerät Korrosionsstellen, Schlackeneinschlüsse und Lunker. Es eignet sich für Messungen an schwer zugänglichen Stellen, insbesondere zur Ermittlung der Wanddicke und Gleichmäßigkeit von nahtlosen Stahlflaschen und Röhren, sowie zu Messungen an wichtigen Bauteilen. Die lückenlose Untersuchung einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> dauert etwa 5 min. Abb. 136 ist eine Ansicht des betriebsfertigen Zählrohres.

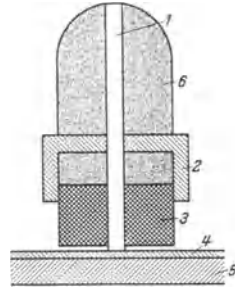


Abb. 137. Induktiver Schichtdickenmesser mit veränderbarem Luftspalt.

- 1 Eisenkern; 2 Eisenglocke;
- 3 Erregerspule;
- 4 unmagnetische Schicht;
- 5 magnetischer Grundstoff;
- 6 Holzgriff.

#### 4. Messung von Auftragsdicken [28].

Unmagnetische Schicht auf magnetischer Grundlage. Die magnetischen Schichtdickenmesser sind induktive Geber mit veränderbarem Luftspalt, wobei an Stelle des Luftspaltes die unmagnetische Schicht und an Stelle des Eisenankers das magnetische Grundmaterial getreten ist. Die



Abb. 138. Ansicht eines induktiven Schichtdickenmessers. (Aus AEG-Mitt. 1939 S. 192.)

grundsätzliche Anordnung zeigt Abb. 137, ein Ausführungsbeispiel Abb. 138. Die Induktivitätsänderung und damit die Schichtdicke wird entweder unmittelbar aus der Stromaufnahme der Erregerspule oder in einer Brückenschaltung bestimmt. Nachweisbar sind Schichtdicken von 10  $\mu\text{m}$ . Als zweckmäßiger Meßbereich wird 200...5000  $\mu\text{m}$  bei einer Genauigkeit von  $\pm 20 \mu\text{m}$ , bezogen auf eine Schichtdicke



von  $1000 \mu\text{m}$ , angegeben. Das Gerät wird aus dem Wechselstromnetz über einen Spannungskonstanthalter gespeist. Abb. 139 zeigt die Stromaufnahme abhängig von der Dicke der unmagnetischen Schicht für die Meßbereiche 1,5 und 6 mm. An Stelle des induktiven Gebers

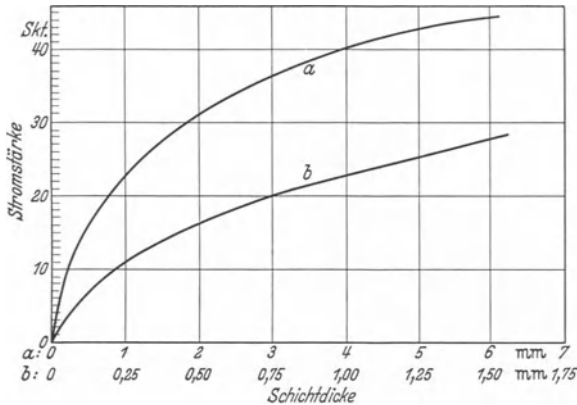


Abb. 139. Eichkurven eines magnetischen Schichtdickenmessers. (Aus H. & B.-Druckschrift 352.)

mit veränderbarem Luftspalt kann auch ein Geber mit veränderbarer gegenseitiger Induktion in der Schaltung der Abb. 140 verwendet werden.

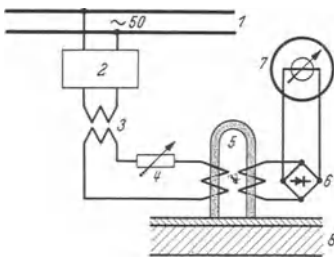


Abb. 140. Induktiver Schichtdickenmesser mit veränderbarer gegenseitiger Induktion.

1 Wechselstromnetz; 2 Spannungskonstanthalter; 3 Isolierwandler; 4 Regelwiderstand; 5 induktiver Geber; 6 Meßgleichrichter; 7 Anzeigeelement; 8 Prüfling.

Der Geber hat ein U-förmiges Weich-eisenjoch (5) von 38 mm gestreckter Länge, 6 mm Breite, 0,4 mm Dicke und 6 mm Maulweite. Das Joch ist in ein Bleigehäuse eingebaut, um einen guten Auflagedruck zu erhalten und ruht an drei Stellen auf dem Prüfling. Es trägt auf seinen Schenkeln Wicklungen, deren Kopplung durch das Eisen des Grundmetalls erfolgt. Die in der Sekundärspule induzierte Spannung wird über einen Trocken-Gleichrichter einem Drehspul-Instrument zugeführt; ihren Verlauf in Abhängigkeit von der Dicke der unmagnetischen Schicht gibt Abb. 141

wieder. Das Gerät mißt die mittlere Schichtstärke einer Fläche von  $0,2 \text{ cm}^2$  mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1 \mu\text{m}$  und eignet sich besonders für die Messung verzinnter Eisenbleche. Es kann aber auch für die Messung von Nickelüberzügen auf unmagnetischem Grundmaterial verwendet werden, doch kehrt sich dabei die Eichkurve um, d. h. mit zunehmender Schichtdicke werden die Ausschläge größer.

Folien unmagnetischen Materials werden durch Auflegen auf eine geschliffene Eisenplatte gemessen. Für laufende Papierdickenüberwachung in der Papiermaschine wurde eine Sondereinrichtung nach dem gleichen Verfahren entwickelt.

Das Verfahren des Bureau of Standards beruht auf der Messung der Abnahme der Zugkraft zwischen einem Dauermagnet und der eisernen Grundplatte mit wachsender Dicke des unmagnetischen Überzuges. Der Magnet ist an einer Drehmomenten-Waage (Abb. 142) frei aufgehängt und am Ende halbkugelig poliert; er ist von einer Glashülse umgeben, um eine Berührung mit Eisenteilen und dadurch hervorgerufene Änderungen seiner

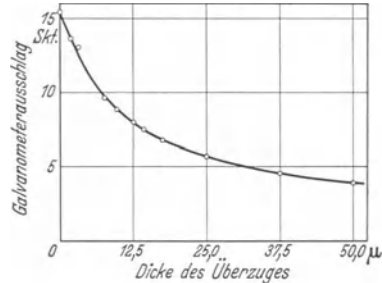


Abb. 141. Eichkurve eines induktiven Dickenmessers gemäß Bild 140. [Aus J. sci. Instrum. Bd. 14 (1937) S. 341.]

Stärke, sowie seitliche Bewegungen zu verhindern. Größe und Magnetisierung des Magnets hängen von dem gewünschten Meßbereich ab. Abb. 143 zeigt die Abhängigkeit der Abreißkraft von Magnetform und Sättigungsgrad. Die Kurven sind am steilsten in der Nähe des Nullpunktes, die Empfindlichkeit also für dünne Überzüge am größten.

Ein 36%iges Kobalt-Chrom-Stäbchen von 1 mm Dmr. und 30 mm Länge eignet sich für Auftragsdicken von 2,5...400  $\mu$ m. Die Meßfehler sind am kleinsten in der Mitte, am größten an den Enden des Meßbereiches. Für noch dünnere Überzüge, z. B. verzinnnte Eisenplatten mit 1,5  $\mu$ m Auftragsdicke, wird ein Magnet von 2 mm Dmr. und 30 mm Länge verwendet, der nur zu 15% gesättigt ist. Der Vorteil dieses Verfahrens ist seine Anwendbarkeit bei gekrümmten Oberflächen, da die Berührung nahezu punktförmig ist und Ränder bereits in 2 mm Entfernung keinen Meßfehler mehr verursachen; dagegen beeinträchtigt eine Reihe anderer Einflüsse die Genauigkeit des Verfahrens. Besonders großen Einfluß hat die Oberflächengüte. Die Oberfläche muß glatt und sauber und der Träger am besten poliert sein. Bei poliertem Stahl als Grundmaterial sind die Meßwerte auf

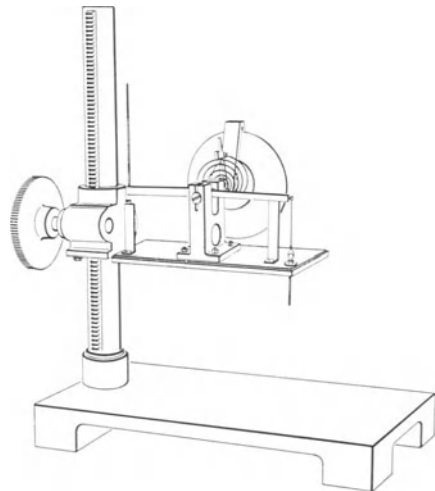


Abb. 142. Federwaage zur Messung der Abreißkraft von Magneten. [Aus J. Res. Nat. Bur. Stand. Bd. 20 (1938) S. 358.]

$\pm 1\%$  genau. Bei einem Magnetdurchmesser von 1 mm hat die Dicke des Grundmaterials keinen Einfluß, wenn sie größer als 0,25 mm ist, darunter treten erhebliche Meßfehler auf. Die magnetischen Eigenschaften des Grundmaterials gehen in die Messung ein und bei Materialien, deren magnetische Eigenschaften sich um mehr als 5% unterscheiden, ist eine besondere Eichung erforderlich. Für die meisten Eisen- und Stahlsorten genügt jedoch eine gemeinsame Eichkurve. Für Grauguß und hochkarburierten Stahl sind dagegen besondere Eichkurven erforderlich. Mit dem

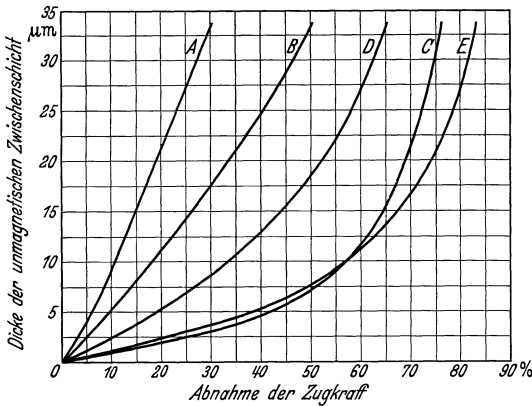


Abb. 143. Prozentuale Abnahme der Zugkraft zwischen verschiedenen Magneten und weichem Stahl in Abhängigkeit von der Dicke einer unmagnetischen Zwischenschicht. [Aus J. Res. Nat. Bur. Stand. Bd. 20 (1938) S. 359.]

	Magnet		Magnetische Sättigung in %	Zugkraft für blanken Stahl in g
	Dmr. in mm	Länge in mm		
A	5	150	100	270
B	2	30	100	41
C	2	30	15	6
D	1	30	80	6
E	0,75	30	100	2,5

5  $\mu\text{m}$ . Es wird empfohlen, die Eichkurve ab und zu an blankem Grundmaterial zu überprüfen, sowie an jeder Stelle mehrere Ablesungen zu machen und den Mittelwert zu bilden. Rauhe Oberflächen müssen vor der Messung geglättet werden.

Magnetische Schicht auf unmagnetischer Grundlage. Es handelt sich hier besonders um die Bestimmung der Dicke von Nickelüberzügen. Die mittlere Schichtdicke kann durch Wägung vor und nach der Vernickelung bestimmt werden; die örtliche Schichtdicke läßt sich aber nur durch Zerstörung der Nickelschicht oder des Grundmetalls ermitteln, und es erschien deshalb wünschenswert, ein zerstörungsfreies elektrisches Verfahren durchzubilden.

Verfahren kann auch die Dicke von Nickelüberzügen gemessen werden, da Nickel auf die benutzten Magnetstähle nur die halbe Anzugskraft ausübt wie Stahl. Natürlich ist eine besondere Eichung erforderlich und nur eine geringere Genauigkeit zu erreichen. Nickelüberzüge über 25  $\mu\text{m}$  können nicht gemessen werden.

Kombinierte Kupfer-Nickel-Überzüge können nur gemessen werden, wenn der Kupferüberzug weniger als 10% der Gesamtschichtdicke ausmacht. Der durchschnittliche Meßfehler ist  $\pm 10\%$  der Schichtdicke für Dicken über

Die Permeabilität von Nickel ist ungefähr 25% derjenigen von Eisen, und die anziehende Kraft zwischen einem Dauermagnet und einem Nickelüberzug von  $0,5 \dots 25 \mu\text{m}$  Dicke ist mit einer Genauigkeit von etwa 10% proportional der Dicke der Nickelschicht. Man kann also die Messung mit den vorher beschriebenen Geräten ausführen.

Freilich sind dabei verschiedene Einflußgrößen zu berücksichtigen. Bei größeren Schichtdicken als  $25 \mu\text{m}$  sind besondere Eichkurven erforderlich, da bei diesen Dicken der Zusammenhang zwischen Zugkraft und Schichtdicke nicht mehr linear ist. Ferner haben nach verschiedenen Verfahren hergestellte Überzüge verschiedene magnetische Eigenschaften.

Niederschläge aus Bädern hohen  $p_{\text{H}}$ -Gehaltes sind hart und feinkörnig und haben eine kleinere Permeabilität als weiche Niederschläge; sog. glänzende Nickelniederschläge aus Bädern mit organischen Zusätzen haben dagegen eine höhere Permeabilität. Die magnetischen Eigenschaften gleichen sich jedoch durch  $15 \dots 30 \text{ min}$  dauerndes Glühen bei  $400^\circ$  weitgehend aus. Das Verfahren kann also nach einmaliger Eichung nur für Nickelüberzüge gleichen

Herstellungsverfahrens verwendet werden, bei verschiedenen Herstellungsverfahren ist eine Glühung bei  $400^\circ$  oder eine besondere Eichkurve erforderlich.

Als Meßgerät kann jede empfindliche Waage für Kräfte von  $1 \dots 5 \text{ g}$  und einer Genauigkeit von 1% genommen werden. Der Meßmagnet ist zweckmäßig ein 2 mm dickes und 30 mm langes Stäbchen mit halbkugelig geschliffenem und poliertem Ende aus Kobalt-Chrom- oder Aluminium-Nickel-Stahl. Letzterer gibt bei gleichem Gewicht größere Zugkraft und bessere Proportionalität, läßt sich aber nur durch Schleifen bearbeiten. Die Oberfläche des Überzuges muß sauber und fettfrei sein und das Abziehen des Magnets senkrecht zur Fläche erfolgen, da sonst die Kraft nach einem  $\cos$ -Gesetz zu klein gemessen wird. Eine Abweichung von der Normalen um 10% gibt 2% Fehler. Die Zugkraft wird selbstverständlich nicht ausschließlich durch die Dicke des unmittelbar unter dem Magnetstäbchen liegenden Überzuges bestimmt, sondern von einer größeren Fläche, deren Durchmesser etwa fünfmal so

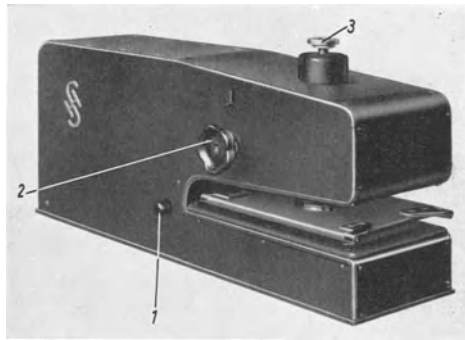


Abb. 144. Durchlaufkondensator für Gummidickenmessung. (Aus S. & H.-Druckschrift SH. 4461 S. 10.)

1 Schalter zum motorischen Anheben der oberen Kondensatorplatte; 2 Handrad zum Anheben der oberen Kondensatorplatte; 3 Einstellung des Plattenabstandes.

groß wie der Magnetdurchmesser ist. Der Abstand der Meßstelle von Ecken oder Rändern soll mindestens 2 Magnetdurchmesser betragen. Konkav gekrümmte Oberflächen bringen eine Verminderung der Zugkraft, und es muß bei kugelig gekrümmten Oberflächen der Kugelradius mindestens 5 Magnetdurchmesser, bei zylindrisch gekrümmten Flächen der Zylinderradius mindestens 2 Magnetdurchmesser betragen, wenn der Meßfehler 5% nicht überschreiten soll. Konkav gekrümmte Oberflächen geben natürlich eine Steigerung der Zugkraft. Auch bei doppelseitig

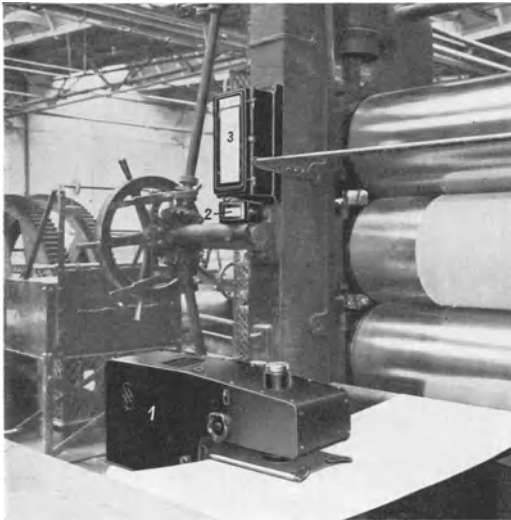


Abb. 145. 1 Kapazitiver Geber; 2 Anzeigegerät; 3 Schreibgerät.  
Gummiwaage an einem Kalander.  
(Aus S. & H.-Druckschrift 4461 S. 13.)

vernickelten Grundmetallen treten Meßfehler auf, und die Dicke der unmagnetischen Schicht muß mindestens 3 Magnetdurchmesser sein, wenn der Meßfehler nicht größer als 5% werden soll. Bei dünneren Schichtträgern sind Messungen auf beiden Seiten auszuführen. Da sich die Zugkraft zweier paralleler, dünner Nickelschichten aus der Summe der Zugkräfte der einzelnen Schichten bilden läßt, ist es bei gleicher Dicke beider Schichten möglich, nach diesem Verfahren

angenäherte Werte der Schichtdicke zu ermitteln. Zweckmäßiger erscheint es jedoch, die rückwärtige Nickelschicht zu entfernen oder, wenn dies nicht möglich ist, eine besondere Eichkurve aufzunehmen. Eine Verunreinigung des Nickelüberzuges mit Eisen oder Kobalt gibt pro 1% Eisengehalt + 4% Meßfehler, pro 1% Kobaltgehalt + 2% Meßfehler. Wir haben demnach als Einflußgrößen zu berücksichtigen: das Herstellungsverfahren, Verunreinigungen der Nickelschicht, Dicke des Grundmaterials bei doppelseitigen Überzügen, Oberflächenbeschaffenheit und Oberflächenkrümmung.

Unmagnetische Schicht auf unmagnetischer Grundlage. Das Idometer ist eine kapazitive Lehre und dient der laufenden Messung der Auftragsdicke eines nichtleitenden Werkstoffes auf einem anderen Nichtleiter. Es läßt sich anwenden, wenn die Dielektrizitätskonstanten der beiden Stoffe wesentlich verschieden sind, beispielsweise beim Auf-

tragen einer Gummischicht auf eine Stoffbahn, wie es bei der Herstellung gummierter Gewebe notwendig ist. Die genaue Einhaltung der richtigen Gummimenge ist bei solchen Geweben aus mechanischen und wirtschaftlichen Gründen gleich wichtig. Der kapazitive Geber hat die Form eines Durchlaufkondensators nach Abb. 144 mit einer isolierten festen und einer in 4 mm Abstand darüber liegenden geerdeten, beweglichen Platte, zwischen denen die gummierte Stoffbahn durchläuft. Um etwaige Verdickungen der Stoffbahn mit durchzulassen, kann die obere Platte bis auf 50 mm Abstand angehoben werden. Die wirksame Fläche des Kondensators ist 500 cm<sup>2</sup>. Abb. 145 zeigt den Anbau des Gebers an einen Gummikalander. Die Schaltung des Gerätes zeigt Abb. 146.

Ein stimmgabelgesteuerter Röhrensummer 1 liefert die Meßspannung von 800 Hz über einen Tiefpaß 2 zur Unterdrückung von Oberwellen auf die Kapazitätsmeßbrücke 3. An der Brückendiagonale liegt ein widerstandsgekoppelter Zweiröhrenverstärker 4 über einen Kondensator  $C_7$  zur Fernhaltung der durch die beträchtlichen statischen Aufladungen der Gummibahn auf der Platte des Meßkondensators influenzierten Gleichspannungen. Die verstärkte Meßspannung wird über den Regelwiderstand 8 auf eine fremderregte Gleichrichterbrücke 6 gegeben. Die Erregerspannung der Brücke wird gleichfalls hinter dem Tiefpaß abgenommen und mit dem Phaseneinsteller 5 auf richtige Phasenlage gebracht. Das Meßgerät kann anzeigend oder schreibend sein. Bei der Inbetriebsetzung wird der Werkstoff aus dem kapazitiven Geber entfernt und der Umschalter der Kapazitätsmeßbrücke auf Eichen ( $E$ ) gestellt, dann wird mit dem Kondensator  $C_2$  auf Nullausschlag des Meßgerätes eingestellt. Nun wird die Brücke auf Messen ( $M$ ) umgeschaltet, ein Normalwerkstück in den kapazitiven Geber gebracht und durch Verändern der Kapazität  $C_3$

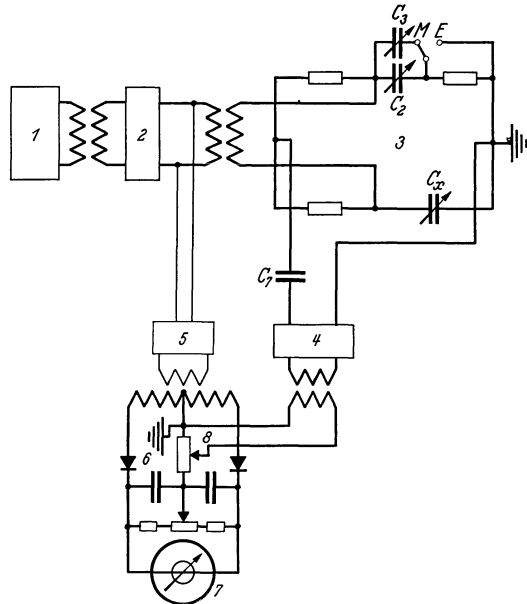


Abb. 146. Schaltung der Gummiswaage.

1 Tonfrequenzgenerator; 2 Tiefpaß zum Ausbleiben von Oberwellen; 3 Meßbrücke; 4 Verstärker; 5 Phasenregler für Gleichrichter-Erregung; 6 Anzeigebücke mit fremderregten Gleichrichtern; 7 Anzeiginstrument; 8 Regelwiderstand;  $C_2$  Justierkondensator;  $C_3$  Eichkondensator;  $C_7$  kapazitiver Geber;  $E$  Eichstellung;  $M$  Meßstellung.

des Meßkondensators influenzierten Gleichspannungen. Die verstärkte Meßspannung wird über den Regelwiderstand 8 auf eine fremderregte Gleichrichterbrücke 6 gegeben. Die Erregerspannung der Brücke wird gleichfalls hinter dem Tiefpaß abgenommen und mit dem Phaseneinsteller 5 auf richtige Phasenlage gebracht. Das Meßgerät kann anzeigend oder schreibend sein. Bei der Inbetriebsetzung wird der Werkstoff aus dem kapazitiven Geber entfernt und der Umschalter der Kapazitätsmeßbrücke auf Eichen ( $E$ ) gestellt, dann wird mit dem Kondensator  $C_2$  auf Nullausschlag des Meßgerätes eingestellt. Nun wird die Brücke auf Messen ( $M$ ) umgeschaltet, ein Normalwerkstück in den kapazitiven Geber gebracht und durch Verändern der Kapazität  $C_3$

die Brücke wiederum abgeglichen. Bei einer gesamten Meßkapazität von 150 cm ist die kleinste noch meßbare Kapazitätsänderung  $2 \cdot 10^{-3}$  cm, entsprechend einem Instrumentenausschlag von 1 mm. Die Meßempfindlichkeit ist also genügend hoch, die Meßgenauigkeit hängt nur von der Genauigkeit der verwendeten Normalien ab.

## II. Kraftmessung.

Durch das Meßgerät soll dem zu messenden System keinerlei Arbeit entzogen werden. Die Wegmessung soll also kraftlos, die Kraftmessung weglos erfolgen. Da diese Forderung bei der Mehrzahl der Weg- und Kraftmesser nicht erfüllt ist, und andererseits jeder meßbare Leistungsentzug den Ablauf eines Vorganges fälscht, schränkt sie das Anwendungsgebiet der elektrischen Geber erheblich ein, und es muß in jedem Anwendungsfall die Zulässigkeit des Meßverfahrens bzw. die Größe der zu erwartenden Fehler untersucht werden. Die günstigsten Geberanordnungen sind die mit der kleinsten Leistungsaufnahme. Diese allgemein gültige Binsenweisheit wird auch bei der elektrischen Messung von Strömen, Spannungen und Leistungen immer schon berücksichtigt, sofern der Eigenverbrauch gegenüber der zu messenden Größe ins Gewicht fällt, das Meßgerät also dem System eine merkbare Leistung entzieht. Die Hersteller von Meßgeräten arbeiten deshalb stets auf einen möglichst geringen Eigenverbrauch der Meßgeräte hin und geben seine Größe in ihren Listen an, damit der Benutzer in der Lage ist, sich ein Bild von der Anwendbarkeit zu machen. Genau dasselbe gilt für die hier betrachteten elektrischen Geber.

### 1. Dehnungsmesser [29].

Zug- und Druckspannungen an der Oberfläche von Werkstoffen können durch Messung der elastischen Dehnungen, also durch eine Wegmessung ermittelt werden. Das gilt in gleicher Weise für statische wie für dynamische Beanspruchungen. Die Dehnungsmesser sollen an der Kraftübertragung nicht teilnehmen, dem zu untersuchenden Werkstück also keine Leistung entziehen, da sie sonst den Spannungsverlauf beeinflussen. Sie sollen ferner geringe Trägheit und hohe Eigenfrequenz haben, um rasch verlaufenden Spannungsänderungen folgen zu können. Weiter sollen sie klein und leicht, sowie sicher und einfach zu befestigen sein und eine kleine Meßstrecke haben, damit sie auch an gekrümmten Bauteilen und schwer zugänglichen Stellen angebracht werden können. Unabhängigkeit von Erschütterungen und Beschleunigungen, sowie aperiodische Dämpfung ist eine weitere Forderung an die nach den verschiedenen Geberverfahren hergestellten Geräte.

Widerstandsverfahren. Auf dem wechselnden Spannungen unterworfenen Körper werden Streifen aus einem Material angebracht, das

seinen Widerstand bei mechanischer Zugbeanspruchung verändert. Die Widerstandsstreifen liegen in einem Stromkreis konstanter Spannung in Reihe mit einem einstellbaren Meßwiderstand, an dem die Wechselkomponente des Spannungsabfalls  $\Delta e$  abgegriffen, verstärkt und auf einen Kathodenoszillographen gegeben wird (Abb. 147). Der Ausschlag des Kathodenoszillographen ist

$$\alpha = K \cdot \Delta e = -K_1 \frac{U \cdot R_N \cdot \Delta R_x}{(R_x + R_N)(R_x + \Delta R_x + R_N)} \quad (98)$$

und für  $R_x = R_N = R$

$$\alpha = -K_2 \cdot \frac{\Delta R}{2R + \Delta R} \quad (99)$$

oder wenn  $\Delta R$  vernachlässigbar gegen  $2R$

$$\alpha = -K_2 \cdot \frac{\Delta R}{2R} \cdot \quad (100)$$

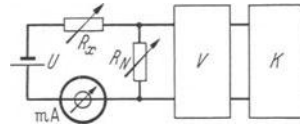


Abb. 147. Dehnungsmessung nach dem Widerstandverfahren.

$R_x$  zugabhängiger Widerstandsstreifen,  $R_N$  regelbarer Normalwiderstand;  $U$  Meßspannung;  $V$  Verstärker;  $K$  Kathodenoszillograph.

Die zugempfindlichen Widerstandsstreifen bestehen aus dünnem Papierband, auf dem in einer Entfernung von etwa 10 mm Elektroden aus 6 mm breiter Zinnfolie mit leicht beweglichen Zuführungen angebracht sind. Die Streifen werden mit Schellack auf den zu messenden Bauteil geklebt und nach dem Trocknen des Schellacks festgebügelt. Durch

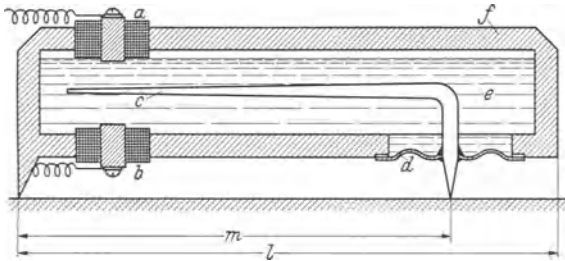


Abb. 148. Elektrolytischer Dehnungsmesser. [Aus Z. VDI Bd. 81 (1937) S. 295.]  
 a, b feste Elektroden; c bewegliche Elektrode; d Membran; e Elektrolyt; f Gehäuse; m Meßlänge 20 mm, l Gesamtlänge = 25 mm.

Ausstreichen des Elektrodenzwischenraumes mit einer Lösung kolloidalen Graphits in Alkohol erhält man einen mit dem Prüfling fest verbundenen Widerstandsstreifen von 5...40 k $\Omega$ , der seinen Widerstand proportional mit der Dehnung verändert. Der Widerstand des Meßstreifens wird zweckmäßig gleich dem Widerstand des äußeren Stromkreises gewählt. Umlaufenden Maschinenteilen wird die Meßspannung über Messingschleifringe und Kupferbürsten zugeführt. Das Verfahren eignet sich für Messungen, bei denen das Maschinenteil durch den Geber nicht belastet werden darf, sowie für sehr viele Meßstellen, da der Geber praktisch nichts kostet.

S. BERG setzt statt der Widerstandsstreifen einen nur 6 g schweren elektrolytischen Geber mit zwei Schneiden nach Abb. 148 auf den



Prüfling auf und mißt in einer Brückenschaltung das Verhältnis der Widerstände zwischen den festen Elektroden und der beweglichen Zunge.

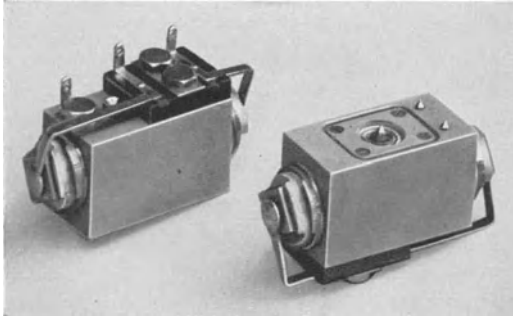


Abb. 149. Kohledehnungsmesser von Siemens & Halske.

Ähnlich arbeitet der in Abb. 149 gezeigte Kohledehnungsmesser, nur sind an Stelle der Elektrolytwiderstände zwei Kohlesäulen getreten, wodurch eine größere Verstellkraft, also eine sorgfältigere Aufspannung, erforderlich wird, während der Temperatureinfluß erheblich abnimmt. Infolge seines stabilen Aufbaues ist dieses Gerät erheblichen Beanspruchungen und rauher Behandlung gewachsen.

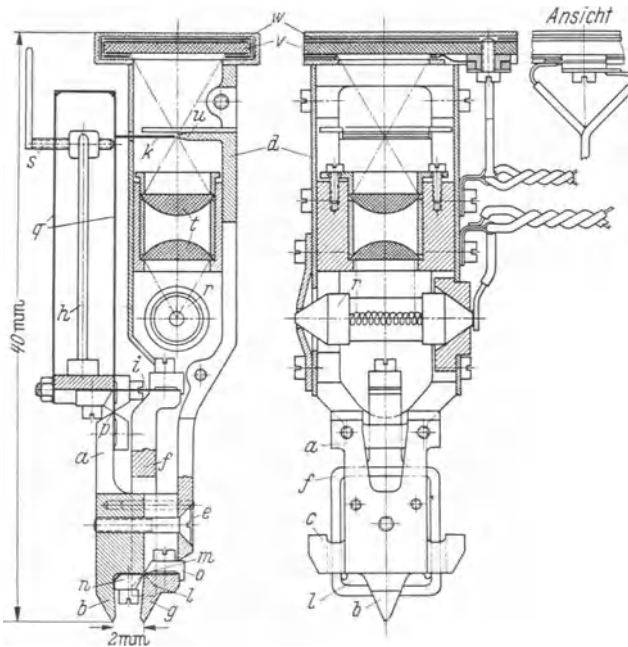


Abb. 150. Lichtelektrischer Dehnungsmesser. (Bauart Lehr-Askania.) [Aus Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Bd. 7 (1936) S. 67.]

*a* Grundgestell; *b* feste Spitze; *c* seitliche Schneiden für die Aufspannung; *d* Gehäuse für die Optik; *e* Befestigungsschraube für das Gehäuse *d*; *f* Rähmchen; *g* bewegliche Spitze; *h* Anzeigehobel; *i* Stoßband; *k* Steuerfahne; *l* Schneiden des Rähmchens; *m* Querfederband für das Rähmchen; *p* Federbandgelenk des Anzeigehobels *h*; *q* federnde Parallelführung für die Steuerfahne *k*; *r* Soffittlampe; *s* Nullpunkteinstellung; *t* Optik; *u* feste Fahne mit Blende; *v* Sperrschicht-Photozelle; *w* Glimmerisolierung.

Lichtelektrische Dehnungsmessung. Der lichtelektrische Dehnungsmesser von LEHR (Abb. 150) hat eine außergewöhnlich kleine Meßstrecke von nur 2 mm. Die Bewegung der Meßspitze *g* wird durch in Federbändern reibungsfrei gelagerte Hebel 50fach vergrößert auf die Schlitzblende *k* übertragen. In der Blendenebene wird der Faden einer mit konstantem Strom gespeisten Soffittenlampe *r* mit der Optik *t* abgebildet. Die Sperrschiebphotozelle *v* wird also proportional der Spaltbreite und somit der Dehnung ausgeleuchtet. Das Gerät ist völlig aus gehärtetem Werkzeugstahl hergestellt, 40 mm hoch und 15 g schwer. Es wird an den seitlichen Schneiden *c* mit der in Abb. 151 gezeigten Spannvorrichtung auf dem Prüfling befestigt. Um einen sicheren Sitz und den richtigen Schneidenabstand zu gewährleisten, wird die Meßstrecke mit einem Doppelkerner mit Federschlagwerk angekernt. Die Genauigkeit der Ankerleinrichtung ist  $\pm 2 \mu\text{m}$ ; der Anpreßdruck der Spannvorrichtung muß etwa 1 kg betragen und beide Spitzen müssen gleichmäßig belastet sein. Als Anzeige-Instrument kommt ein Drehspul-Mikroamperemeter in Betracht. Die Gesamtvergrößerung der Dehnung ist  $10 \cdot 10^3$  bis  $50 \cdot 10^3$ , die Eichkurve linear. Infolge der Befestigung in Kernen treten bei der ersten Belastung Nullpunktänderungen auf, jede Meßreihe ist also drei- bis viermal zu durchlaufen. Der Nullpunkt kann mit der Schraube *s* nachgestellt werden. Das Gerät eignet sich nur für statische Messungen, für dynamische Beanspruchung ist weder die Aufspanneinrichtung, noch die Konstruktion des Gebers, noch das träge Anzeige-Instrument geeignet. Wegen seiner kleinen Abmessungen kann das Gerät

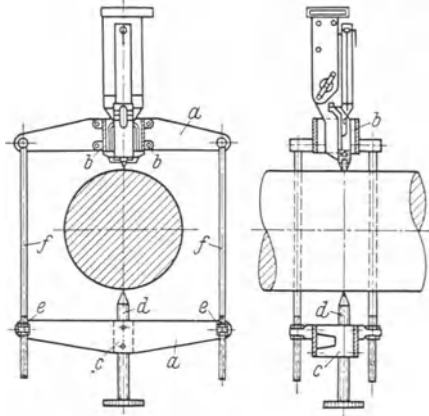


Abb. 151. Aufspannvorrichtung für den lichtelektrischen Dehnungsmesser. [Aus Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Bd. 7 (1936) S. 69.]  
*a* Traverse; *b* Pfannen für die Aufspannschneiden;  
*c* Mutter für die Spannschraube *d*;  
*d* Spannschraube; *e* Querbolzen; *f* Zugspeichen.

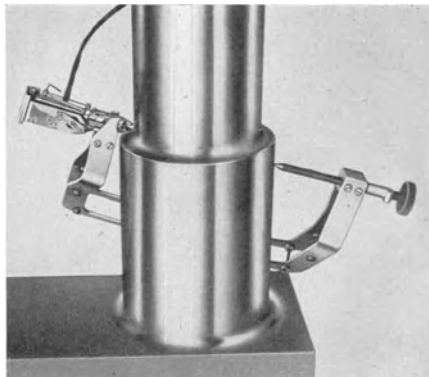


Abb. 152. Statischer Feindehnungsmesser an einer Hohlkehle (Bauart Lehr-Askania).

ist also drei- bis viermal zu durchlaufen. Der Nullpunkt kann mit der Schraube *s* nachgestellt werden. Das Gerät eignet sich nur für statische Messungen, für dynamische Beanspruchung ist weder die Aufspanneinrichtung, noch die Konstruktion des Gebers, noch das träge Anzeige-Instrument geeignet. Wegen seiner kleinen Abmessungen kann das Gerät

zur Messung der Spannungsverteilung an gekrümmten Werkstücken, Hohlkehlen (Abb. 152), Winkelecken, Kerben, Querbohrungen und Augen angewendet werden. Es lassen sich Hohlkehlen von 4 mm und Rundkerben von 5 mm Radius ausmessen. Längenänderungen von  $0,1 \mu\text{m}$  entsprechend einer Beanspruchung von  $1 \text{ kg/mm}^2$  bei Stahl sind bequem meßbar.

**Induktive Dehnungsmesser.** Der induktive Dehnungsmesser liegt in zahlreichen Ausführungsformen vor. In Abb. 153 ist der statische Dehnungsmesser der MPA, Darmstadt, gezeigt. Das Gerät wird mit

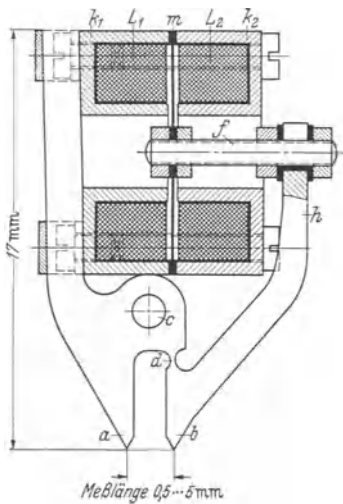


Abb. 153. Geber des induktiven statischen Spannungsmessers der MPA, Darmstadt. [Aus Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Bd. 5 (1934) S. 232.]  
*a* feste Schneide; *b* bewegliche Schneide;  
*c* Bohrung zum Aufspannen; *d* Steg (Drehpunkt);  
*f* Verbindungsbolzen; *h* Übertragungshebel;  
*k*<sub>1</sub>, *k*<sub>2</sub> Eisenkerne; *m* Membran; *L*<sub>1</sub>, *L*<sub>2</sub> Spulen.

Meßlängen von  $0,5 \dots 5 \text{ mm}$  ausgeführt, hat eine Bauhöhe von 17 mm und wiegt 5,5 g. Es besteht aus einem festen Rahmen mit der Schneide *a* und einem Hebel mit der Schneide *b*. Hebel und Rahmen sind

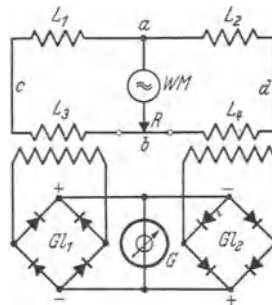


Abb. 154. Schaltbild des Empfängers des induktiven Dehnungsmessers der MPA Darmstadt. [Aus Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Bd. 9 (1938) S. 232.]  
*L*<sub>1</sub>, *L*<sub>2</sub> Doppeldrossel; *L*<sub>3</sub>, *L*<sub>4</sub> Primärwicklungen der Anpassungsübertrager; *WM* Wechselstromgenerator; *R* Brückenschleifdraht;  
*G* Galvanometer; *Gl*<sub>1</sub>, *Gl*<sub>2</sub> Trockengleichrichter.

aus einem Stück; Drehpunkt des Hebels ist der schmale Steg *d*. Durch die Bohrung *c* wird die aus Bügel und Blattfeder bestehende Aufspannvorrichtung geführt. Der Hebel *h* verstellt eine Stahlmembran *m* im Luftspalt einer topfförmigen Doppeldrossel *L*<sub>1</sub> und *L*<sub>2</sub>. Die Schaltung ist in Abb. 154 gezeigt. *L*<sub>1</sub> und *L*<sub>2</sub> sind die mit den Anpassungswandlern *L*<sub>3</sub> und *L*<sub>4</sub> in Reihe liegenden Geberdrosseln. Vor Beginn der Messung wird mit dem Potentiometerwiderstand *R* gleiche Stromverteilung in den beiden an den Wechselstromgenerator angeschlossenen Stromzweigen eingestellt. Die Zweigströme werden mit den Wandlern *L*<sub>3</sub> und *L*<sub>4</sub> übersetzt, mit den Trocken-Gleichrichtern *Gl*<sub>1</sub> und *Gl*<sub>2</sub> gleichgerichtet und ihre Differenz mit dem Drehspul-Instrument *G* gemessen. Die Anzeigervergrößerung beträgt  $3 \cdot 10^5$ , und eine Änderung der Spannungs-

beanspruchung um  $1 \text{ kg/mm}^2$  ergibt bei Stahl und einer Meßlänge von  $1 \text{ mm}$  einen Ausschlag von  $15 \text{ mm}$ .

Auch von der DVL wurde ein dynamischer Dehnungsmesser nach dem induktiven Verfahren entwickelt (Abb. 155). Der Geber besteht

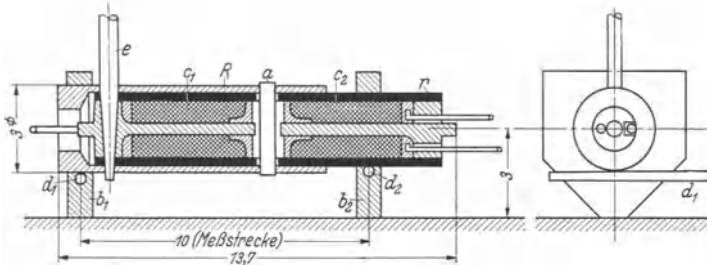


Abb. 155. Geber des induktiven dynamischen Dehnungsmessers der DVL. [Aus Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Bd. 9 (1938) S. 230.]

$a$  Magnetanker;  $b_1, b_2$  Tragböckchen mit Punktschweißung auf dem Prüfling befestigt;  $c_1, c_2$  Differential-Drosselspulen;  $d_1, d_2$  Tangentialkeile zur Befestigung der Röhren in den Böckchen;  $e$  Paßstift für die Nullstellung beim Aufsetzen des Geräts;  $R$  unmagnetische Hülse;  $r$  Eisenröhren.

aus einer unmagnetischen Hülse  $R$ , in der das Eisenröhren  $r$  verschiebbar gelagert ist. In das Eisenröhren sind die beiden Spulen  $c_1$  und  $c_2$ , in die unmagnetische Hülse der Eisenanker  $a$  fest eingebaut. Werden die beiden Hülzen gegeneinander verschoben, so vergrößert sich der Luftspalt zwischen der einen Spule und dem Eisenkern, während er sich zwischen der anderen und dem Eisenkern um denselben Betrag verringert. Die Mittelstellung ist durch den nach dem Aufspannen zu entfernenden Paßstift  $e$  gegeben. Der mittlere Luftspalt der Differenzdrossel ist  $\pm 100 \mu\text{m}$ , die maximale Verschiebung der Hülzen gegeneinander  $\pm 12 \mu\text{m}$ . Innerhalb dieses Bereiches kann der hyperbolische Zusammenhang zwischen Induktivität und Luftspalt als geradlinig verlaufend angesehen werden. Der Geber wird mit den Tangentialkeilen  $d_1, d_2$  in zwei auf den Prüfling aufgeschweißten Böckchen  $b_1, b_2$  befestigt, hat eine Meßlänge von  $1 \dots 10 \text{ mm}$  und ein Gewicht von  $0,5 \text{ g}$ . Seine Schaltung geht aus Abb. 156 hervor. Von einem Hochfrequenz-erzeuger  $1$  wird über den Übertrager  $2$  eine aus den Drosselspulen  $L_1$  und

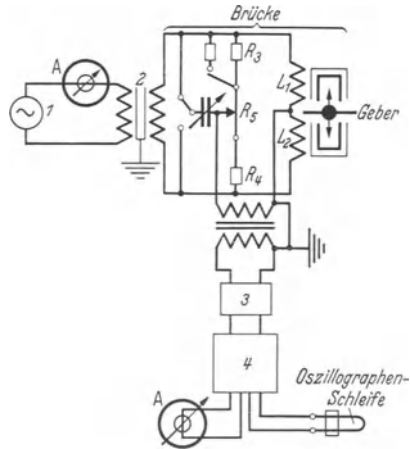


Abb. 156. Schaltbild des dynamischen Dehnungsmessers der DVL. [Aus Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Bd. 9 (1938) S. 230.]

$1$  Hochfrequenz-erzeuger;  $2$  Übertrager;  $L_1, L_2$  Drosselspulen;  $R_3, R_4$  Brückenwiderstände;  $3$  Siebkette;  $4$  Verstärker;  $R_5$  Brückenabgleichwiderstand.

$L_2$  und den Widerständen  $R_3$  und  $R_4$  bestehende Brücke gespeist. Am Brückenausgang liegt eine Siebkette 3 zum Fernhalten von Oberwellen, sowie ein Verstärker 4 mit Gleichrichterbrücke für den Anschluß der Anzeigergeräte. Mit dem Widerstand  $R_5$  wird die Brücke abgeglichen. Die Schaltung wurde aus dem früher beschriebenen Kraftverlaufmesser von Siemens & Halske entwickelt. Mit dem Gerät kann bei Stahl eine Meßgenauigkeit von  $\pm 0,25 \text{ kg/mm}^2$  erreicht werden. Die höchsten, verzerrungsfrei wiedergegebenen Frequenzen sind 1,2 kHz bei 5 kHz Trägerfrequenz bzw. 10 kHz bei 50 kHz Trägerfrequenz.

Selbstverständlich wurden auch kapazitive Dehnungsmesser gebaut; da sie jedoch keine besonderen Neuerungen gegenüber dem induktiven Verfahren bringen, kann auf ihre Beschreibung verzichtet werden.

## 2. Drehmomentmesser [30].

Die Torsionsbeanspruchung eines Drehstabes ist durch die gegenseitige Verdrehung zweier Stabquerschnitte gegeben. Es ist

$$\Theta = \frac{M_d \cdot l}{G \cdot J_p}, \quad (101)$$

wenn  $\Theta$  den Winkel der Drehverformung,

$M_d$  das Drehmoment [ $\text{kg} \cdot \text{cm}$ ],

$G$  den Gleitmodul [ $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ],

$J_p$  das polare Trägheitsmoment [ $\text{cm}^4$ ],

$l$  die Meßlänge [ $\text{cm}$ ],

$d$  Wellendurchmesser [ $\text{cm}$ ],

$\varphi$  Verdrehungswinkel [ $^\circ$ ]

bedeuten. Der Verdrehungswinkel zwischen den beiden Stabquerschnitten wird durch die gegenseitige Verschiebung zweier mit diesen Querschnitten fest verbundener Meßkörper induktiv oder kapazitiv gemessen. Auch die Drehmomentmessung wird also auf eine Wegmessung zurückgeführt. Dabei sind allerdings die mechanischen Konstanten der Welle,  $G$  und  $J_p$  als bekannt vorausgesetzt. Falls sie nicht mit genügender Genauigkeit festliegen, ist der Geber zusammen mit der Welle durch Belastung zu eichen. Für eine runde Welle gilt

$$M_d = \frac{\pi^2 \cdot d^4 \cdot G \cdot \varphi}{32 \cdot 180 \cdot l}. \quad (102)$$

Abb. 157 zeigt einen induktiven Geber für einen Wellendurchmesser von 120 und eine Meßlänge von 300 mm. Das Gerät wurde von der Siemens & Halske AG. entwickelt, es besteht aus zwei konzentrischen Bronzerohren, von denen das innere 1 den Eisenkern 3, das äußere 2 die Doppel-drossel 4 trägt. Der Eisenkern ragt durch eine Ausbrechung des äußeren Rohres in den Luftspalt der Drossel und kann durch Verschieben des Drosselträgers 5 genau auf Mitte eingestellt werden. Die zweiteiligen

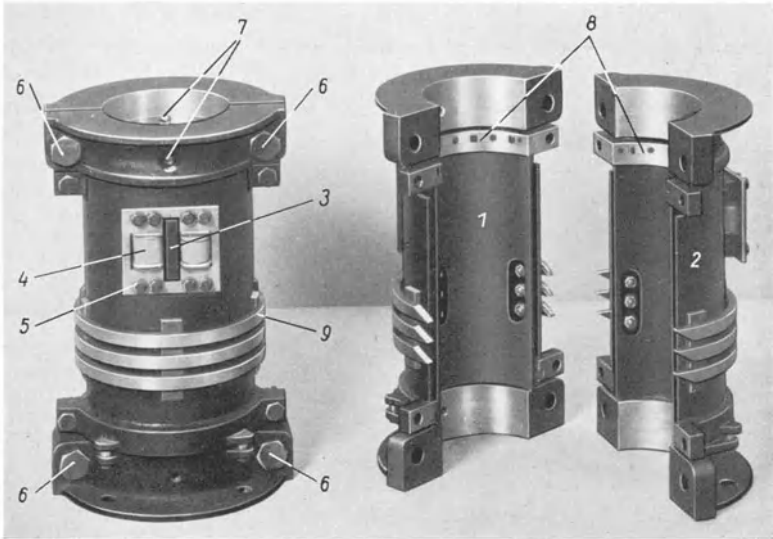


Abb. 157. Induktiver Verdrehungsmesser von Siemens &amp; Halske.

1 Inneres Rohr; 2 äußeres Rohr; 3 Eisenkern auf dem inneren Rohr; 4 Doppeldrossel auf dem äußeren Rohr; 5 verschiebbarer Spulenträger; 6 Befestigungsschrauben; 7 Löcher für die Kernerschrauben; 8 Rollenlager; 9 Schleifringe.

Rohre werden mit Spannschrauben 6 auf der Welle gehalten, durch gehärtete Kernerschrauben 7 genau fixiert und mit Rollenlagern 8 gegeneinander und gegen die Welle abgestützt, um Schwingungen durch Unwucht zu vermeiden. Die Stromzuführung erfolgt über drei Schleifringe 9 mit mehreren parallelen Bürstensätsen, um Ausschlagschwankungen durch wechselnden Bürsten-Übergangswiderstand und Springen der Bürsten zu verhindern. Für die Messung rasch verlaufender Drehmomentschwankungen wird das Gerät mit dem früher beschriebenen Kraftverlaufmesser und einem Oszillographen zusammen betrieben, während die verstärkerlose Schaltung nach Abb. 158 für die betriebsmäßige Überwachung des Drehmoments mit einem Anzeige- oder

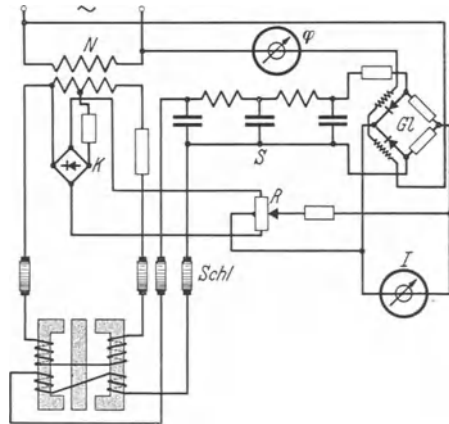


Abb. 158. 50 Hz-Schaltung für induktive Messungen. (Aus Arch. techn. Messen V 136—2.)

*N* Netzanschlußwandler; *S* Siebkette; *G* Gleichrichter; *J* Meßgerät;  $\varphi$  Phaseinstellung; *Schl* Schleifringe; *R* Nullpunkteinstellung; *K* Kompensationsgleichrichter.

betriebsmäßige Überwachung des Drehmoments mit einem Anzeige- oder

Schreibgerät genügt. Die Doppeldrossel ist dabei als Doppeltransformator gewickelt und wird über einen Konstanthalter aus dem Wechselstromnetz gespeist. Ihre Primärwicklungen sind in Reihe, die Sekundärwicklungen gegeneinander geschaltet. In der Mittelstellung heben sich die in den Sekundärwicklungen induzierten Spannungen auf. Bei

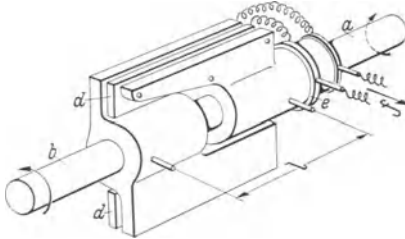


Abb. 159. Grundsätzlicher Aufbau des kapazitiven Verdrehungsmessers der Siemens & Halske AG. (Aus Arch. techn. Messen V 136—2.)

*a* Belastung; *b* Antrieb; *l* Meßblänge; *d* isolierte Platten; *e* isolierte Schleifringe; *f* Anschluß des Kraftlaufmessers.

einseitiger Stellung des Eisenkernes bleibt jedoch auf der Sekundärseite eine der Verdrehung proportionale Restspannung bestehen, die mit der Siebkette *S* von Oberwellen gereinigt, mit einer phasengesteuerten Gleichrichterbrücke *Gl* gleichgerichtet und mit dem Drehspul-Instrument *J* gemessen wird. Ebenfalls an den Netz-

wandler angeschlossen ist der Kompensationsgleichrichter *K*, von dem aus über das Potentiometer *R* eine kleine Gleichspannung der Meßspannung überlagert werden kann, um Nullpunktabweichungen elektrisch auszugleichen. Man erspart sich dadurch die genaue Null-

einstellung an dem oft schwer zugänglichen Geber. Speist man die Einrichtung anstatt aus der konstanten Spannungsquelle aus einem von der Welle selbst angetriebenen Drehzahlgeber, dessen Spannung der Drehzahl proportional ist, so ist die Anzeige des Instrumentes *J* ein Maß für das Produkt Drehzahl mal Drehmoment, also

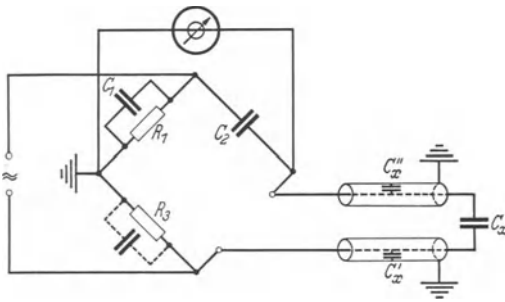


Abb. 160. Erdung der 5000 Hz-Brücke für kapazitive Messungen. (Aus Arch. techn. Messen V 136—2.)

$C_x$  Kapazitiver Geber;  $C'_x, C''_x$  Kabel- und Schaltungskapazitäten;  $R_1, R_2, R_3, C_1, C_2$  Kapazitäts-Meßbrücke.

Wellenleistung. Bei elektrischen Antrieben kann man diese Leistung freilich bequemer durch die Messung der Leistungsaufnahme des Antriebsmotors ermitteln.

Ganz ähnlich arbeitet der in Abb. 159 gezeigte kapazitive Drehmomentmesser von Siemens & Halske. Um den Einfluß von Biegemomenten auf die Messung auszuschalten, ist der Geber symmetrisch aus zwei um  $180^\circ$  gegeneinander versetzten und parallel geschalteten Plattenpaaren aufgebaut. Die Kapazitätsänderung wird mit dem bereits erwähnten Kraftverlaufmesser und einem Oszillographen gemessen. Der

für das Produkt Drehzahl mal Drehmoment, also

Einfluß der Kapazität des Zuführungskabels wird durch zweckentsprechende Erdung des Kraftverlaufmessers, der Einfluß des Isolationszustandes und des Kabelwiderstandes durch Wahl der Schaltphase der Gleichrichterbrücke weitgehend ausgeschaltet. Die grundsätzliche Anordnung ist in Abb. 160 noch einmal gezeigt. Die Teilkapazität  $C'_x$  erscheint zum Widerstand  $R_3$  parallel geschaltet und wird mit dem Kondensator  $C_1$  kompensiert. Die Teilkapazität  $C''_x$  erscheint zum Diagonalzweig parallel geschaltet, beeinflußt also die Abstimmung nicht. Die Zuführungskabel sind selbstverständlich geschirmt. Der kapazitive Verdrehungsmesser eignet sich besonders für wissenschaftliche Untersuchungen an Antrieben mit stark und kurzzeitig wechselndem Drehmoment, z. B. Propeller- und Walzwerksantrieben. Zwei Ausführungen für verschiedene Wellendurchmesser sind in Abb. 161 gezeigt. In der folgenden Abb. 162 ist der kleinere Geber geöffnet.

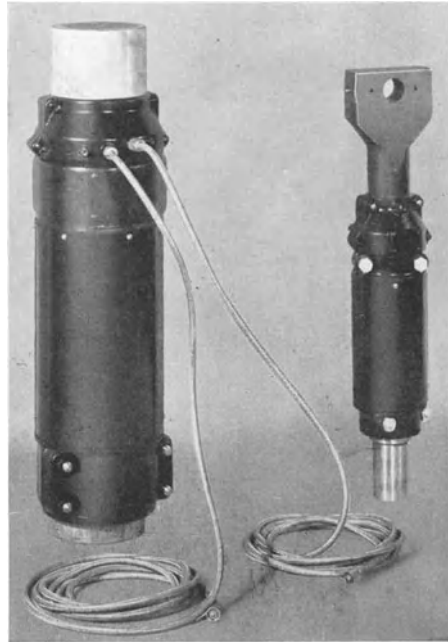


Abb. 161. Kapazitiver Drehmomentmesser von Siemens & Halske.



Abb. 162. Kapazitiver Verdrehungsmesser von Siemens & Halske, Bürstenhalter und Schutzhaube abgenommen. (Aus Arch. techn. Messen V 136—2.)

### 3. Druckmeßdosen[31].

Die Forderung der weglassen Kraftmessung wird weitgehend vom magnetoelastischen Verfahren erfüllt, bei dem die Permeabilitätsänderung ferromagnetischer Werkstoffe,



vorzugsweise von Nickel-Eisen-Legierungen mit 30...80% Nickelgehalt, unter dem Einfluß elastischer Spannungen gemessen wird. Grundsätzlicher Aufbau der Meßdosen, Schaltung und Einflußgrößen wurden bereits

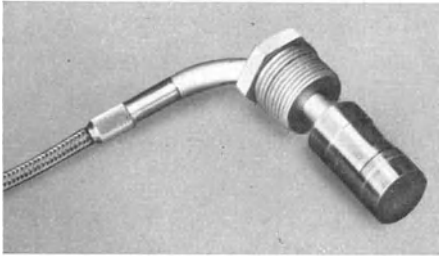


Abb. 163. Magnetoelastische Druckmeßdose für 500 kg mit wasserdichtem axialen Anschluß.

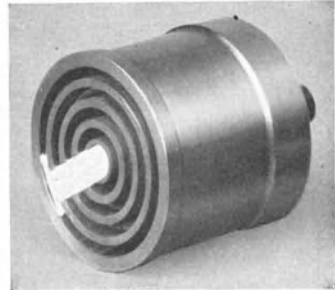


Abb. 164. Magnetoelastische Druckdose für 10 t ohne Deckel.



Abb. 165. Magnetoelastische Druckdose für 100 t. (Aus Arch. techn. Messen V 132—15.)

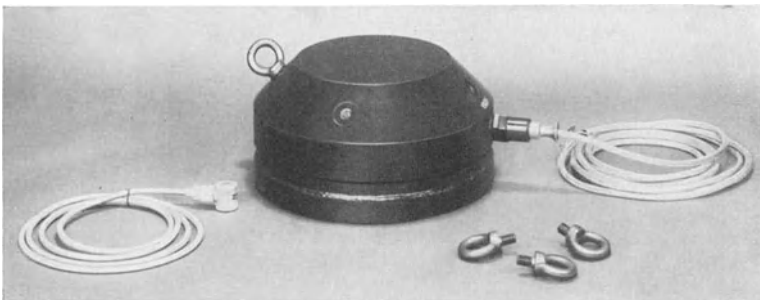


Abb. 166. Magnetoelastische Druckdosen für 0,1 und 1000 t. (Aus Arch. techn. Messen V 132—15.) Gewichte der Meßdosen 0,1 t = 250 g, 1000 t = 250 kg.

früher ausführlich besprochen. Die Ausführung der Dosen richtet sich nach Meßbereich und Anwendungsgebiet. Die Dosen werden vorzugsweise aus massiven Permalloykörpern mit eingestochenen Nuten hergestellt und nach dem Einlegen der Erregerspulen verschweißt. Die

maximale Druckbeanspruchung der Meßkörper wird zu  $6 \dots 8 \text{ kg/mm}^2$  gewählt. Überlastungen von 100% beschädigen die Dosen nicht. Abb. 163

zeigt eine 500 kg-Dose mit wasserdichtem, axialen Anschlußkrümmer, Abb. 164 eine 10 t-Dose ohne Deckel mit den eingelegten Spulen und dem zur Vermeidung von Beschädigungen beim Schweißen mit Asbest abgedeckten Kabelkanal. Eine noch unverschweißte 100 t-Dose ist in Abb. 165 gezeigt und in Abb. 166 sind zwecks Größenvergleich eine 0,1 und eine 1000 t-Dose einander gegenübergestellt. Über die Meßgenauigkeit und die Einflußgrößen ist hier zu wiederholen: Der Nullpunkt ändert sich um 1...2% je 10% Spannungsänderung, während in die Empfindlichkeit die Netzspannungsschwankungen proportional eingehen. Die

magnetoelastischen Dosen müssen deshalb mit Spannungsgleichhaltern betrieben werden. Schwankungen der Frequenz gehen voll in die Messung

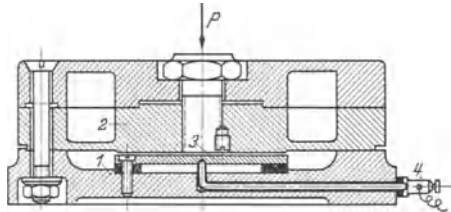


Abb. 167. Kondensatormessdose. (Aus Arch. techn. Messen V 132—5.)

1 Grundplatte; 2 Biegeplatte; 3 isolierte Elektrode; 4 Anschlußklemme.



Abb. 168. Kapazitive Druckdose mit Biegeplatte für 100 t (Ausführung Siemens & Halske AG.).

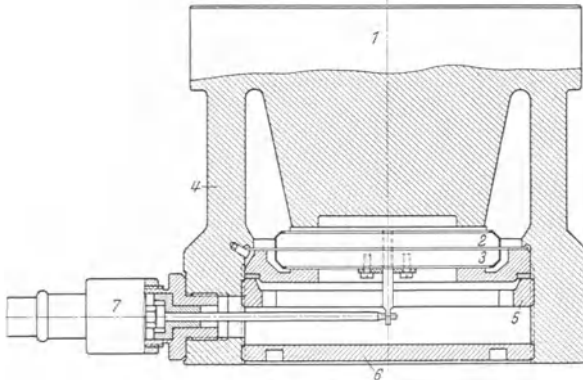


Abb. 169. Kapazitive Druckdose mit Stauchzylinder (Ausführung Siemens & Halske AG.).

1 Deckplatte; 2 bewegliche Elektrode; 3 isolierte Elektrode; 4 Stauchzylinder; 5 Einstellmutter; 6 Abschlußplatte; 7 Kabelanschluß.

ein, es ist also auch die Frequenz der Meßspannung konstant zu halten. Der Temperaturfehler beträgt  $0,2 \dots 0,5\%$  je  $10^\circ$ . Durch Alterung der

Meßdosen vor der Eichung wird der mechanische Hysteresefehler auf weniger als 1% herabgedrückt. Unter der Voraussetzung konstanter Spannung und Frequenz kann eine Gesamtgenauigkeit von  $\pm 2\%$  zugesagt werden. Die Eichung erfolgt mit geeichten hydraulischen Pressen. Das

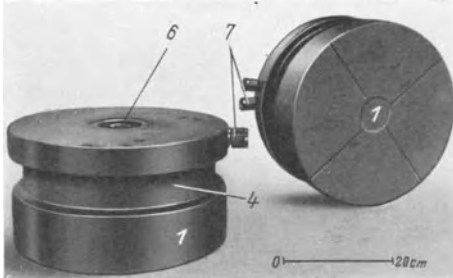


Abb. 170. Kapazitive Druckdose für 800 t (Ausführung Siemens & Halske AG.).

1 Deckplatte; 4 Stauchzylinder; 6 Abschlußplatte;  
7 Kabelanschluß.

magnetoelastische Verfahren wurde bisher hauptsächlich im Schiffbau und im Walzwerksbetrieb, sowohl zu wissenschaftlicher Untersuchung wie zu ständiger Betriebsüberwachung angewendet. Im Schiffbau wurde der Propellerschub bei Mehrschraubenantrieben mit einer Anzahl in die Drucklager eingebauter Dosen aufgeschrieben und gab ein

außerordentlich interessantes Bild vom Verlauf der Reise, Beanspruchung der Wellen und Maschinen bei Manövern und von der Geschicklichkeit der Schiffsführung. Im Hüttenbetrieb werden Walzdruck und Haspelzug überwacht. Daneben hat sich das Verfahren bei einer Reihe anderer Meßeinrichtungen bewährt, von denen die Überwachung von Druckspannungen in Betonbauwerken, Talsperren, Kaimauern usw. erwähnt sei.

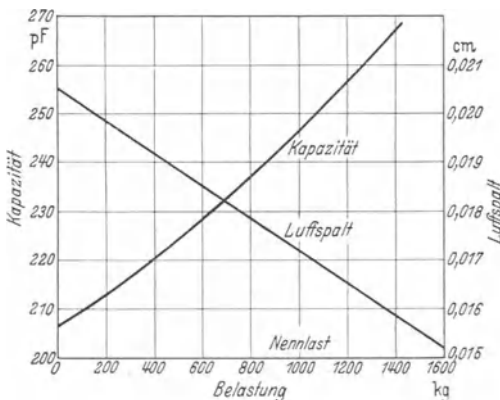


Abb. 171. Änderung der Kapazität und des Luftspaltes mit der Belastung bei einer Druckmeßdose für 1000 kg Nennlast. (Aus Arch. techn. Messen V 132—16.)

Auch bei der kapazitiven Druckmessung können die Wege sehr klein gehalten werden. Die kapazitiven Meßdosen bestehen aus einem stählernen Meßkörper in Form einer Biegeplatte oder eines Stauchzylinders mit einer isoliert eingesetz-

ten festen und einer in sehr geringem Abstand darüber befindlichen beweglichen Elektrode. Der Meßweg entspricht also nur der elastischen Formänderung des Stahlkörpers, und es bestehen keine Bedenken gegen den Einbau der Dose in die Kraftleitung. Die Dosen umfassen alle Meßbereiche vom Schalldruckmesser bis zum Walzdruckmesser. Die Kapazität beträgt etwa 200 pF, die Kapazitätsänderung von etwa

5...10% wird nach einem der beschriebenen Verfahren gemessen. Abb. 167 zeigt einen Schnitt, Abb. 168 die Ausführung einer kapazitiven Siemens & Halske-Meßdose für 100 t mit Biegeplatte, wobei die Biegeplatte die Form einer allseitig eingespannten Ringmembran erhielt, um eine genaue Parallelverschiebung der Elektrode zu erzielen. Die Stauchzylinder-Ausführung ist in den Abb. 169 und 170 gezeigt. Abb. 171 zeigt Kapazitäts- und Luftspaltänderung einer 1 t-Dose.

Die induktiven Meßdosen entsprechen in ihrem Aufbau völlig den kapazitiven, nur stehen sich anstatt der beiden

Kondensatorplatten eine Drosselspule und ein Eisenkern gegenüber und der Meßweg ist im allgemeinen größer.

Auch die Kohledruckmesser sind ähnlich aufgebaut, wie Abb. 172 an verschiedenen Ausführungen von 0,1...1000 t zeigt. Eine Kohledose in einer Fassung zur Aufnahme von Zugkräften ist in Abb. 173 wiedergegeben. Die Kohledruckdosen haben innerhalb des Meßbereiches eine lineare Charakteristik und sind 100% überlastbar, bei höheren Überlastungen nähert sich die Eichkurve asymptotisch einem Endwert. Temperaturänderungen um 50° rufen keinen merklichen Anzeigefehler hervor,

doch macht sich zwischen steigender und fallender Belastung ein mechanischer Hysteresefehler in Höhe von 1...3% bemerkbar. Die Dosen werden mit 2 V Gleichspannung betrieben und ihr Widerstand in einer Differenzschaltung mit einem Normal verglichen.



Abb. 172. Kohle-Druckmeßdosen für 1000; 100; 10; 0,1 t Meßbereich (Ausführung Rumpff, Bonn). (Aus Rumpff-Druckschrift 750—2.)



Abb. 173. Kohle-Zugmeßdose (Ausführung Rumpff, Bonn). (Aus Rumpff-Druckschrift 750—2.)

Meßbereich	Länge	Dmr.
200 kg	120 mm	30 mm
2000 kg	210 mm	70 mm

#### 4. Schnittkraftmesser.

Die Entwicklung und Untersuchung spanabhebender Werkzeugmaschinen benötigt ein Verfahren zum Messen der Kräfte zwischen Arbeitsstahl und Werkstück. Beim Drehen treten Kräfte in drei Richtungen auf: Hauptschnittkraft, Vorschubkraft und Rückdruckkraft; ihr

Größenverhältnis ist durch die Meißelform bestimmt. Nach SCHALLBROCH genügt für die Berechnung der Antriebsleistung die Kenntnis der Hauptschnittkraft und die Berücksichtigung der beiden anderen

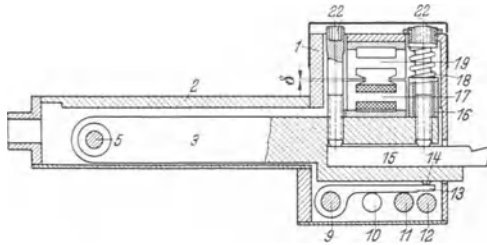


Abb. 174. Einkomponenten-Meßstahlhalter.

1 Gehäuse-Oberteil; 2 Gehäuse; 3 Pendelkörper; 5 Drehachse des Pendelkörpers; 9 Drehachse der Membran 13; 10 Bohrung für Bolzen 11 zur Meßbereichänderung; 11 Stützbolzen der Membran 13; 12 Anschlagbolzen der Membran zur Bewegungsbegrenzung; 13 Membran; 14 Druckstück; 15 Drehstahl; 16 Zwischenstück zur Übertragung des Druckes der Schraubenfeder; 17 Drosselkern mit Wicklung; 18 Schraubenfeder; 19 Drosselkern ohne Wicklung; 22 Halteschrauben für Drehstahl.

Komponenten durch Zuschläge, doch wurden auch Dreikomponenten-Meßgeräte entwickelt. Bei diesen muß der Meißel in drei Ebenen verstellbar gelagert sein und darf nur sehr kleine Wege machen, damit die Kraftverhältnisse nicht durch die Meißelbewegung gefälscht werden. Der Einkomponenten-Meßstahlhalter nach Abb. 174 zeigt die Schnittkraft in der Schnittrichtung nach dem induk-

tiven Verfahren an. Der Geber besteht aus dem Gehäuse 2, in dem der Stahlhalter 3 um den Bolzen 5 drehbar gelagert ist. Der Meißel 15 wird



Abb. 175. Einkomponenten-Schnittkraftmesser und Anzeigegerät (Ausführung Siemens & Halske A.G.).

mit den Druckbolzen 22 in den Stahlhalter eingespannt und mit diesem durch die Feder 18 mit seinem Druckpimpel 14 auf die Membran 13 gedrückt. Biegt sich die Membran infolge des Schnittdruckes durch, so vergrößert sich der Luftspalt  $\delta$  zwischen dem auf dem Stahlhalter sitzenden bewickelten Eisenkern 17 und dem im Gehäuse befestigten

unbewickelten Kern *19*, und die Induktivitätsänderung wird in einer Brückenschaltung gemessen. Die Membran *13* ist in der Drehachse *9* gelagert und durch den Bolzen *11* abgestützt. Der Meßbereich wird durch Umstecken des Bolzens *11* in das Loch *10* geändert, wodurch die freie Länge der Membran vergrößert, die Empfindlichkeit also gesteigert wird. Die Durchbiegung der Membran bei Überschreitung des Meßbereiches begrenzt der Bolzen *12*. Abb. 175 ist eine Ansicht des Meßstahlhalters mit dem Anzeige-Instrument; die Schaltung ist in Abb. 176 wiedergegeben. Vom

Wechselstromnetz wird über einen Konstanthalter *1* der Wandler *2* gespeist, an dessen Sekundärklemme die Meß- bzw. Vergleichsdrossel *3* und *4* und zwei Gleichrichter

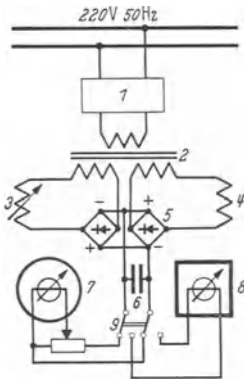


Abb. 176. Schaltung des Schnittkraftmessers von Siemens & Halske.

*1* Konstanthalter; *2* Wandler; *3* Meßdrossel; *4* Vergleichsdrossel; *5* Gleichrichter; *6* Glättungskondensator; *7* Anzeigeelement; *8* Schreibgerät; *9* Umschalter.

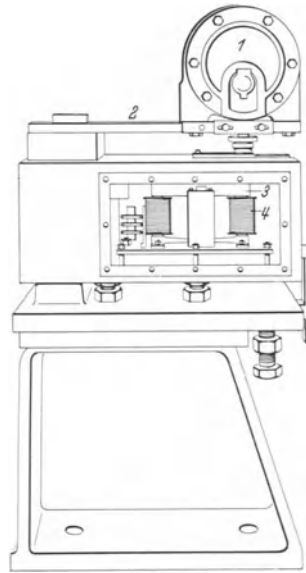


Abb. 177. Zugkraftmesser für Walzwerke. [Electr. Engng. Bd. 56 (1937) S. 1143.]

*1* Ablenkwalze; *2* Biegungsfeder; *3* schneidengelagerter Anker; *4* Meßdrossel.

in Graetz-Schaltung liegen. Der mit dem Kondensator *6* geglättete Differenzstrom wird mit einem Drehspul-Instrument angezeigt oder registriert. Der Schnittkraftmesser kann für Werkzeugmaschinen verwendet werden, deren Stahlhalter einen Querschnitt von  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  zu spannen gestatten. Der Drosselluftspalt beträgt  $0,18 \text{ mm}$ , die maximale Bewegung des Meißels  $0,2 \text{ mm}$ .

Andere Schnittkraftmesser wurden nach dem kapazitiven Verfahren von MAUKSCH, nach dem piezoelektrischen Verfahren von KLUGELINCKH, nach dem elektrolytischen bzw. induktiven Verfahren von OPITZ entwickelt. Letzterer wird von *Schiess-Defries* als Dreikomponentengerät ausgeführt.

### 5. Zugkraftmesser.

Wenn der Einbau eines entsprechenden Gehänges möglich ist, lassen sich Zugkräfte mit Druckdosen messen; wo es nicht möglich ist, können

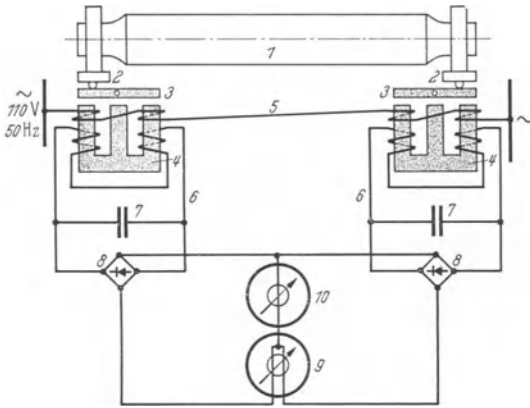


Abb. 178. Schaltung des Zugkraftmessers für Walzwerke.  
 1 Ablenkwalze; 2 Biegefeder; 3 schneidenagelagerter Anker;  
 4 Meßdrossel; 5 Erregerwicklung; 6 Meßwicklung;  
 7 Siebkondensator; 8 Gleichrichter; 9 Anzeiginstrument  
 für Gesamtzug; 10 Anzeiginstrument für Differenzzug.

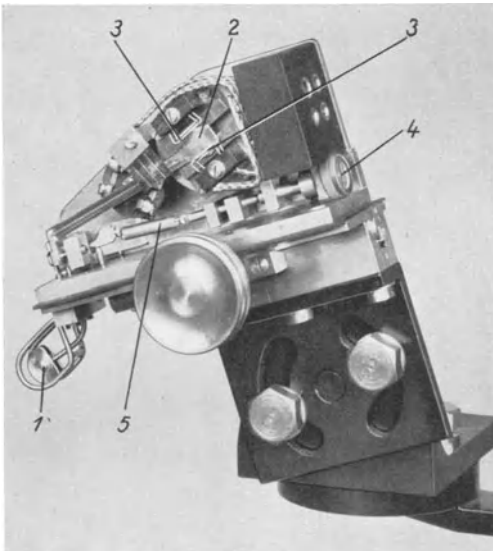


Abb. 179. Bolometerkopf für Fadenspannungsmesser  
 (Ausführung Siemens & Halske AG.).

1 Tastrohle; 2 Bolometerfahne; 3 Bolometerwendel;  
 4 Einstellschraube; 5 Spannfeder.

Zugspannungen in Bändern, Drähten, Seilen oder Fäden aus der für eine bestimmte Durchbiegung erforderlichen Kraft ermittelt werden.

Bei den Walzen- und Haspelzugmessern wird das Walzgut durch eine zwischen 2 Führungswalzen angeordnete Meßwalze mit einer bestimmten Kraft durchgebogen und der Biegeungspfeil gemessen (Abb. 177). Die Meßwalze 1 wird von

den Blattfedern 2 gegen die Stoffbahn gedrückt und lenkt sie um einen Winkel  $\alpha$  aus der Geraden ab. Der schneidenagelagerte Anker 3 einer Meßdrossel 4 verstellt sich entsprechend der Bewegung der Meßwalze und ändert die Flußverteilung auf die beiden äußeren Drosselschenkel. Bezeichnet  $Z$  den Walzenzug,  $P$  die auslenkende Kraft und  $\alpha$  den Auslenkwinkel, so ist

$$\sin \alpha = \frac{P}{Z}.$$

Bei sehr breiten Bändern lagert man die Meßwalze auf beiden Seiten auf getrennten Federn und kann dann sowohl den Gesamtzug, wie auch mögliche Ver-

schiedenheiten der Zugkraft an beiden Seiten der Blechbahn messen. Die Schaltung ist in Abb. 178 wiedergegeben. Die dreischenkeli-

Meßdrosseln 4 werden durch zwei auf den Außenschenkeln angebrachte Erregerwicklungen 5 mit konstanter Spannung gleichmäßig erregt. Bei symmetrischer Stellung des Ankers 3 ist auch die Flußverteilung symmetrisch und die induzierten Spannungen in den Meßspulen 6 sind entgegengesetzt gleich. Eine Verdrehung des Ankers ruft einen Ausgleichstrom hervor, der nach Gleichrichtung mit dem Gleichrichter 8 in einem Drehspul-Instrument angezeigt wird. Ist noch ein zweiter Geber vorhanden und verlaufen die Eichkurven linear, so kann mit Summen- und Differenzstrommesser der Gesamtzug, sowie die Verschiedenheit der Zugkräfte auf beiden Seiten der Blechbahn angezeigt werden. Die genaue Höhe der Meßwalze muß sorgfältig justiert und bei Abnutzung nachgestellt werden. Die Durchbiegung der Blechbahn beträgt 50...75 mm bei einem Abstand der Walzengerüste von 3...6 m. Voraussetzung für die Richtigkeit der Zugmessung ist bei diesem Verfahren, daß die Kraft für die Durchbiegung der ungespannten Blechbahn vernachlässigbar klein ist.

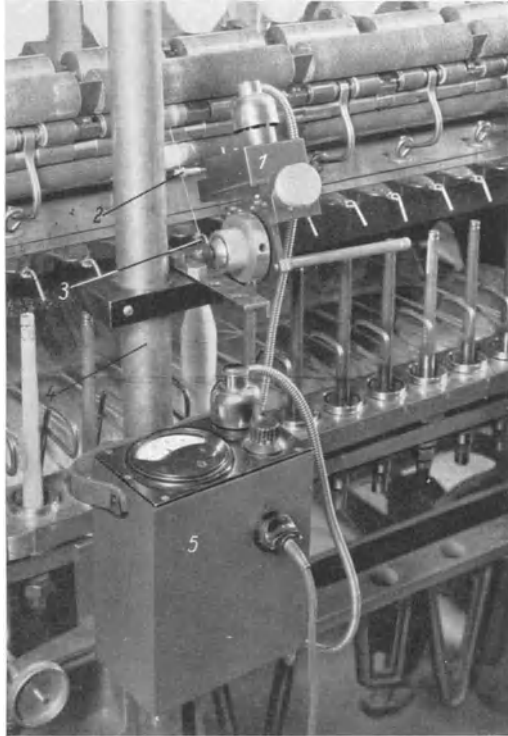


Abb. 180. Siemens-Fadenspannungsmesser an einer Ringspinnmaschine.  
1 Bolometerkopf; 2 Tastrolle; 3 Fadenauge; 4 verstellbares Stativ; 5 Netzanschlußgerät und Anzeigegerät.

In einer völlig anderen Größenordnung liegt der Meßbereich des bolometrischen Fadenspannungsmessers, mit dem die Fadenspannung an Spinnmaschinen eingestellt wird mit dem Ziel, durch höhere Laufgeschwindigkeit die Produktion zu steigern, ohne die Zahl der Fadenbrüche zu vermehren. Der Faden wird von einer einstellbaren Feder mit einer Kraft von 2...500 g durchgebogen und die Bewegung des Tasthebels auf eine Bolometerfahne übertragen. Die Übersetzungshebel sind in Steinen und Spitzen gelagert. Abb. 179 zeigt den geöffneten Bolometerkopf, Abb. 180 den Anbau von Geber und Anzeigegerät an eine Ringspinnmaschine.



## 6. Druckindikatoren [32].

Die Gas- und Flüssigkeitsdruckmessung hat vor allem die Aufgabe, das Druck-Wegdiagramm bzw. das Druck-Zeitdiagramm von Kraftmaschinen aufzunehmen, woran sich als Sondergebiet die Messung des Verbrennungsdruckes in Feuerwaffen anschließt. Diese Vorgänge sind zumeist mit starken Temperaturschwankungen, sowie Erschütterungen verbunden und verlaufen außergewöhnlich schnell, so daß an die Meßgeräte in erster Linie die Forderungen hoher Frequenz, Unempfindlichkeit gegen Erschütterungen und Beschleunigungen und geringen Temperatureinflusses gestellt werden müssen. Ihr Aufbau darf weder den Druckraum verändern, noch den Druckverlauf beeinflussen. Statische Eichung, leichte Veränderung des Meßbereiches und Berücksichtigung des Atmosphärendruckes sind weitere Gesichtspunkte für die Wahl des Meßverfahrens. Die Aufzeichnung erfolgt im allgemeinen zeitabhängig. Für die Darstellung des üblichen Druck-Wegdiagramms

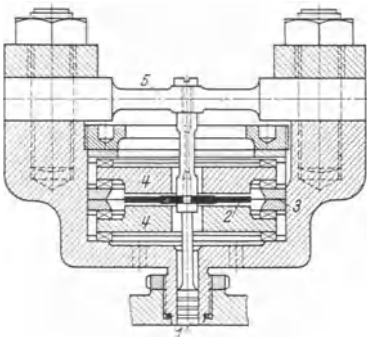


Abb. 181. Kapazitiver Geber für Ladedruckmessung.  
[Aus Autom.-techn. Z. Bd. 37 (1934) S. 525].  
1 Kolben; 2 Membran;  
3 Membraneinspannung; 4 feste Elektroden;  
5 auswechselbare Gegenfeder.

mechanischer Indikatoren eignet sich besonders der Kathodenoszillograph, wenn an Stelle der Zeitablenkung eine vom Kolbenweg gesteuerte Spannung tritt. Betrachten wir zunächst das *kapazitive Verfahren* an Hand eines Gebers zur Druckaufzeichnung in Brennstoffleitungen (Abb.181).

Die Forderung hoher Eigenfrequenz wurde bei diesem Gerät durch möglichst kleine Masse und geringen Weg der beweglichen Teile zu erfüllen versucht, da eine Erhöhung der verfügbaren Kraft durch Vergrößerung des Kolbendurchmessers nicht anging. Der Geber besteht aus dem Druckkolben 1, der geerdeten Membran 2 als beweglicher Elektrode zwischen den isolierten festen Elektroden 4 und der auswechselbaren Meßfeder 5. Die bewegliche Elektrode ist in der Mitte versteift und stellt somit eine Ringmembran dar, deren Mittelteil eine reine Parallelbewegung ausführt, wie es auch die Biegeplatten der früher beschriebenen kapazitiven Druckdosen tun. Die beiden festen Elektroden und die Membran bilden einen kapazitiven Spannungsteiler mit dem Meßweg  $x$  und dem Plattenabstand  $a$ , dessen Charakteristik innerhalb des Meßbereiches als linear angesehen werden kann, da die Membrandurchbiegung gegenüber dem Plattenabstand sehr klein ist. Bezeichnen  $U_1$  und  $U_2$  die Teilspannungen und  $U$  die Gesamtspannung, so gilt für die Spannungsänderung und die Anzeige des Meßgerätes

$$\Delta U = U_1 - U_2 = U \frac{x}{a}. \quad (103)$$

Dabei ist eine gegenüber der Meßkapazität von 80...100 cm vernachlässigbar kleine Schaltungskapazität vorausgesetzt. Die Membran besteht aus 0,08...0,15 mm dickem, halbhartem Messing und hat einen Außendurchmesser von 11, einen Innendurchmesser von 6 mm. Das Gewicht der bewegten Teile ist 4 g, der Meßweg 2,5  $\mu$ m. Der Meßbereich kann durch Auswechseln der Meßfeder 5 verändert werden. Die Schaltung ist in Abb. 73, Schaltung eines kapazitiven Spannungsteilers mit Röhrenvoltmeter, wiedergegeben. Von einem Hochfrequenzgenerator 1 wird über den Eingangswandler 2 der kapazitive Spannungsteiler  $C_x$  gespeist, dessen Teilspannungen zwei in einer Brückenschaltung liegenden Verstärkerröhren 6 zugeführt werden. Die Widerstände 7 bilden die beiden anderen Zweige einer Wheatstone-Brücke, und in den Diagonalkreis kann wahlweise ein Anzeigergerät 5 oder ein Oszillograph geschaltet werden. Mit dem Widerstand 8 läßt sich der Nullpunkt einstellen. Für Eichung und Justierung werden statt des Gebers Vergleichskapazitäten und Anodenstrommesser eingeschaltet. Die Membran weist infolge ihrer Herstellung aus halbhartem Werkstoff einen mechanischen Hysteresefehler von 0,6% auf, der in der Angabe der Gesamtgenauigkeit von  $\pm 2\%$  mitenthalten ist. Die Spannungen sind selbstverständlich konstant zu halten und die Röhren von Zeit zu Zeit neu zu eichen. Für den Anbau an Explosionsmaschinen muß die Meßdose mit einer Wasserkühlung versehen werden.

Die Siemens-Ausführung der kapazitiven Gasdruckmeßdose zeigt Abb. 182. Sie enthält an Stelle des kapazitiven Spannungsteilers nur einen einfachen Kondensator mit veränderbarem Luftspalt. Membran und Meßkörper sind aus einem Stück hergestellt, wodurch die Einspannschwierigkeiten der Membran entfallen.

Die Schnauffer-Dose (Abb. 183) ist ebenfalls ein kapazitiver Geber mit auswechselbarer Gegenfeder und einer weichen Abschlußmembran gegen den Verbrennungsraum; sie dient in erster Linie der Indizierung

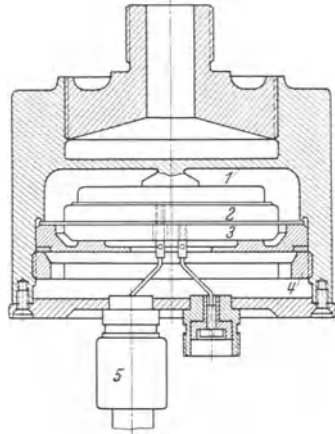


Abb. 182. Kapazitive Gasdruckmeßdose (Ausführung Siemens & Halske AG.).  
1 Membran; 2 bewegliche Elektrode; 3 feste Elektrode; 4 Einstellschraube für die feste Elektrode; 5 Kabelanschluß.

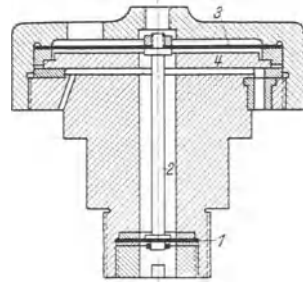


Abb. 183. Kondensator-Druckmeßdose nach SCHNAUFFER.  
1 Weiche Vormembran; 2 Übertragungsbolzen; 3 Hauptmembran zugleich Kondensatorplatte; 4 isolierte Kondensatorplatte.

schnellaufender Verbrennungsmaschinen und weist folgende Besonderheiten auf: Die gegen den Verbrennungsraum abschließende Hilfsmembran  $I$  aus  $30\ \mu\text{m}$  dicker Messingfolie hat  $4\text{...}6\ \text{mm}$  Dmr. und verhindert das Eindringen von Wasserdampf, der sich an der kalten Meßmembran niederschlagen und Kurzschlüsse hervorrufen könnte. Die Meßmembran wird von den stark wechselnden Temperaturen des Ver-

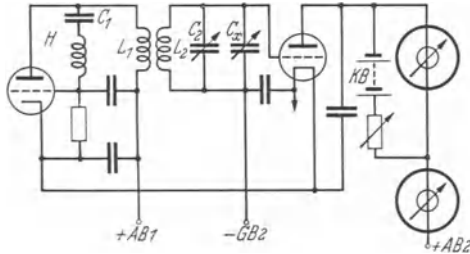


Abb. 184. Schaltung der kapazitiven Druckdose nach dem Verfahren der halben Resonanzkurve.  
 $L_1, C_1$  Schwingungskreis 1;  $L_2, C_2, C_x$  Schwingungskreis 2;  
 $AB_1, AB_2$  Anodenspannungen;  $GB_2$  Gitterspannung;  
 $KB$  Kompensationsspannung.

brennungsraumes wenig beeinflusst, da sie auf der dem Zylinder abgekehrten Seite der festen Elektrode liegt, also luftgekühlt und gegen die Strahlungswärme des Verbrennungsraumes geschützt ist. Sie besteht aus Federbandstahl von  $0,1\text{...}0,5\ \text{mm}$  Stärke und biegt sich maximal  $50\ \mu\text{m}$  durch. Elastische Nachwirkungen konnten nicht beobachtet werden. Die

bewegten Teile wiegen  $1,6\ \text{g}$ . Die Kolbenfläche ist  $0,3\ \text{cm}^2$  und die Eigenfrequenz  $2,5\ \text{kHz}$ . Durch die Anordnung der Membran ist der Plattenabstand beim Druck 0 am kleinsten, die Dose ist also bei kleinen Drücken am empfindlichsten, und die Plattenentfernung kann sehr gering

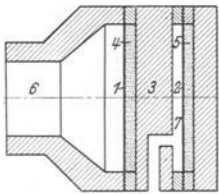


Abb. 185. Kapazitive Meßdose mit Doppelmembran zum Ausgleich äußerer Druckschwankungen.

gewählt werden, da auch bei Überlastung keine Kurzschlüsse auftreten können. Linearer Skalverlauf ist selbstverständlich nur gewährleistet, solange die Kapazitätsänderung klein gegen die Grundkapazität ist. Die Messung erfolgt nach der Methode der halben Resonanzkurve in der in Abb. 184 gezeigten Schaltung. Der Röhrensender  $H$  mit dem Schwingkreis  $L_1, C_1$  wirkt mit einigen Windungen einer Spule auf einen abstimmbaren zweiten Schwingungskreis  $L_2, C_2$ . Parallel zu

$C_2$  liegt der Geberkondensator  $C_x$ . Der Arbeitspunkt liegt auf der halben Höhe der Resonanzkurve an ihrer steilsten Stelle. Jede Änderung der Kapazität  $C_x$  bewirkt eine Spannungsänderung im Schwingkreis  $L_2, C_2$ , der am Gitter der Gleichrichterröhre liegt. Die hochfrequenten Schwingungen überlagern sich der konstanten Gittervorspannung, werden gleichgerichtet und verstärkt. Der konstante Anodengleichstrom des Ausgangsrohres wird durch die Batterie  $KB$  kompensiert. Die Spannungen müssen selbstverständlich konstant gehalten werden. Die Eichung wird mit Preßluft vorgenommen. Die Temperatur des Gebers macht sich infolge der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe auch bei dieser Meßdose bemerkbar. Um den Einfluß äußerer

Luftdruckschwankungen aufzuheben, werden kapazitive Meßdosen mit Gegenmembran nach Abb. 185 ausgeführt. Die punktierten Räume 4 und 5 sind druckdicht abgeschlossen, die weißen Räume 6 und 7 stehen mit der Außenluft in Verbindung. Ändert sich der äußere Luftdruck, so bewegen sich die Membranen 1 und 2 relativ zur Mittelelektrode 3 in entgegengesetztem Sinne und die Summe der Kapazitäten bleibt konstant, solange die Bewegungen im linearen Bereich erfolgen.

Die *induktive Meßdose* mit veränderbarem Luftspalt ist in Abb. 186 gezeigt und bedarf kaum einer weiteren Erklärung. Auf eine allseitig eingespannte Kreismembran 3 ist auf der einen Seite ein Eisenplättchen 4

aufgenietet, das vor einer Magnetspule 5 schwingt, auf der anderen Seite trägt die Membran einen Bolzen 2 mit einem Druckkolben 1. Die Erregerspule liegt in einer mit 2 kHz betriebenen Induktivitätsmeßbrücke; ihr Widerstand ist gegen den Gesamtwiderstand des Stromkreises vernachlässigbar klein, weshalb der Temperaturfehler ebenfalls vernachlässigbar ist. Der Membranweg ist 0,075 mm bei einem Druck von 28 at. Abb. 187 zeigt einen elektromagnetischen Druckindikator mit Doppeldrossel und verstellbarem Eisenkern nach J. RATZKE. Membran *M* und Spulenthaltung *H* bestehen aus unmagnetischem Werkstoff, wäh-

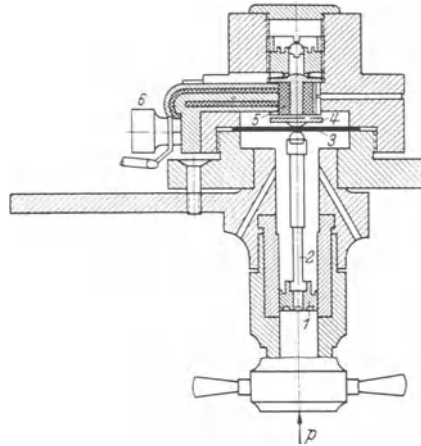


Abb. 186. Induktive Druckmeßdose.  
1 Indikator Kolben; 2 Übertragungstempel;  
3 Hauptmembran; 4 Eisenanker; 5 Drosselspule;  
6 Anschlußklemme.

während das Eisengehäuse *G* den magnetischen Rückschluß bildet. Infolge der Membrandurchbiegung wird der Eisenkern aus seiner Ruhestellung in der Mitte der Doppeldrossel verschoben und verändert dadurch die Induktivität der beiden Spulen. Die Induktivitätsänderungen werden in einer Tonfrequenzbrücke nach Abb. 156 gemessen (dynamischer Dehnungsmesser der DVL). Der elektromagnetische Druckindikator ist leichter zu handhaben und weniger empfindlich gegen Isolationsstörungen als die piezoelektrischen Indikatoren; er hat jedoch auch eine geringere Empfindlichkeit. Bei der in Abb. 188 gezeigten *elektrodynamischen Druckdose* bewegt sich eine Schwingspule 3 im ringförmigen Luftspalt eines mit konstanter Spannung erregten Elektromagnets 4 und die induzierte Spannung wird gemessen. Die elektrodynamische Dose mißt den Differentialquotienten des Druckes  $dp/dt$ . Um den Druck selbst zu bekommen, ist eine Integration erforderlich, die im

Verstärker vorgenommen werden kann. Die *elektrischen Widerstandsmanometer* benutzen die Änderung des Widerstandes eines Manganindrahtes abhängig vom Druck. Die Widerstandsänderung beträgt  $0,0002\%/kg \cdot cm^{-2}$  und verläuft nach LISELL bis 4000, nach LINDECK bis  $8000 kg \cdot cm^{-2}$  linear. Der in Abb. 189 gezeigte *Widerstandsgeber* von NERNST benutzt die einerseits durch elastische Dehnung, andererseits durch reversible Strukturänderung hervorgerufene Widerstandsänderung mechanisch beanspruchter Drähte; er eignet sich für langsam verlaufende

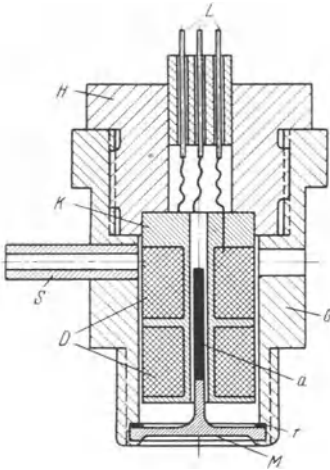


Abb. 187. Elektromagnetischer Indikator mit Doppeldrossel (Bauart DVL.). [Aus Jb. Deutscher Luftfahrtforsch. II (1938) Triebwerk S. 368.]  
*a* Tauchanker; *r* Dichtungsring; *D* elektrische Doppeldrossel; *G* Indikatorgehäuse; *H* Spulenhalterung; *K* Spulenkern; *L* Ableitungen; *M* Membran.

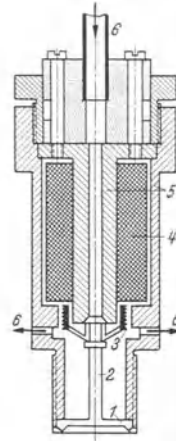


Abb. 188. Elektrodynamische Druckmeßdose.  
*1* Hauptmembran; *2* Übertragungsstempel;  
*3* Schwingenspule; *4* Erregerspule des Elektromagnets; *5* Gehäuse; *6* Kühlluft-Ein- und -Austritt.

Vorgänge. Für niedrige Drücke unter  $10^{-1}$  mm können Hitzdraht-Vakuummesser angewendet werden, die auf der Druckabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Gase beruhen und aus einer Wheatstone-Brücke mit zwei temperaturabhängigen und zwei temperaturunabhängigen Widerständen und einem Drehspul-Anzeiginstrument bestehen. Gleichfalls auf dem Widerstandsverfahren beruhen die in Abb. 190 a und b gezeigten Kohleldruckdosen. Bei der Ausführung a sind zu beiden Seiten einer federnden Zunge *3* die Kohlesäulen *4* angeordnet und werden mit der Druckschraube *5* unter Vorspann gehalten. Ein Druckstempel überträgt die Bewegung der weichen Abschlußmembran auf die Meßfeder *3*. In der Ausführung b ist Druckstempel, Ringmembran und Gehäuse aus einem Stück hergestellt und eine Wasserkühlung vorgesehen. Das Druckelement ist niederohmig und besteht nur aus *2* Kohleblättchen. Diese Dosen sind einigermaßen unempfindlich gegen Temperaturänderungen, da die den größten Temperaturschwankungen ausgesetzte

weiche Vormembran keine Kraft aufnimmt und das Druckelement verhältnismäßig weit von der Verbrennungskammer entfernt ist. Dosen, bei denen die steife Abschlußmembran als Meßfeder dient und die Kohlesäule unmittelbar an dieser Membran anliegt, haben trotz Wasserkühlung erheblich größere Temperaturfehler, da die Kohlesäule stärkeren Temperaturschwankungen ausgesetzt ist und die elastische Konstante der Membran sich mit der Temperatur ändert. Abb. 191 ist eine Ausführung für Drücke von 1...600 atü mit einer Eigenfrequenz von 60 kHz und einem Widerstand der Kohlesäule von  $5 \Omega$  für eine Betriebsspannung von 2V. Abb. 192 zeigt die gebräuchlichen Schaltungen der Kohledruckdosen und Abb. 193 den Widerstandsverlauf abhängig vom Druck für eine Kohlesäule von 60 Plättchen. Mit den Bezeichnungen der Abb. 192 a wird

$$I_g = \left. \begin{aligned} &= \frac{U}{2} \left( \frac{1}{R_1 + R_g} - \right. \\ &\left. - \frac{1}{R_2 + R_g} \right). \end{aligned} \right\} (104)$$

Pflfer, Elektrische Messung.

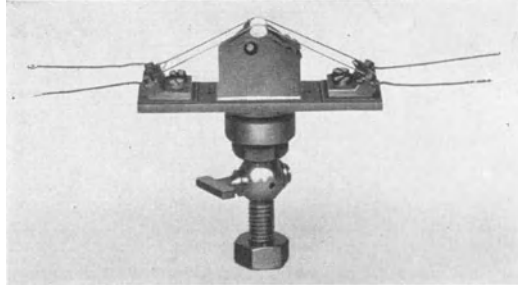


Abb. 189. Druckmesser nach NERNST.

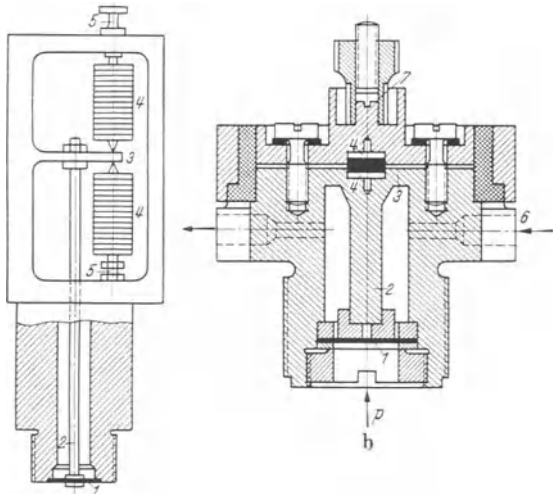


Abb. 190 a und b. Verschiedene Ausführungen von Kohle-Druckdosen. [Aus Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 1451.]  
1 weiche Abschlußmembran; 2 Übertragungsstempel; 3 Meßfeder bzw. Meßmembran; 4 Kohlesäule; 5 Einstellschraube; 6 Kühlwasseranschluß; 7 Anschlußschraube.

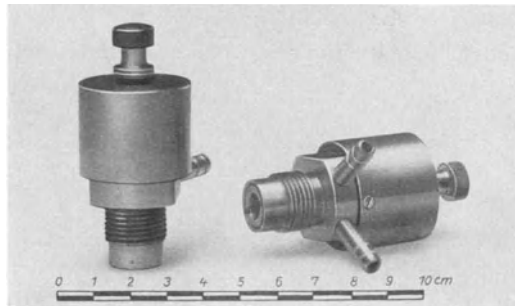


Abb. 191. Kohledruckdose für Verbrennungsmaschinen. Meßbereich 1...600 atü. (Aus H. RUMPF, Bonn; Druckschrift 750/2.)

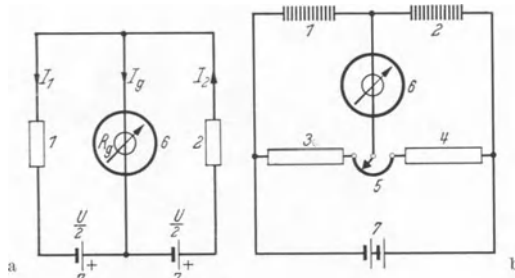


Abb. 192 a und b. Schaltung der Kohledruckdosen. a Differenzschaltung. b Brückenschaltung. 1, 2 Kohlesäulen; 3, 4 feste Widerstände; 5 Abgleichwiderstand; 6 Anzeiginstrument; 7 Meßbatterie.

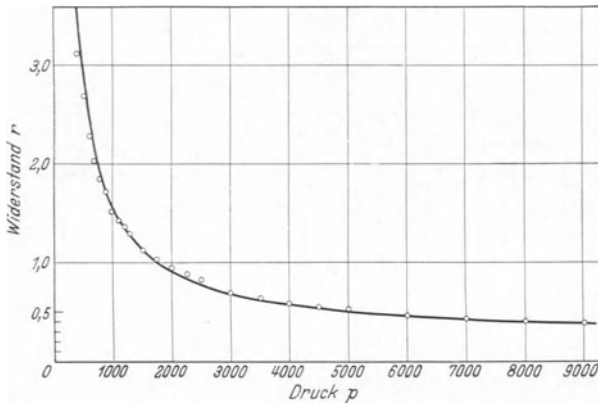


Abb. 193. Widerstandsverlauf in Abhängigkeit vom Druck für eine Kohlesäule von 60 Plättchen. Dicke 0,2 mm, Dmr. 7 mm. Gleichung des Druckverlaufs:  $p \cdot (r - a) \cdot b = \text{const.}$   $a = 0,244$ ;  $b = 1336$ .

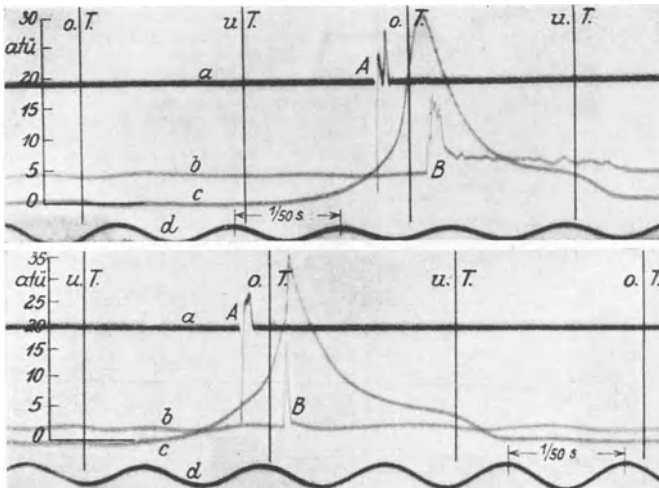


Abb. 194. Oszillogramm des Druckverlaufs im Zylinder eines Verbrennungsmotors bei nichtklopfendem und bei klopfendem Betrieb. a Zündstrom; b Ionisationsstrom; c Drucklinien; d Zeitmarkierung; A Zündpunkt; B Flammenankunftspunkt; o.T. und u.T. oberer und unterer Totpunkt.

Die Eichkurve ist linear, da der Widerstand der Kohlesäule mit steigendem Druck nach einer Hyperbelfunktion abnimmt. Die Schaltung setzt jedoch Symmetrie der beiden Batteriehälften und Spannungskonstanz voraus. Die Kohlesäule gestattet im Gegensatz zum piezoelektrischen Verfahren absolute Druckmessungen, doch ist ihre Empfindlichkeit nicht in denselben weiten Grenzen regelbar.

Abb. 194 zeigt ein mit Kohledruckmeßdosen und Schleifenzillograph aufgenommenes Diagramm des Druckverlaufes im Zylinder eines Verbrennungsmotors bei nichtklopfendem und bei klopfendem Betrieb.

Für sehr rasch verlaufende Vorgänge, z. B. zur Bestimmung des Druckverlaufes in Explosionskammern, empfiehlt sich die Verwendung der *piezoelektrischen* Druckdose und des Kathodenzillographen. Bezeichnet

$Q$  die Ladung des Piezoquarzes,

$C$  die Kapazität des Eingangskreises,

$p$  den Druck auf den Quarz,

$k$  eine Konstante und

$U$  die Steuerspannung,

so gilt

$$\frac{dp}{dt} = k \cdot \frac{dQ}{dt} = k \cdot C \cdot \frac{dU}{dt}. \quad (105)$$

Um eine möglichst hohe Empfindlichkeit zu erreichen, wählt man die Druckmembran oder den Druckkolben so groß, wie es die äußeren Abmessungen der Druckdose, die im allgemeinen die Größe einer Zündkerze nicht überschreiten dürfen, zulassen und schaltet, wie es in Abb. 195

geschehen ist, mehrere Quarzelemente (bis zu 10) räumlich hintereinander, elektrisch jedoch parallel. Die Geber werden ebenso, wie die Kohledruckdosen, in zwei grundsätzlich verschiedenen Ausführungen mit steifer Membran als Meß- und Abschlußglied und mit weicher Membran als Abschlußglied, sowie einer getrennten Meßfeder hergestellt (Abb. 196). Die Empfindlichkeit des Piezoquarzes hängt von der Vorspannung

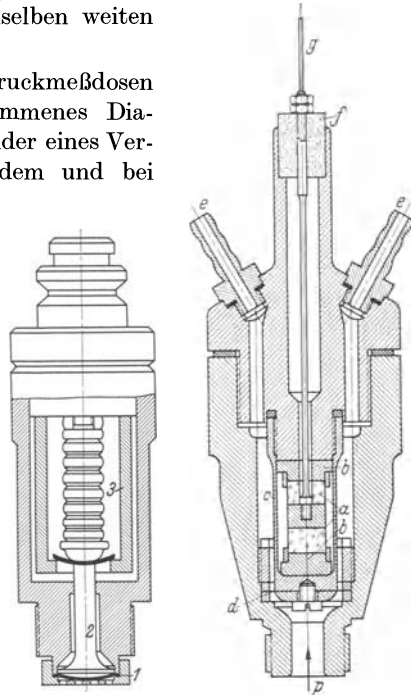


Abb. 195.

Abb. 196.

Abb. 195. Piezoelektrischer Druckindikator mit mehreren parallelgeschalteten Druckelementen.

[Aus Z. VDI Bd. 80 (1939) S. 1450.]

1 Abdichtungsmembran; 2 Druckübertragungstempel; 3 Quarzkapsel mit mechanischer Vorspannung.

Abb. 196. Piezoelektrische Druckmeßdose (Hülsenindikator). [Aus Forsch.-Arb. Ing.-Wes. Bd. 8 (1937) S. 249—260.]

a Quarzscheiben; b Stahlzwischenstücke; c Zughülse als Vorspannfeder; d Gasdichtungsmembran; e Kühlwasser-Ein- und -Austritt; f Bernsteinisolierung; g Ladungsabführung.



ab, und es ist deshalb wichtig, diese unabhängig von Temperaturschwankungen konstant zu halten. Bei steifer Abschlußmembran ist das kaum möglich, da sich die Federungseigenschaften der Membran mit der Temperatur ändern und auch eine einseitige Wasserkühlung die Temperaturschwankungen der äußeren Membranschichten nicht zu beseitigen vermag. Die Empfindlichkeit ist ferner abhängig von der Güte der Berührungsfläche zwischen Membran und Stempel, sowie von dünnen Luftschichten zwischen beiden; die Berührungsflächen sollen deshalb geschliffen sein und die Geber vor der Messung einige Male

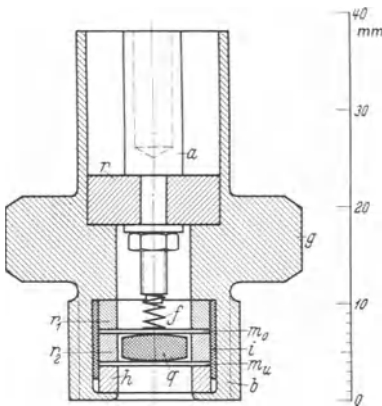


Abb. 197.  
Meßkammer mit Membranen gleicher Steifigkeit. [Aus Phys. Z. Bd. 38 (1937) S. 73—78.]  
*a* Abnahmebuchse; *b* Börtelung; *f* Feder;  
*g* Gehäuse; *h* Haltering; *i* Isoliermaterial;  
*m<sub>o</sub>*, *m<sub>u</sub>* Membran; *q* Meßquarz;  
*r<sub>1</sub>*, *r<sub>2</sub>* Ringe aus Quarzglas.

mehrfach überlastet werden, um diese dünnen Luftschichten herauszupressen. Der Temperaturfehler eines solchen Gebers wurde zu  $-3,4\%$  zwischen  $20$  und  $100^\circ$  ermittelt. Bei weicher Abschlußmembran ( $0,1$  mm Kupfer bei  $80$  atü) sind die Verhältnisse günstiger, da die elastischen Eigenschaften dieses den größten Temperaturschwankungen ausgesetzten Teiles nicht in die Messung eingehen. Bei diesen Gebern ist der Temperatureinfluß geringer und in erster Linie durch die Temperaturabhängigkeit des Piezomoduls bestimmt, die zu  $-1,52 \dots -1,83\%/100^\circ$  gemessen wurde. Beim Hülsenindikator von MEURER wird als Vorspannfeder eine den Quarz konzentrisch

umschließende Stahlhülse *c* in Abb. 196 angewendet, die, gut geschützt und von der Kühlflüssigkeit umflossen, im Innern des Indikators liegt und deshalb von der schwankenden Gastemperatur des Zylinders nur wenig beeinflusst wird. Der Hülsenindikator hat aus diesem Grunde einen sehr geringen Temperaturfehler. Einen ähnlichen Erfolg erreichen WATZINGER, SCHNELL, LARSEN bei einem piezoelektrischen Druckmesser mit weicher Membran, bei dem der Piezoquarz von einem Stufenkolben getragen wird und unterhalb des Stufenkolbens ein federnder Stahlring zur elastischen Druckaufnahme eingelegt ist. Die Empfindlichkeit dieses Druckgebers ist etwas kleiner als die des Hülsenindikators, weil die Fläche des Stufenkolbens klein ist und die Kolben- bzw. Kristallfläche nicht voll ausgenutzt werden kann. Um die Wirkung von Beschleunigungskräften auszuschließen, haben FAHRENTHOLZ, KLUGE, LINCKH den Quarz zwischen zwei Membranen gleicher Steifigkeit mit entsprechender Vorspannung angeordnet (Abb. 197). Die Kammer enthält praktisch als einzige träge Masse den Meßquarz *q* zwischen den beiden Membranen *m<sub>u</sub>* und *m<sub>o</sub>*. Die

Membranen mit dem Quarz werden durch Isolierringe  $r_1$  und  $r_2$  und den Haltering  $h$  aus Metall gehalten und durch Umbördeln der Indikatorhülse  $b$  mit hinreichender Vorspannung zusammengepreßt. Gemessen wird die Potentialdifferenz zwischen beiden Membranen. Das Potential der oberen Membran wird über die weiche Feder  $f$ , die keine Spannung zu übertragen vermag, abgenommen und der mit Quarzglas isolierten Abnahmebuchse  $a$  zugeführt. Eine von unten auf die Kammer wirkende äußere Kraft wird zum Teil von der unteren Membran aufgenommen, zum Teil über den Quarz auf die obere Membran übertragen. Der Quarz nimmt also einen der Gesamtkraft proportionalen Anteil auf. Anders ist das Verhalten der Einrichtung beim Auftreten von Massenkraften. Unter dem Einfluß einer auf den Quarz wirkenden Beschleunigungskraft biegen sich beide Membranen gleichmäßig durch, dadurch wird die eine

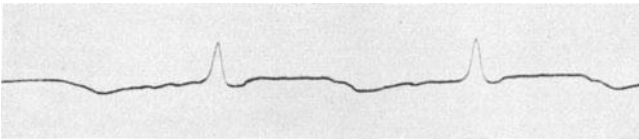


Abb. 198. Druckverlauf in einem Preßlufthammer. Aufgenommen mit dem beschleunigungsunabhängigen Piezodruckmesser von FAHRENTHOLZ, KLUGE, LINCKH. [Aus Phys. Z. Bd. 38 (1937) S. 77.]

Seite des Quarzes belastet, die andere entlastet, und da die Massenkraft über die Dicke des Quarzes gleichmäßig verteilt ist, verläuft die Beanspruchung des Quarzes zwischen diesen beiden Grenzwerten linear. Da die beiden Quarzoberflächen entgegengesetztes Potential haben, nimmt bei gleicher Steifigkeit beider Membranen das Potential auf der einen Quarzseite um ebensoviel ab, wie es auf der anderen zunimmt, und die Potentialdifferenz zwischen beiden Membranen bleibt unabhängig von den Massenkraften erhalten. Die Meßdose ist also beschleunigungsunabhängig. Die Eigenfrequenz dieser Meßdose ist nur durch die geometrischen Abmessungen des Quarzes, also durch seine sehr hohe Eigenfrequenz von etwa  $10^6$  Hz bestimmt, da die Schwingungen, die der Quarz zusammen mit den Membranfedern ausführt, nach den obigen Darlegungen über die Massenkraften von der Dose nicht gemessen werden. Abb. 198 zeigt den mit einer solchen Kammer aufgenommenen Druckverlauf in einem Preßlufthammer. Aus dem glatten Verlauf des Kurvenzuges zwischen den Druckspitzen beim Beginn des Schlaghubes ist deutlich zu ersehen, daß die Druckmeßkammer von den starken Beschleunigungen beim Auftreffen des Kolbens auf den Döpper völlig unbeeinflusst bleibt. Die piezoelektrischen Druckmesser werden auch zur Drehzahlmessung bei großen Maschinen verwendet, indem man einen Fliehgewicht-Drehzahlmesser auf die Druckmeßdose wirken läßt.

Der Glimmlampen-Indikator. Für die Indizierung schnell laufender Verbrennungsmotoren wurde von der DVL ein Impulsgeber entwickelt.

Der Geber 5 hat Zündkerzengröße und enthält eine Membran von 9 mm Dmr. und 0,1 mm Dicke, deren Durchbiegung beiderseits durch Sitze auf  $\pm 30 \mu\text{m}$  begrenzt ist und die

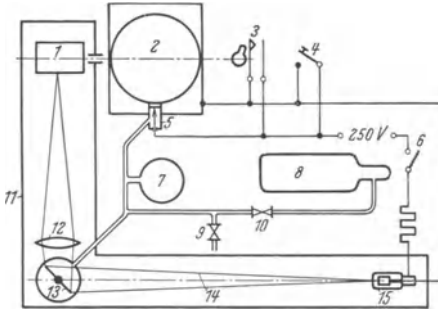


Abb. 199. Anordnung des DVL-Glimmlampen-Indikators. [Aus ETZ Bd. 55 (1934) S. 376.]  
 1 Schreibtrommel; 2 Verbrennungsmotor; 3 Totpunktmarkierung; 4 Druck-Eichtaste; 5 Geber; 6 Einschalter; 7 Eichdruck-Messer; 8 Preßluftflasche; 9 Ausströmventil; 10 Drosselventil; 11 lichtdichter Kasten; 12 Objektiv; 13 Drehspiegel, vom Druckmesser bewegt; 14 Strahlengang; 15 Glimmlampe.

beim Anliegen an den einen Sitz den Stromkreis einer Glimmlampe schließt (Abb. 199). Dem Zylinderdruck wirkt der mit Regelventil 10 einstellbare Druck eines Preßluftbehälters 8 entgegen. Sobald der Zylinderdruck den Gegendruck übersteigt, schließt die Membran den Stromkreis der Glimmlampe und hält ihn geschlossen, bis der eingestellte Gegendruck wieder unterschritten wird. Steigert man den Gegendruck, bis die Glimmlampe gerade noch aufleuchtet, so entspricht der Gegendruck dem Höchstdruck im Zylinder mit einer Genauigkeit

von  $\pm 0,1$  at. Die Glimmlampe wirft nun einen Lichtpunkt auf einen drehbaren Spiegel 13 und von dort auf eine mit der Kurbelwelle umlaufende Schreibtrommel 1, auf der je nach dem eingestellten Gegendruck Lichtstriche verschiedener Länge erscheinen. Verdreht man

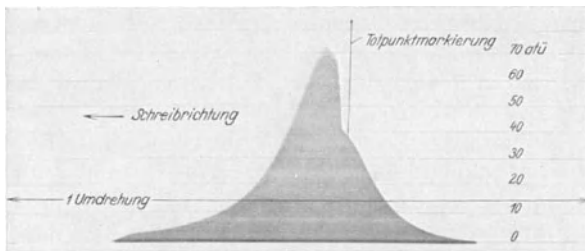


Abb. 200. Druckverlauf in einem Junkers-Doppelkolben-Dieselmotor, aufgenommen mit DVL-Glimmlampen-Indikator. [Aus ETZ Bd. 55 (1934) S. 376.]

außerdem den Spiegel proportional dem eingestellten Gegendruck, so wandern diese Lichtstriche über die Breite der Schreibtrommel. Es entspricht also der Abstand des Lichtstriches von der Nulllinie dem eingestellten Gegendruck und ihre Länge der Zeitdauer, während welcher dieser Gegendruck überschritten wurde. Durch Veränderung des Gegendruckes von Umdrehung zu Umdrehung erhält man ein Schraffendiagramm (Abb. 200), dessen Umgrenzung das Mittel aus einer Anzahl von Druck-Wegdiagrammen darstellt.

Eine vergleichende Betrachtung der verschiedenen Druckmeßverfahren stößt infolge der Vielfalt der Ausführungen auf große Schwierigkeiten, und man kann nur einige wenige allgemeine Gesichtspunkte herauschälen. Die Empfindlichkeit und Eigenfrequenz der Meßdosen soll nicht höher getrieben werden, als der Zweck es erfordert, da die Dosen gleichzeitig anfälliger gegen Störungen und schwieriger zu handhaben sind. Wo verstärkerlose Schaltungen und 50 Hz-Netzanschlußgeräte ausreichen, sind sie wegen der einfacheren Bedienung zu bevorzugen. Im folgenden sind einige charakteristische Eigenschaften der einzelnen Verfahren aufgezählt, aus denen man sieht, daß keines der bekannten Verfahren sämtliche eingangs erhobenen Forderungen restlos zu erfüllen vermag. Man wird also von Fall zu Fall das geeignetste Gerät aussuchen müssen, wobei zu berücksichtigen ist, daß man auch beim gleichen Verfahren durch konstruktive und schaltungstechnische Maßnahmen den einen oder anderen an sich vorhandenen Einfluß besonders klein halten kann, so daß also nicht sämtliche Störungsmöglichkeiten stets in der vollen Größe auftreten.

Größte Empfindlichkeit und Eigenfrequenz bei weitgehender Unabhängigkeit von Beschleunigungen und Temperaturänderungen haben die piezoelektrischen Meßdosen; sie sind jedoch sehr empfindlich gegen Verschlechterung der Isolation und vertragen wegen der zunehmenden Kabelkapazität keine allzu langen Zuleitungen. Sowohl die Konstruktion und Ausführung der Geber wie ihre Handhabung erfordern große Sorgfalt und geschultes Personal. Induktive, kapazitive und elektrodynamische Druckmeßdosen haben eine mittlere Empfindlichkeit und sind beschleunigungsabhängig. Die kapazitiven Meßdosen sind wegen des meist sehr kleinen Plattenabstandes empfindlich gegen Wärmedehnungen und erfordern größte Genauigkeit bei der Fertigung. Um Unabhängigkeit vom Isolationszustand und der Kapazität der Zuleitungskabel zu erreichen, ist eine phasenabhängige Gleichrichtung erforderlich. Die kapazitiven Dosen benötigen einen Verstärker und eine Trägerfrequenz, deren Höhe von der Frequenz der aufzunehmenden Vorgänge abhängt. Das induktive und elektrodynamische Verfahren ist weitgehend unabhängig von Isolationsstörungen und kann durch temperaturunabhängige Vorwiderstände mit kleinem Temperaturfehler ausgeführt werden. Beim induktiven Verfahren kommt man häufig ohne Verstärker aus, wodurch sich die Schaltung vereinfacht. Das elektrodynamische Verfahren zeigt nicht unmittelbar den Druck, sondern die Druckänderung an. Es bedarf deshalb eines besonderen Integrationsgliedes und ist nicht statisch eichbar. Die Kohledruckmesser arbeiten nur mit einer Batterie niedriger Spannung, sowie einem gewöhnlichen Drehspul-Instrument und bedürfen keines Verstärkers; sie sind jedoch wenig empfindlich, abhängig von der Temperatur und weisen Hysterese- und Nachwirkungserscheinungen auf. Ungenügende Konstanz des Nullpunktes, Beschleunigungsabhängigkeit

und Unterschiede zwischen statischer und dynamischer Eichung sind weitere unangenehme Eigenschaften, durch welche die Vorteile der einfachen Schaltung und Handhabung teilweise wieder aufgehoben werden.

### III. Geschwindigkeitsmessung.

Die Geschwindigkeit als erster Differentialquotient des Weges nach der Zeit wird vorzugsweise auf eine Wegmessung zurückgeführt, aus der durch Differentiation nach der Zeit Augenblickswerte, durch Division mit der Beobachtungszeit Mittelwerte der Geschwindigkeit gewonnen werden.

#### 1. Drehzahlmessung [33].

Die Drehzahlmesser haben zwei große Anwendungsgebiete: Ermittlung der Arbeitsgeschwindigkeit von Maschinen und die Bestimmung der Geschwindigkeit, sowie des zurückgelegten Weges von Fahrzeugen. Im ersten Fall soll meist ein enger Bereich um einen Normalwert herum mit sehr großer Genauigkeit angezeigt werden, während im zweiten Fall die Drehzahl in weiten Grenzen schwankt und alle Werte innerhalb des von Null bis zu einem Höchstwert reichenden Meßbereiches mit gleicher prozentualer Genauigkeit angezeigt werden sollen. Den verschiedenen Zwecken und Meßbereichen entsprechend unterscheiden sich die Geber stark in Form und Schaltung, für alle gelten die nun schon sattsam bekannten Forderungen an Genauigkeit, Unabhängigkeit von Temperaturschwankungen und geringer Rückwirkung auf die zu untersuchende Welle.

Impulsgeber. Die Drehgeschwindigkeit einer Welle wird am einfachsten durch einen Umlaufkontakt in eine Folge von Stromstößen aufgelöst. Zur Erzeugung der Stromstöße können alle Verfahren mechanischer, magnetischer, kapazitiver, induktiver und lichtelektrischer Impulsgabe herangezogen werden. Beim Stich-Drehzähler werden die einzelnen Stromstöße einem Zählwerk hoher Ansprechgeschwindigkeit zugeführt und über eine bestimmte Zeit addiert. Ein- und Ausschaltung des Zählwerkes kann von Hand oder selbsttätig von einer Uhr aus erfolgen. Gebräuchliche Zählwerke sind in der Lage, 20...50 Stromstöße pro Sekunde aufzunehmen, die Messung kann also in kürzester Zeit und sehr genau erfolgen. Der Stich-Drehzähler dient der genauesten Erfassung der mittleren Drehgeschwindigkeit innerhalb bestimmter Zeit, er arbeitet in allen Meßbereichen gleich gut, ist völlig temperaturunabhängig und kann ohne jede Energieentnahme ausgeführt werden, er ist deshalb das geeignete Gerät für Abnahmeprüfungen. Da seine Genauigkeit nur von der Zahl der Impulse/Umdrehung und der Beobachtungsdauer abhängt, kann sie nahezu beliebig gesteigert werden. Zur unmittelbaren und laufenden Anzeige der augenblicklichen Drehgeschwindigkeit werden die Impulse einem Impulsempfänger zugeführt.

Abb. 55 zeigt die Schaltung des Impulsfrequenzempfängers der Siemens & Halske AG. Das Empfangsrelais 3 legt die beiden Meßkondensatoren 4 abwechselnd an Spannung oder schließt sie über die Widerstände 5 kurz. Der Mittelwert der Kondensator-Ladeströme ist ein Maß für die Impulshäufigkeit, also für die Drehgeschwindigkeit, und wird mit einem Kreuzspul-Instrument gemessen, er hat die Größe

$$i = 2 \cdot f \cdot C \cdot U \text{ } \mu\text{A}, \quad (106)$$

wenn  $f$  die Impulsfrequenz in Hz,  $C$  die Kapazität jedes Kondensators in  $\mu\text{F}$ ,  $U$  die Meßspannung in Volt sind. Das Impulsfrequenzverfahren eignet sich für beliebige Übertragungsentfernung und Wellen geringer Leistung; seine Genauigkeit ist durch die Konstanz und Temperaturabhängigkeit des Anzeige-Instruments und der Meßkondensatoren gegeben. Die Drehzahl soll nicht mehr als 1:10 schwanken und das Empfangsrelais muß völlig prellungsfrei arbeiten; wo seine Trägheit zu groß ist, kann es durch ein Ionenschaltrohr ersetzt werden.

Beim Impulsdrehzahlmesser der AEG wird eine der Drehzahl verhältnismäßige Impulsfrequenz auf einen Übertrager mit 2 Sekundärwicklungen gegeben (Abb. 201). Die auf der Sekundärseite entstehenden

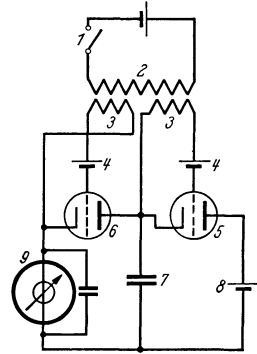


Abb. 201. Impuls-Drehzahlmesser der AEG.

1 Impulsfrequenzgeber; 2 Primärwicklung des Eingangsträgers; 3 Sekundärwicklungen des Eingangsträgers; 4 Gitterbatterie; 5, 6 gittergesteuerte Entladungsröhren; 7 Meßkondensator; 8 Anodenbatterie; 9 Anzeigeelement.

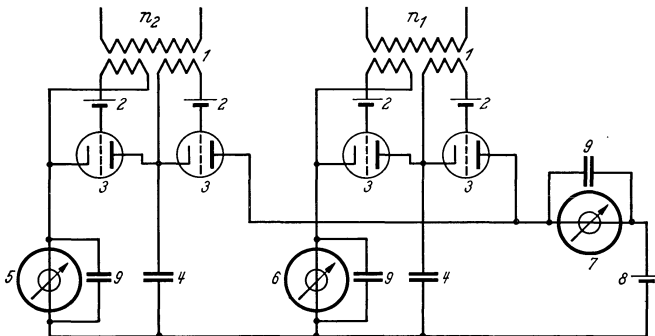


Abb. 202. Drehzahl-Summierung mit dem Impulsverfahren der AEG.

$n_1$  Eingang vom Drehzahlgeber 1;  $n_2$  Eingang vom Drehzahlgeber 2; 1 Eingangsträger; 2 Gitterbatterien; 3 gittergesteuerte Entladungsröhren; 4 Meßkondensatoren; 5 Anzeigeelement für  $n_2$ ; 6 Anzeigeelement für  $n_1$ ; 7 Anzeigeelement für  $n_1 + n_2$ ; 8 Anodenbatterie; 9 Dämpfungskondensatoren.

positiven und negativen Stromstöße machen die gittergesteuerten Entladungsröhren 5 und 6 abwechselnd leitend und sperrend und der Meßkondensator 7 wird beim ersten Impuls von der Anodenbatterie 8 über das Rohr 5 aufgeladen, während er sich beim nächsten Impuls über das

Rohr 6 und das Anzeigeelement 9 entlädt. Der arithmetische Mittelwert des Entladestromes wird von dem Drehspul-Instrument angezeigt und ist ein Maß für die Impulsfrequenz und die zu messende Drehzahl. Die Röhren müssen so leistungsfähig sein, daß auch bei sehr hoher Impulsfrequenz eine vollkommene Ladung des Kondensators erzielt wird, und die Anodenspannung muß konstant gehalten werden. Unabhängigkeit von der Sendespannung wird durch Übersättigung des Eingangswandlers

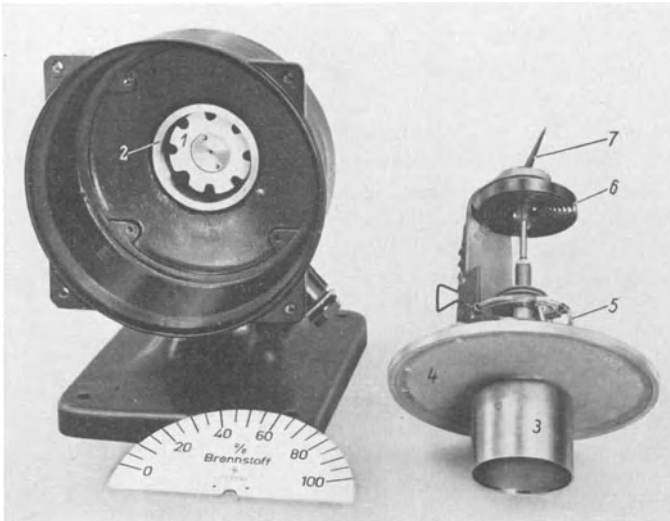


Abb. 203. Ferraris-Drehzahlgeber mit angebautem Fernsender (Ausführung Siemens & Halske A.G.). 1 Polrad aus Magnetstahl; 2 Eisenjoch; 3 Manganintrommel; 4 Lagerschild; 5 Ringrohr-Fernsender; 6 Feder; 7 Zeiger.

erreicht. Das Verfahren eignet sich, wie alle Impulsfrequenzverfahren, zur Summierung mehrerer Drehzahlen durch Addition der Ladeströme mehrerer Meßkondensatoren (Abb. 202).

Wirbelstrom-Drehzahlmesser. Die weiteste Verbreitung haben die Wirbelstrom-Drehzahlmesser gefunden, bei denen ein mit der zu messenden Welle umlaufender Dauermagnet Wirbelströme in einer drehbaren Metalltrommel oder Scheibe induziert, wodurch diese entgegen der Richkraft einer Feder im Drehsinn mitgenommen wird. Die Geräte können nur in einer beschränkten Entfernung von der Meßwelle aufgestellt werden, da der umlaufende Magnet über eine biegsame Welle angetrieben werden muß. Ihre Anzeige ist linear, der Temperatureinfluß beträgt bei Kupfer- und Aluminiumtrommeln  $4\%/10^\circ$  und muß mit besonderen Mitteln, etwa einem temperaturabhängigen oder einem durch einen Bimetallstreifen selbsttätig verstellten magnetischen Nebenschluß, kompensiert werden. Durch diese Kompensation ist ein Temperaturfehler von nur  $0,2\%/10^\circ$  erreicht worden. Auf die Beschreibung

der bekannten Fahrzeuggeschwindigkeitsmesser können wir hier verzichten, dagegen wollen wir eine Sonderausführung betrachten, deren bewegliches System einen Widerstand-Fernsender trägt, also eine weitere Übertragung der Drehzahl gestattet (Abb. 203). Das Gerät hat ein achtpoliges Magnetrad aus Aluminium-Nickel-Stahl und ein fest mit ihm verbundenes Eisenjoch. Zwischen beiden spielt eine Manganintrommel als Anzeigeorgan. Durch die Verwendung von Manganin wird ein außerordentlich kleiner Temperaturfehler erzielt. Das Drehmoment dieses Gebers beträgt 500 cmg, das Reibungsmoment 4 cmg, der

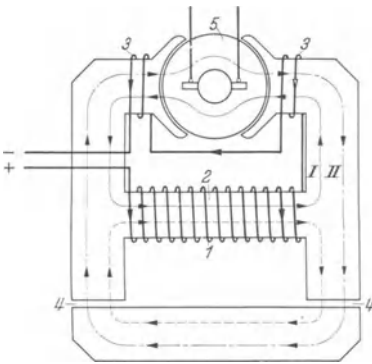


Abb. 204. Umdrehungsfernzeiger mit Fremderregung (Bauart AEG). (Aus AEG-Druckschrift Ms./V 1098 Informationsmappe 014/1 Juli 1936.)

*1* Erregerspule; *2* Mittelsteg des Eisenjoches; *3* Kompensationswicklung; *4* Luftspalt im magnetischen Kreis des Gegenfeldes; *5* Anker; *I* Hauptfeld; *II* Gegenfeld.

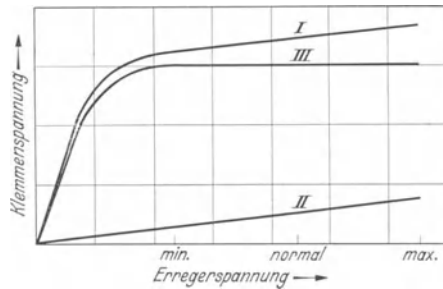


Abb. 205. Klemmenspannung des AEG-Umdrehungsfernzeigers mit Fremderregung, abhängig von der Erregerspannung. (Aus AEG-Druckschrift Ms./V 1098 Informationsmappe 014/1 Juli 1936.)  
*I* Hauptfeld; *II* Gegenfeld; *III* resultierendes Feld.

Reibungsfehler demnach 0,8%. Dieser Fehler wird durch die Erschütterungen beim Lauf noch weitgehend vermindert. Der Temperatureinfluss setzt sich aus mehreren Einzelfehlern zusammen. Bei Temperaturerhöhung nimmt die Feldstärke des Dauermagnets ab und gleichzeitig vergrößert sich der Luftspalt zwischen Magnet und Joch infolge der verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten des Magnetmaterials und des Weicheisens. Beide Änderungen wirken im gleichen Sinn und rufen einen Fehler von  $-0,25\%/10^\circ$  hervor. Im entgegengesetzten Sinn wirkt die Abnahme der Federrichtkraft mit steigender Temperatur, so daß ein resultierender Fehler von  $0,1\%/10^\circ$  bleibt. Die Genauigkeit kann mit  $\pm 1\%$  angegeben werden. Der Skalenverlauf ist bis zu 3500 Umdr/min vollkommen linear, die normale Drehzahl ist 2000 Umdr/min. Der Geber verbraucht eine Antriebsleistung von 20 W und wiegt 16 kg, ist also ausschließlich für ortsfeste Anlagen gedacht.

Drehzahlgeber. Für ortsveränderliche Anlagen und größere Übertragungsentfernung werden vorwiegend Drehzahlmesser mit Gleich- oder Wechselstromgeneratoren ausgeführt. Nachteilig ist beim Gleichstromgeber der unvermeidbare Kollektor mit den Schleifbürsten, die unter



ungünstigen Umständen zu Störungen und Fehlmessungen Anlaß geben können, vorteilhaft dagegen das Drehspul-Anzeigeeinstrument, dessen Temperaturfehler auch bei kleinem Spannungsbereich sehr niedrig gehalten werden kann. Üblicherweise werden die Drehzahlmesser mit



Abb. 206. Wechselstrom-Drehzahlgeber von Siemens & Halske.

Dauermagnet-Erregung ausgeführt, da die Ausführung mit Fremderregung konstruktiv schwieriger ist und nur in seltenen Fällen eine hinreichend konstante Erregerstromquelle zur Verfügung steht. Doch wurden auch fremderregte Drehzahlgeber gebaut, wie an der in Abb. 204 gezeigten AEG-Konstruktion erläutert werden soll. Das wirksame Erregerfeld dieser Maschine setzt sich aus den beiden Teilfeldern *I* und *II* zusammen. Die Spule *I* umfaßt den

verhältnismäßig dünnen und deshalb stark gesättigten Mittelsteg *2* des Eisenjoches und erzeugt das Hauptfeld *I*. Das Gegenfeld *II* wird durch zwei vom gleichen Strom durchflossene Kompensationsspulen *3* erzeugt.

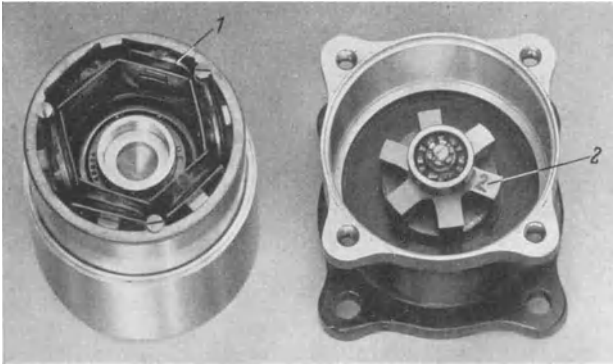


Abb. 207. Wechselstrom-Drehzahlgeber geöffnet.  
1 Ankerwicklung; 2 Polrad aus Magnetstahl.

es durchsetzt mehrere Luftspalte *4* und bleibt auf dem linearen Teil der Magnetisierungs-Kennlinie, es verläuft deshalb linear mit den Erreger-AW. Das resultierende Feld *III* und die Klemmenspannung der Maschine sind in weiten Grenzen unabhängig von den Schwankungen der Erregerspannung (Abb. 205).

Die Wechselstromgeneratoren werden mit ruhender Wicklung und umlaufendem Dauermagnet ausgeführt, haben also keine beweglichen stromführenden Teile; sie sind aus diesem Grunde sehr widerstandsfähig gegen rauhe Behandlung und vermeiden jede Explosionsgefahr. Nachteilig ist der Gleichrichter, dessen hoher Temperaturkoeffizient eine be-

sondere Kompensation mit temperaturabhängigem magnetischen Nebenschluß notwendig macht. Der in Abb. 206 und 207 gezeigte Geber wiegt etwa 400 g und gibt bei 1000 Umdr/min eine Leistung von 70...100 mW mit einer Frequenz von 50 Hz und einer Spannung von 20 V ab. Die Normaldrehzahlen für Meßbereich-Endwert liegen zwischen 800 und 4000 Umdr/min, die Genauigkeit beträgt 1...1,5%, der Temperaturfehler liegt je nach Meßbereich zwischen +0,3 und -0,4%/10°. Völlig vermeiden läßt sich die Temperaturabhängigkeit, wenn man an Stelle der Spannung die Frequenz mißt. Bei kleiner verfügbarer Leistung und großem Meßbereichumfang mit der oberen Grenze 1000 Hz kommen Zungenfrequenzmesser in Betracht, während sich die Zeigerfrequenzmesser infolge ihres hohen Eigenverbrauches vorwiegend für ortsfeste Anlagen und zur genauesten Überwachung einer Normaldrehzahl eignen.

Kurzzeitige Drehzahlchwankungen. Drehzahlschwankungen werden, wie bereits gesagt, am besten mit Zeigerfrequenzmessern angezeigt. Wo jedoch keine genügende Leistung für den Frequenzmesser zur Verfügung

steht, kann das nach der Methode der halben Resonanzkurve arbeitende, nachstehend beschriebene lichtelektrische Verfahren zur Messung des Ungleichförmigkeitsgrades eingesetzt werden (Abb. 208): In den Strahlengang einer Photozelle ragt die auf der Meßwelle 1 sitzende Lochscheibe 2; an die lichtelektrische Zelle 4 ist über einen Übertrager 5 ein Resonanzkreis 6 angeschlossen, dessen Frequenz so gewählt ist, daß die Normaldrehzahl etwa der halben Höhe der Resonanzkurve entspricht. Die Schwingungsamplitude ist dann der Drehzahl proportional und wird über einen Verstärker mit einem Kathoden- oder Schleifen-Oszillographen gemessen. Die Frequenz des Photozellenstromes

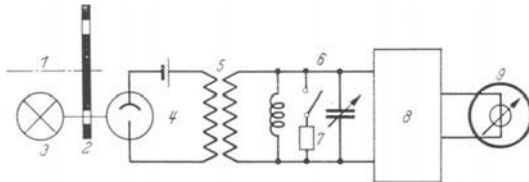


Abb. 208. Schaltung des Ungleichförmigkeitsgradmessers.  
1 Meßwelle; 2 Lochscheibe; 3 Lichtquelle; 4 Photozellenkreis;  
5 Übertrager; 6 Resonanzkreis; 7 Dämpfungswiderstand;  
8 Verstärker; 9 Oszillograph.

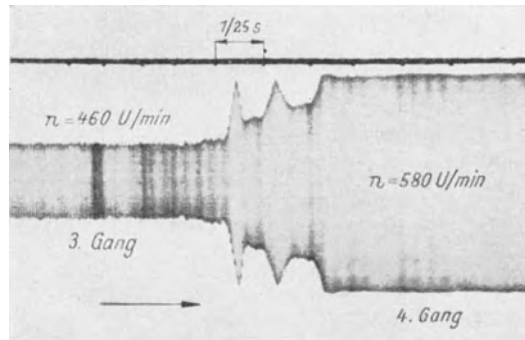


Abb. 209. Drehzahlschwankung eines Antriebs, bestehend aus Elektromotor und Schaltgetriebe eines Kraftfahrzeugs, beim Schalten vom dritten auf den vierten Gang.

[Aus Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 381.]

soll mindestens zehnmals größer sein als die Frequenz der zu messenden Drehzahlschwankungen. Für Frequenzen über 300 Hz ist eine Vakuumphotozelle notwendig, da die gasgefüllte Zelle bereits eine merkbare Trägheit aufweist. Die Teilung der Lochscheibe muß sehr genau stimmen, weil Teilungsfehler Drehzahlschwankungen vortäuschen. Beispiel: Die Normaldrehzahl beträgt 1600 Umdr/min und schwankt um  $\pm 50$  Umdr mit einer Frequenz von 100 Hz, die Lochscheibe mit 48 Löchern gibt bei  $1600 \pm 50$  Umdr Frequenzen von

$$f = \frac{48 \cdot (1600 \pm 50)}{60} \\ = 1240 \dots 1320 \text{ Hz.}$$

Die Resonanzfrequenz wird dementsprechend zu etwa 1400 Hz zu wählen sein. Abb. 209 zeigt ein mit diesem Geber aufgenommenes Oszillogramm.

Drehzahlmessung mit dem Vibrationsgalvanometer. Zur genauen Überwachung einer Normaldrehzahl wurde ein sehr einfaches Gerät entwickelt, das sich infolge seiner robusten Geberkonstruktion besonders für sehr hohe Drehzahlen eignet, aber keine laufende Anzeige gibt. Der Anker des Gebers besteht aus einem einfachen Kraftlinien-Leitstück im Luftspalt eines konstant erregten

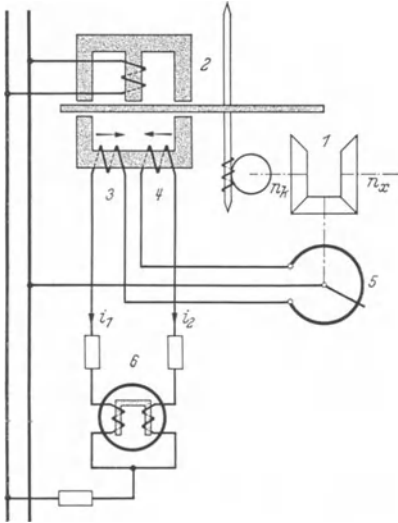


Abb. 210. Drehzahlgeber mit Nullmotor.  
1 Differentialgetriebe; 2 spannungsunabhängiger Zähler; 3 und 4 Differenzspulen des spannungsunabhängigen Zählers; 5 Widerstandsender in Potentiometerschaltung; 6 Ringeisen-Quotientenmesser.

Elektromagnets. Auf den Elektromagnet ist eine zweite Spule aufgebracht und an ein auf die Normalfrequenz abgestimmtes Vibrationsgalvanometer angeschlossen. Die Normaldrehzahl ist erreicht, wenn das Galvanometer sein Ausschlagmaximum hat. Die Genauigkeit des Gerätes wird zu  $10/100$  angegeben.

Messung kleiner Drehzahlen. Ein Verfahren zur Messung der Drehzahl einer langsam umlaufenden Welle wurde von GEYGER angegeben; es eignet sich für Drehzahlen von etwa 1 Umdr/min und kleine verfügbare Leistungen. Von der Welle, deren Drehzahl  $n_x$  gemessen werden soll (Abb. 210), wird das eine Sonnenrad eines Differentialgetriebes 1 angetrieben, das zweite Sonnenrad von einem spannungsunabhängigen Induktionszähler mit der Drehzahl  $n_k$ . Sind die beiden Drehzahlen  $n_x$  und  $n_k$  gleich groß, so steht das Planetenrad still. Mit der Achse des Planetenrades ist ein Widerstandsender 5 in Potentiometerschaltung angeschlossen.

meterschaltung verbunden. Ändert sich  $n_x$ , so ändert sich die Stellung des Widerstandssenders 5 und mit ihr die Ströme in den Differenzspulen 3 und 4; damit ändert sich auch die Drehzahl  $n_k$  solange, bis wieder  $n_k = n_x$  ist. Das Verhältnis der Ströme  $i_1$  zu  $i_2$  ist also ein Maß für die Drehzahl  $n_x$  und wird mit einem Dreheisen-Quotientenmesser 6 gemessen. Statt dessen kann auch auf die Planetenradachse ein weiterer Widerstandsender aufgesetzt werden, der das Anzeigement un mittelbar betätigt. Durch Addition der Ströme läßt sich mit diesem Verfahren auch die Summe mehrerer Drehzahlen in einfacher Weise bilden. Die Messung ist praktisch unabhängig von Spannung und Frequenz und auf etwa  $\pm 1\%$  genau.

## 2. Schlupfmessung [34].

Der Drehzahlmessung nahe verwandt ist die Schlupfmessung; das ist die unmittelbare Anzeige des Drehzahl-Unterschiedes zweier Wellen unabhängig von der Grunddrehzahl. Es ist die Schlupfdrehzahl  $n_s = n_1 - n_2$ , die Schlupffrequenz

$$f_s = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \quad (107)$$

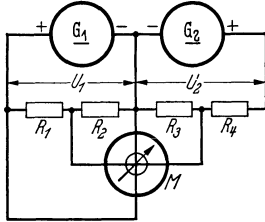
und der prozentuale Schlupf

$$\Delta n_s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% . \quad (108)$$

Schlupfmessung mit Synchronisiergeräten. Treibt man von den Wellen, deren Drehzahlen verglichen werden sollen, kleine Wechselstrom- oder Drehstrom-Generatoren an, so können sämtliche Synchronisiergeräte: Phasenlampen, Nullspannungsmesser, Lampenapparate und Synchronoskope als Schlupfmesser verwendet werden. Sie alle zeigen jedoch nicht unmittelbar an, sondern erfordern außerdem eine Zeitmessung zur Ermittlung des Schlupfwertes; sie sind also auch nicht in der Lage, Augenblickswerte zu geben und auf annähernd konstanten Schlupf beschränkt. Das Gleichstrom-Gegenstück zu diesen Geräten sind mit konstanter Spannung gespeiste Ringwiderstände, deren Schleifbürsten von den Meßwellen angetrieben werden, so daß die Größe der abgegriffenen Spannung sich bei jeder Umdrehung von Null zum Höchstwert ändert. Die beiden Spannungen werden gegeneinander auf ein Anzeigement geschaltet, das ähnlich wie ein Synchronisiergerät den Schwebungen folgt. Auch diese Geräte geben also keine unmittelbare Anzeige des Schlupfes.

Drehzahlgeber für Schlupfmesser. Unmittelbare und stetige Schlupfanzeige erhält man in der Schaltung der Abb. 211: Von den Meßwellen  $n_1$  und  $n_2$  werden die Drehzahlgeber  $G_1$  und  $G_2$  angetrieben. Die Differenz der Spannungen  $U_1 - U_2$  wird auf den Hauptstrahlen, die

Spannung eines Gebers auf den Richtrahmen eines Kreuzspul-Instruments gegeben. Der Instrumenten-Ausschlag ist demnach:



$$\alpha = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = K \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (109)$$

gibt also unmittelbar den Schlupf an. Voraussetzung ist vollkommen lineare und übereinstimmende Drehzahl-Charakteristik der beiden Geber, die nötigenfalls durch Abgleichmittel herbeigeführt werden muß.

Abb. 211.  
Schlupfmeßschaltung mit zwei Gleichstrom-Drehzahlgebern.  
 $G_1, G_2$  Gleichstrom-Drehzahlgeber;  
 $M$  Kreuzspul-Anzeigeelement;  
 $U_1, U_2$  Generatorspannungen;  
 $R_1 \dots R_4$  Belastungswiderstände.

Schlupfmessung bei Asynchronmaschinen. Von besonderem Interesse für Prüffeld und Betrieb ist die Schlupfmessung bei Asynchronmaschinen, bei denen der Schlupf im Arbeitsbereich verhältnismäßig der

Belastung ist, also zur Belastungsmessung dienen kann. Von den SSW wurde deshalb ein eigener Schlupfmesser für Asynchronmaschinen nach dem stroboskopischen Verfahren, jedoch mit stetiger Schlupfanzeige, entwickelt. Von der Achse des Asynchronmotors wird mittels einer

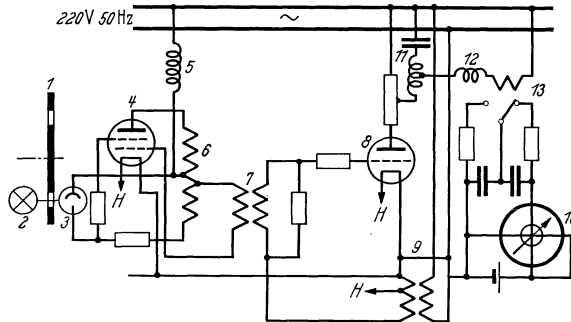


Abb. 212. Schaltung des Schlupfmessers für Asynchronmaschinen (Ausführung der Siemens-Schuckertwerke AG).

- 1 Lochscheibe auf der Welle des Asynchronmotors; 2 Glühlampe; 3 lichtelektrische Zelle;  
4 Verstärkerrohr; 5 Drosselspule; 6 Verzerrungstransformator; 7 Übertrager; 8 Stromtror;  
9 Netztransformator; 10 Kreuzspul-Instrument; 11, 12 Siebkreis;  
13 Empfangsrelais für die Impulsfrequenz-Einrichtung.

Lochscheibe ein Photozellenstrom entsprechend der Läufer-Drehzahl moduliert. Ein aus dem gleichen Netz wie der Asynchronmotor ohne Gleichrichter betriebener Verstärker verstärkt den Photostrom und überlagert ihn mit einem zweiten Strom von Netzfrequenz. Der mit der Schlupffrequenz pulsierende Ausgangsstrom wird mit einem Impulsfrequenz-Meßgerät angezeigt. Die Besonderheit des Verstärkers liegt darin, daß er mit Wechselstrom sehr spitzer Kurvenform betrieben wird, also nur während eines kleinen Teiles einer Halbwelle betriebsbereit ist und nur solche Lichtimpulse verstärken kann, die ihn während der Be-

triebsbereitschaft treffen. Die Gesamtschaltung ist in Abb. 212 gezeigt. Die Photozelle 3 steuert das Verstärkerrohr 4, dessen Gitter- und Anodenspannungen von dem über die Luftspaltdrossel 5 gespeisten Verzerrertransformator 6 geliefert werden. Ein Anodenstrom kommt nur zustande, wenn die Anodenspannungsspitze mit der Belichtung der Photozelle durch die Lochblende zusammenfällt, da die Leitfähigkeit des Verstärkerrohres auf die Zeit der Anodenspannungsspitze beschränkt ist. Der Ausgangsstrom des Verstärkers besteht also bereits aus Impulsen von der Schlupffrequenz, die der Übertrager 7 auf das Ionenrohr 8 weitergibt. Da die Zündspitze des Ionenrohrs mit dem Anodenspannungsmaximum zusammentrifft und das Ionenrohr beim Nulldurchgang der Anodenspannung erlischt, haben die von ihm gelieferten Impulse stets die gleiche Dauer einer Viertel-Periode, unabhängig von der Drehzahl und Lochzahl der Lochscheibe. Der pulsierende Ausgleichstrom wird durch eine eingliedrige Drosselkette 11 und 12 geglättet und speist das Empfangsrelais 13 der Impulsfrequenz-Meßeinrichtung 10. Der Meßbereich des Gerätes beträgt

$$s = \pm \frac{f_m \max}{2b \cdot f}. \quad (110)$$

Darin bedeutet  $f_m \max$  den Höchstwert der Impulsfrequenz (12 Hz),  $f$  die Betriebsfrequenz,  $b$  die Anzahl der Löcher/Pol. Ist beispielsweise für eine vierpolige Maschine von 1500 Umdr/min  $b = 6$ , so wird  $s = \frac{12}{2 \cdot 6 \cdot 50} = 2\%$ . Das Verfahren kann auch für Drehzahlmessung an sehr langsam laufenden Maschinen verwendet werden. Mit der oben gewählten Lochscheibe von  $4 \times 6$  Löchern und einer maximalen Impulsfrequenz von 12 Hz ergibt sich z. B. ein Meßbereich von 30 Umdr/min.

Selbstverständlich ist die Methode abhängig von der Genauigkeit der Lochscheiben-Teilung. Bei einer Mindestimpulsfrequenz von 0,5 Hz, die mit Rücksicht auf Zeigerschwankungen des Anzeigeinstruments nicht unterschritten werden soll, kann unter den genannten Verhältnissen und einer Genauigkeit der Lochscheiben-Teilung von 1% noch ein Schlupf von 0,1% einwandfrei gemessen werden.

Dem gleichen Zweck dient ein von BÖNING angegebenes Verfahren, bei dem eine Stromschleife mit dem Läufer eines zweipoligen Asynchronmotors fest verbunden wird und mit ihm umläuft. Die Schleife wird mit der Frequenz  $\omega_1$  aus demselben Netz gespeist wie der Motor und erzeugt einen magnetischen Fluß senkrecht zur Schleifenachse. Betrachtet man die Flußdichte innerhalb der Schleife und senkrecht zu ihrer Drehachse, so kann man diesen Fluß in zwei gleich große und konstante Komponenten zerlegen, von denen die eine mit der Winkelgeschwindigkeit  $2\omega_1$  im Sinne der Schleifenumdrehung umläuft, während sich die andere mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_s = \omega_1 - \omega_2$  entgegen der Schleifendrehung bewegt, wenn  $\omega_2$  die Winkelgeschwindigkeit des

Läufers ist. Eine innerhalb der Schleife und um die Schleifenachse drehbar angeordnete Magnetnadel folgt nun der mit der Schlupffrequenz langsam umlaufenden Feldkomponente und gibt somit unmittelbar den Schlupf an. Die Drehgeschwindigkeit der Magnetnadel wird nach einem der vorher beschriebenen Verfahren der Drehzahlmessung, etwa dem Impulsfrequenz-Verfahren, ferngemessen. Bei mehrpoligen Maschinen wird entweder der Schlupfmesser ebenfalls mehrpolig ausgeführt oder über ein Übersetzungsgetriebe mit dem Läufer des Asynchronmotors verbunden.

### 3. Messung von Fahrzeuggeschwindigkeiten.

Mittlere Geschwindigkeiten von See-, Land- und Luftfahrzeugen werden am genauesten durch eine Längen- und eine Zeitmessung ermittelt, indem man die zum Durcheilen einer abgemessenen Wegstrecke erforderliche Zeit bestimmt und die Geschwindigkeit daraus errechnet. Die Verfahren arbeiten also völlig analog dem Stich-Drehzähler. Der Weg wird dabei selten durch elektrische Messung ermittelt, während die Zeitmessung, zum mindesten aber das Ein- und Ausschalten der Zeitmeßgeräte, häufig elektrisch erfolgt. Wir werden auf diese Verfahren bei der Zeitmessung eingehen. Die Augenblicksgeschwindigkeit von

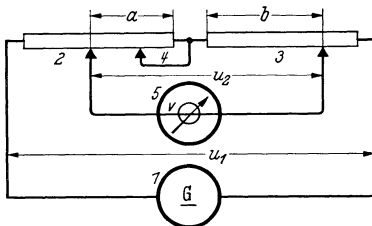


Abb. 213. Schaltung des Schnittgeschwindigkeitsmessers von Siemens & Halske.

1 Drehzahlgeber; 2 unterer Quersupport mit dem Widerstand  $r_2$ ; 3 oberer Quersupport mit dem Widerstand  $r_3$ ; 4 Einstellung der Stahllänge (abgegriffener Widerstand  $r_4$ ); 5 Drehschul-Anzeigegerät.

Landfahrzeugen wird mit Drehzahlmessern, die von Luft- und Seefahrzeugen außerdem mit Flügelrad-, Staudruck- und Peilgeräten ermittelt, die außerhalb unserer Betrachtung bleiben.

### 4. Schnittgeschwindigkeitsmesser.

An schnell laufenden Werkzeugmaschinen, z. B. Drehbänken, ist es häufig erwünscht, außer der Drehzahl die Schnittgeschwindigkeit, also

das Produkt Drehzahl mal Arbeitsdurchmesser, unmittelbar abzulesen. Dafür stehen zwei Verfahren zur Verfügung. Der Schnittgeschwindigkeitsmesser von Dr. TH. HORN ist ein Wirbelstrom-Drehzahlmesser, dessen bewegliche Trommel, abhängig von der Stellung des Arbeitsstahles, mehr oder weniger in das Feld des umlaufenden Magnets eintaucht. Das Drehmoment ist proportional der Drehzahl und der Eintauchtiefe, somit der Schnittgeschwindigkeit.

Für Drehbänke mit mehreren Quersupporten anwendbar ist das von Siemens & Halske entwickelte Verfahren (Abb. 213). Dabei wird von der Hauptspindel ein Drehzahlgeber 1 mit linearer Charakteristik angetrieben.

An den beiden Quersupporten sind zwei in Reihe geschaltete Schiebewiderstände 2 und 3 angebracht, deren Abgriffe sich mit der Supportstellung verändern und die von der Spannung des Drehzahlgebers gespeist werden. Die Spannung am Anzeigeelement ist dann  $u_2 = k \cdot (a + b) \cdot u_1$ ;  $u_1$  aber ist proportional der Drehzahl, folglich  $u_2 = k_2 \cdot (a + b) \cdot n = v$ . Darin bedeutet  $n$  die Wellen-Drehzahl,  $a$  und  $b$  die Supportstellungen, von der Nullstellung aus gerechnet, für die  $a = b = 0$  ist. In diesem Fall steht der Meißel also auf Spindelmitte. Die verschiedene Länge des Arbeitsstahles wird durch Einstellung des Abgriffes 4 berücksichtigt. In Verbindung mit dem früher beschriebenen Schnittkraftmesser gibt der Schnittgeschwindigkeitsmesser die Möglichkeit eingehender Untersuchung der Maschinenleistung und des Wirkungsgrads. Erforderlichenfalls kann das Produkt aus Schnittkraft und Schnittgeschwindigkeit elektrisch gebildet werden.

### 5. Messung von Geschoßgeschwindigkeiten [35].

Für den Ballistiker ist die Kenntnis der Anfangsgeschwindigkeit von Geschossen von außerordentlichem Interesse, und es wurden seit langem zahlreiche Verfahren zu ihrer Ermittlung entwickelt, die sämtlich auf eine Kurzzeitmessung zurückgehen. Einige dieser Zeitmeßverfahren sind jedoch so sehr auf die Geschoßgeschwindigkeit zugeschnitten, daß sie an dieser Stelle behandelt werden können. Das fliegende Geschoß wirkt auf den elektrischen Meßkreis auf verschiedene Weise ein:

a) Mechanisch durch unmittelbare Betätigung eines Kontaktes beim Verlassen des Rohres, durch Herstellen einer leitenden Verbindung beim Durchschlagen zweier in geringem Abstand isoliert voneinander aufgestellten Metallplatten oder durch Unterbrechung des Stromkreises beim Zerschlagen eines aus glasharten, elektrisch in Reihe geschalteten Stahldrähten bestehenden sog. Bensberg-Gitters.

b) Induktiv beim Durchfliegen eines magnetisierten Stahlgeschosses durch eine Luftdrossel oder eines nichtmagnetisierten Geschosses durch einen eisenlosen Wandler.

c) Lichtelektrisch durch Verdunkeln einer Photozelle.

Ballistisches Galvanometer. Beim Austritt aus dem Rohr öffnet das Geschoß einen Kurzschlußkontakt und schaltet ein ballistisches Galvanometer ein, dessen Stromkreis es nach Durchfliegen der Meßstrecke durch Zerschlagen eines Bensberg-Gitters wieder unterbricht. Wenn das Galvanometer von einem konstanten Strom gespeist wird, ist sein Ausschlag proportional der Zeit zwischen den beiden Schaltungen. Werden am Anfang und Ende der Meßstrecke Bensberg-Gitter benutzt, so ist mit einem gewissen Geschwindigkeitsverlust des Geschosses infolge des Zerschlagens des ersten Gitters und einer entsprechenden Fehlmessung zu rechnen. Der Geschwindigkeitsverlust kommt zustande



durch ungleichmäßiges Durchbiegen ungenügend gespannter Leiter vor dem Zerreißen, durch das Erteilen einer gewissen Geschwindigkeit an die weggeschleuderten Teile und durch das Schleifen der Enden des zerrissenen Leiters auf dem Geschoß. Ein weiterer Fehler kann hervorgerufen werden, wenn das Geschoß nicht mit der Spitze auf das Gitter auftrifft.

Vereinigung von Geschwindigkeits- und Druckmessung. Häufig wird Verbrennungsdruck und Geschwindigkeit gemeinsam mit einem Schleifenoszillographen oder einem Kathodenoszillographen aufgezeichnet. Beim Schleifenoszillographen oder beim Mehrstrahl-Kathodenoszillographen macht es keine Schwierigkeiten, mehrere Vorgänge nebeneinander, also Druckverlauf und Geschwindigkeitsmarke, aufzuzeichnen. Beim Einstrahl-Kathodenoszillographen kann man der Druckverlaufkurve besondere Geschwindigkeitsmarken überlagern. Beispielsweise wird beim Abschuß die Erdung der Ablenkplatte aufgehoben, beim Verlassen des Laufes die Ablenkplatte kurzzeitig durch das Geschoß geerdet und nach Durchfliegen einer bekannten Meßstrecke ein Benschberg-Gitter zerstört und der Kathodenstrahl völlig aus der Schreibfläche gelenkt.

#### IV. Messung von Beschleunigungen, Schwingungen und Erschütterungen.

Die Beschleunigung kann als zweiter Differentialquotient des Weges nach der Zeit auf eine Länge, als erster Differentialquotient der Geschwindigkeit nach der Zeit auf eine Geschwindigkeit oder nach dem bekannten Zusammenhang Beschleunigung =  $\frac{\text{Kraft}}{\text{Masse}}$  auf eine Kraft zurückgeführt werden. In den ersten beiden Fällen ist eine doppelte bzw. einfache elektrische Differentiation erforderlich, während das letzte Verfahren die Beschleunigung unmittelbar angibt. Geradlinige Beschleunigungen werden vorzugsweise auf eine Kraft, Drehbeschleunigungen auf eine Geschwindigkeit zurückgeführt, Wechselbeschleunigungen werden nach allen drei Verfahren gemessen. Die auftretenden Fehler sind, wie bei allen mechanisch-elektrischen Messungen, in einer Beeinflussung des mechanischen Vorganges durch die Rückwirkung des elektrischen Gebers, sowie in einer fehlerhaften Anzeige oder Aufzeichnung des geänderten mechanischen Vorganges infolge der inneren Fehler des Meßgerätes oder des Meßverfahrens zu suchen. Es wird demnach in jedem Einzelfall die Eignung eines Gerätes hinsichtlich Kraftbedarf, Meßbereich, Auflösungsvermögen und Meßgenauigkeit zu prüfen sein.

##### 1. Drehbeschleunigungsmesser [36].

Durch Differenzierung der Geschwindigkeit. Zur Messung von Drehbeschleunigungen aus der Drehgeschwindigkeit wird auf die

Meßwelle ein Gleichstromgenerator hoher Spannung mit möglichst geringer Welligkeit, linearer Drehzahlcharakteristik und konstanter Erregung aufgesetzt und die bei Drehzahlschwankungen auftretenden Spannungsänderungen über Kondensator oder Wandler als differenzierende Glieder gemessen. Die Schaltung des Kondensatorverfahrens von Ytterberg zeigt Abb. 214. Es bezeichnet:

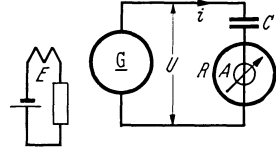


Abb. 214. Drehbeschleunigungsmesser nach Ytterberg.  
*G* Gleichstrom-Generator;  
*E* konstante Erregung des Gleichstrom-Generators;  
*A* Anzeiginstrument;  
*C* Meßkapazität;  
*R* Widerstand des Meßkreises.

- U* Maschinenspannung [V],
- i* Strom im Meßkreis [A],
- R* Widerstand des Meßkreises [ $\Omega$ ],
- C* Kapazität des Meßkondensators [F],
- $T = R \cdot C$  Zeitkonstante des Meßkreises,
- t* Zeit [s],
- $\omega$  Winkelgeschwindigkeit [ $s^{-1}$ ]. Die Winkelwege werden im Bogenmaß gemessen, bezogen auf den Halbmesser *l*.
- k* Maschinenkonstante,
- e* Basis der natürlichen Logarithmen.

Für den Meßkreis gilt:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} \cdot i + R \cdot \frac{di}{dt}. \quad (111)$$

Nun ist für einen Drehzahlgeber  $U = k \cdot \omega$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{i}{k \cdot C} + \frac{R}{k} \cdot \frac{di}{dt}. \quad (112)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung lautet:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{i}{k \cdot C \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)}. \quad (113)$$

Die Änderung der Winkelgeschwindigkeit  $d\omega/dt$  entspricht aber der Winkelbeschleunigung, die somit durch den Strom *i* und die Konstanten des Meßkreises ausgedrückt ist. Das Glied  $e^{-\frac{t}{RC}}$  ist ein Fehlerglied und stellt die durch den ohmschen Widerstand des Meßkreises hervorgerufene zeitliche Verzögerung dar; es verschwindet für  $R = 0$  und die Lösung lautet dann einfach:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{i}{k \cdot C}. \quad (114)$$

Ferner verschwindet das Fehlerglied für  $\frac{di}{dt} = 0$ , wie aus der Differentialgleichung (111) hervorgeht, d. h. im Augenblick des Strommaximums ist der Strom direkt proportional der Beschleunigung. Bei der Festlegung der Stromkreisconstanten ist das Fehlerglied durch Einsetzen verschiedener

Werte von  $t$  zu berechnen. Für  $t = 4 \cdot R \cdot C$  ergibt sich beispielsweise ein Fehler von etwa 2%. Die Messung wird selbstverständlich durch die Welligkeit der Spannungskurve erheblich gefälscht, da der Wechselstromanteil Beschleunigungen vortäuscht. Es ist deshalb ein Generator mit sehr kleinen Nutenharmonischen oder ein besonderer Siebkreis erforderlich.

**Kraftmessung.** Die Verfahren von KLUGE-LINCKH und LUND beruhen auf der Messung der beschleunigenden Kraft einer umlaufenden Hilfsmasse. Beim kapazitiven Verfahren besteht der Geber aus einer mit der Maschinenwelle durch eine hohle Meßwelle verbundenen Schwungmasse nach Abb. 215. Die festen Kondensatorplatten sind

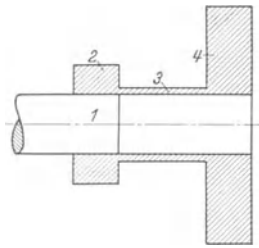


Abb. 215. Aufbau des kapazitiven Drehbeschleunigungsmessers.

1 Maschinenwelle;  
2 Befestigungsflansch; 3 hohle Meßwelle; 4 Schwungmasse.

mit der Maschinenwelle, die beweglichen mit der Schwungmasse verbunden. Beim Auftreten von Beschleunigungen ändert sich der Abstand der Kondensatorplatten infolge der elastischen Verdrehung der Hohlwelle unter dem Einfluß der Beschleunigungskräfte und die Kapazitätsänderung wird in einer der bekannten Schaltungen gemessen. Beim piezoelektrischen Drehbeschleunigungsmesser werden die bei Beschleunigungen zwischen der Meßwelle und einer mit ihr elastisch verbundenen Schwungmasse auftretenden Druckkräfte von Piezoquarz-Druckdosen aufgenommen und unmittelbar gemessen. Die optische Achse der Piezoquarze wird dabei in die Richtung der Zentrifugalkraft gelegt, so daß deren Änderungen keine Ladungsänderungen hervorzubringen vermögen. Der Einspannung der Quarze ist besondere Aufmerksamkeit zuzuwenden. Beide Verfahren arbeiten elektrostatisch und sind dadurch unabhängig von der Größe der Übergangswiderstände an den Schleifringen.

## 2. Schwingungsmesser [37].

Weitaus am häufigsten und meßtechnisch am interessantesten sind Wechselbeschleunigungen, Schwingungen und Erschütterungen. Die Schwingungsmesser bestehen aus einer federnd aufgehängten schwingungsfähigen Masse mit geeigneter Dämpfung, deren Bewegungen nach einem der nun schon geläufigen Verfahren in eine elektrische Größe umgewandelt werden oder einen elektrischen Stromkreis beeinflussen. Die wichtigste Eigenschaft dieser Geräte ist die Eigenfrequenz des Schwingungssystems.

Ist die Eigenfrequenz des schwingungsfähigen Systems klein gegen die Frequenz der zu messenden Schwingung und die Dämpfung hinreichend gering, so bleibt die federnd aufgehängte Masse während der

Schwingung in Ruhe und wir haben einen Wegmesser vor uns, bei dem die Relativbewegung zwischen der in Ruhe bleibenden Masse und ihrem, starr mit dem schwingenden Körper verbundenen Traggestell unmittelbar den Verlauf der Schwingung angibt. Größenordnungsmäßig soll bei richtiger Dämpfung das Verhältnis der tiefsten zu messenden Frequenz  $f$  zur Eigenfrequenz  $f_0$  der schwingungsfähigen Masse  $f/f_0 \geq 4$  sein. Die Eigenfrequenzen der Übertragungs- und Schreibglieder sollen dagegen wesentlich höher als die höchste Meßfrequenz liegen. Schwingungsmesser dieser Art eignen sich besonders für stetige Vorgänge, für Erschütterungsmessungen sind sie wegen der durch Einschwingerscheinungen hervorgerufenen großen Fehler wenig geeignet.

Ist die Eigenfrequenz des schwingungsfähigen Systems groß gegen die Frequenz der zu messenden Schwingung, so wird die zwischen der schwingungsfähigen Masse und ihrem Traggestell auftretende Kraft proportional der Beschleunigung. Diese Kraft kam entweder unmittelbar oder auf dem Umweg über die Durchbiegung der Aufhängung gemessen werden. Das Frequenzverhältnis  $f/f_0$  darf bei günstigster Dämpfung den Wert 0,5 nicht überschreiten, wenn Amplituden- und Phasenfehler in erträglichen Grenzen bleiben sollen. Bei ungünstigerer Dämpfung ist das Frequenzverhältnis noch kleiner zu halten. Die Eigenfrequenz der Übertragungs- und Anzeigeglieder muß so hoch wie möglich gewählt werden.



Abb. 216. Kohledruck-Beschleunigungsmesser der Siemens & Halske AG.

Wir können also je nach dem Verhältnis  $\frac{f}{f_0} = \frac{\text{Schwingungsfrequenz}}{\text{Eigenfrequenz}}$  dieselben Geräte als Schwingungs- oder Beschleunigungsmesser verwenden. Von wesentlichem Einfluß auf die richtige Wiedergabe der Schwingungsvorgänge ist bei beiden Geräten der Dämpfungszustand und es muß deshalb die Forderung nach einer bequem einstellbaren, unveränderlichen und temperaturunabhängigen Dämpfung erhoben werden. Ferner sollen die Geräte lageunabhängig und instande sein, Schwingungen in allen 3 Raumkoordinaten aufzunehmen.

Beschleunigungsmesser nach dem Widerstandsverfahren [38]. In Abb. 216 ist die Ansicht, in Abb. 217 ein Längsschnitt durch einen Kohledruck-Beschleunigungsmesser der Siemens & Halske AG. gezeigt. Die schwingende Masse 1 ist zwischen zwei Membranen aus Bronze- folie federnd aufgehängt. Die Membranen 2 sind auf Halteringe aufgelötet und durch Ringmuttern 4 und 5 an der schwingungsfähigen Masse bzw. am Gehäuse 6 gehalten. Die Membranen stehen unter Vorspann. Der Raum 13 zwischen den beiden Membranen ist mit einer Dämpfungsflüssigkeit gefüllt und durch Ringe aus ölfestem Gummi

abgedichtet. Die schwingende Masse ist von beiden Seiten her bis fast in die Mitte axial eingedreht und trägt auf jeder Seite eine aus mehreren Ringen bestehende Kohlesäule 10. Die Kohlerringe werden auf einem Stift 12 geführt und stützen sich über die Isolationsstücke 11 einerseits auf die schwingende Masse, andererseits auf das Gehäuse ab. Die nötige Vorspannung wird mit der Überwurfmutter 8 eingestellt. Durch den geringen Abstand der beiden Kohlesäulen wird der Einfluß von Quer-

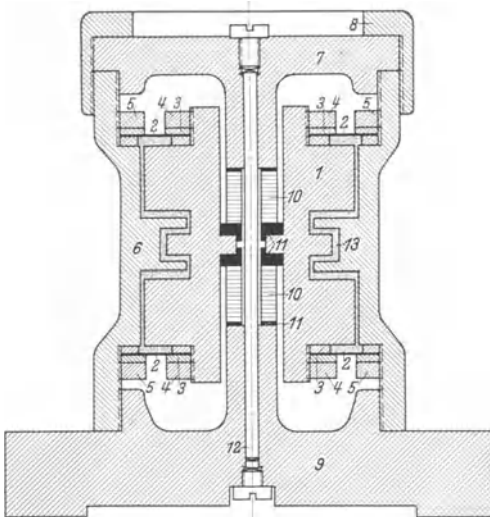


Abb. 217. Schnitt durch den Kohledruck-Beschleunigungsmesser der Siemens & Halske AG.

1 Schwingungskörper; 2 Membran; 3 Membranhaltering; 4 Ringmutter zur Befestigung der Membran am Schwingungskörper; 5 Ringmutter zur Befestigung der Membran am Gehäuse; 6 Gehäuse; 7 Gehäusedeckel; 8 Überwurfmutter; 9 Gehäuseboden; 10 Kohlesäule; 11 Isolierstück; 12 Führungsstift; 13 Ölfüllung.

beschleunigungen weitgehend aufgehoben, so daß tatsächlich nur in der Achsrichtung auftretende Beschleunigungskräfte gemessen werden. Das Gerät wird mit seiner Grundplatte 9 auf den zu messenden Körper aufgeschraubt und hat bei einem Durchmesser von 50 und einer Höhe von 85 mm ein Gewicht von 280 bzw. 380 g, wobei das kleinere Gewicht dem Meßbereich 2...25 g, das größere dem Meßbereich 8...50 g entspricht. Die Eigenfrequenz des schwingungsfähigen Systems ist 400 bis 600 Hz, die Anzeigenauigkeit  $\pm 5\%$ . Die Messung erfolgt in einer Wheatstone-

Brücke oder in einer Differenzschaltung mit nahezu linearem Skalenverlauf und hinreichend kleinem Temperaturfehler. Wegen der Inkonstanz der Kohlesäulen ist von Zeit zu Zeit eine Nacheichung notwendig. Als Anwendungsgebiet kommt die Messung großer Beschleunigungen (über 2 g) bei hinreichend großen bewegten Massen in Frage, da durch das Eigengewicht sonst eine erhebliche Fälschung des Beschleunigungsvorganges auftritt.

An Stelle der Widerstandsänderung einer Kohlesäule wird bei einem von GERLOFF angegebenen eigenartigen Apparat die Widerstandsänderung von Konstantan-Drähten mit der Zugspannung benutzt. Die bewegliche Masse des Gerätes ist an drei Systemen aus je 100 dünnen zwischen der Masse und dem Gestell straff ausgespannten Drähten federnd aufgehängt. Die senkrechten Drähte sind durch das Gewicht der Schwingmasse, die waagerechten durch Federn vorgespannt. Die

Richtkraft dieser Federn ist gegenüber derjenigen der 100 Drähte zu vernachlässigen. Die 100 Drähte eines Systems sind elektrisch in Reihe geschaltet und von einem konstanten Gleichstrom durchflossen. Die Beschleunigungskräfte ändern den elastischen Spannungszustand der Drähte und rufen eine Widerstandsänderung hervor; die entsprechenden Spannungsänderungen werden verstärkt und gemessen. Bei der Beschleunigung  $b$  tritt eine Spannungsänderung  $de$  auf

$$de = i \cdot \frac{l}{q^2} \cdot m \cdot \rho \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dS} \cdot b, \quad (115)$$

darin bedeuten:

- $R$  Widerstand der in Reihe geschalteten Drähte,
- $S$  Zugkraft je belastetem Querschnitt,
- $\rho$  spezifischer Widerstand,
- $m$  Größe der trägen Masse,
- $i$  Stromstärke,
- $q$  Querschnitt eines Drahtes,
- $l$  Länge eines Drahtes.

Das Gerät hat eine Eigenfrequenz von 200 Hz und den Meßbereich  $1 \cdot 10^{-3} \dots 3$  g. Die träge Masse ist ein Eisenzylinder von 4 cm Durchmesser und 4 cm Höhe. Die Spanndrähte sind 70 mm lang. Bei einem

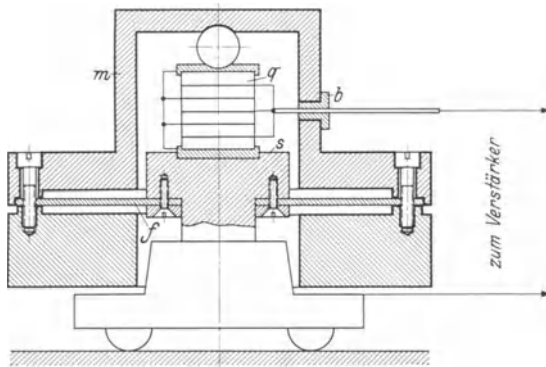


Abb. 218. Piezoquarz-Beschleunigungsmesser der PTR. (Aus Arch. techn. Messen J 163—1.)  
*m* Träge Masse; *q* Quarzsäule; *s* Stempel; *f* Membran; *b* Bernsteindurchführung.

Gesamtwiderstand von  $1000 \Omega$ /System beträgt die Widerstandsänderung  $1\%/1$  g. Für Betriebsmessungen dürfte das Gerät in der vorliegenden Ausführung kaum in Frage kommen.

Piezoelektrischer Beschleunigungsmesser [39]. Ein hoch abgestimmter piezoelektrischer Beschleunigungsmesser wurde von der PTR entworfen (Abb. 218); er hat eine Eigenfrequenz von 4 kHz und ist ohne Dämpfung ausgeführt. Die 5 kg schwere träge Masse  $m$  des Gerätes

ist mit der Tellerfeder  $f$  am Bock  $s$  aufgehängt und übt einen der Beschleunigung proportionalen Druck auf die Quarzsäule  $q$  aus. Die Ladungen des Meßquarzes werden dem hochisolierten Gitter eines Verstärkerrohres zugeführt und steuern nach zweistufiger Verstärkung einen Oszillographen oder ein Anzeigeeinstrument aus. Die piezoelektrischen Beschleunigungsmesser haben die höchste Empfindlichkeit und die Vergrößerung dieses und ähnlicher Beschleunigungsmesser beträgt  $10^6 \dots 10^7$ . In Deutschland werden die piezoelektrischen Geräte vorwiegend mit Quarzsäulen ausgerüstet, während die amerikanische Praxis im Gegensatz hierzu Seignette-Salz (Rochelle-Salz  $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_5 + 4\text{H}_2\text{O}$ ) bevorzugt, das zwar einen großen piezoelektrischen Modul, jedoch gegenüber Quarz und Turmalin geringe spezifische Festigkeit, große Temperatur- und

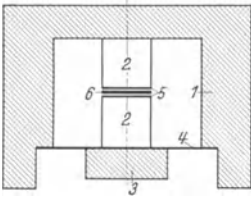


Abb. 219. Kapazitiver Beschleunigungsmesser von KLUGE, LINCKH.  
1 Gehäuse; 2 Isolation; 3 träge Masse;  
4 Membran; 5 Kondensatorbeläge;  
6 festes Dielektrikum.

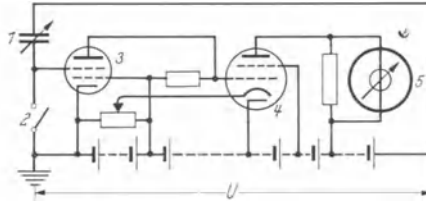


Abb. 220. Schaltung des kapazitiven Beschleunigungsmessers von KLUGE, LINCKH.  
1 Geberkondensator; 2 Erdungsschalter; 3 Raumladegitterröhre als hochisolierte Eingangsstufe; 4 Schirmgitterröhre als Verstärker für Kathodenszillographen; 5 Kathodenszillograph;  $U$  Hilfsspannung des Gebers.

Feuchtigkeitsabhängigkeit, sowie eine gewisse Beschränkung der Linearität seiner piezoelektrischen Eigenschaften aufweist. Bei der Konstruktion von Geräten mit Seignette-Salz muß auf diese Eigenschaften Rücksicht genommen werden, außerdem ist eine häufige Nacheichung erforderlich. Die Seignettesalz-Säulen werden vorzugsweise aus dünnen Platten unter Zwischenlage von Zinnfolien zusammengelötet und an drei Ecken gefaßt, während auf die vierte Beschleunigungskräfte einwirken und eine Verbiegung des Plattenpakets hervorrufen.

Kapazitive Verfahren [40]. Völlig ähnlich sind die kapazitiven Beschleunigungsmesser aufgebaut, wie am Beispiel der Abb. 219 gezeigt ist. Ein festes Stahlgehäuse  $I$  ist unten durch die gewichtstragende Membran  $4$  abgeschlossen. Im Gehäuse ist der Kondensator  $5$  auf den Isolatoren  $2$  angeordnet; er hat ein festes Dielektrikum, um kleinen Plattenabstand zu ermöglichen, ohne die Gefahr der Überbrückung durch feine Staubteilchen. Mit den Bezeichnungen

- $U$  Gleichspannung am Kondensator,
- $C$  Kondensatorkapazität,
- $h$  Plattenabstand,
- $\omega$  Kreisfrequenz der Beschleunigung,
- $\omega_0$  Eigenkreisfrequenz des Meßgerätes,

wobei  $\omega_0$  sehr viel größer als  $\omega$ , gilt ohne Berücksichtigung der Dämpfung für die Schwingung

$$a = a_0 \sin \omega t \quad (116)$$

$$\Delta h = \frac{a_0 \cdot \sin \omega t}{\omega_0^2} = \frac{a}{\omega_0^2} \quad (117)$$

$$\Delta U = -U \cdot \frac{\Delta C}{C} = U \cdot \frac{\Delta h}{h} = \frac{U}{h} \cdot \frac{a}{\omega_0^2} \quad (118)$$

Mit dem Gerät können Beschleunigungen von einigen  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$  bei Frequenzen bis zu 1000 Hz gemessen werden. Die Vergrößerung beträgt bei 1000V Betriebsspannung  $1 \cdot 10^6$ . Die Schaltung geht aus Abb.220 hervor. Durch Schließen des Schalters 2 wird der Kondensator auf die Meßspannung  $U$  aufgeladen und das Eingangsrohr 3 geerdet. Nach dem Öffnen des Schalters wirken die Spannungsänderungen  $\Delta U$  auf das Gitter des Eingangsrohres und werden nach Verstärkung gemessen.

Induktiver Beschleunigungsmesser [41]. An Stelle des kapazitiven Gebers kann natürlich auch ein induktiver Geber treten, beispielsweise der tiefabgestimmte Vibrograph von SIEBER (Abb. 221). Der Geber besteht aus einem in einem Gehäuse federnd aufgehängten und mit Ölbremse aperiodisch gedämpften Bleiring, dessen Eigenfrequenz in gedämpftem Zustand etwa 3 Hz beträgt. Mit der Bleimasse sind 2 Transformatorkerne mit Luftspalt so verbunden, daß ihre Luftspalte im Ruhezustand gleich groß sind und sich bei Erschütterungen im umgekehrten Sinn ändern (Abb. 222). Die Primärwicklungen der beiden Transformatoren bilden mit der Anodendrossel und den Sperrkondensatoren den Schwingkreis eines rückgekoppelten 500 Hz-Röhrengenerators. Die gegeneinander geschalteten Sekundärwicklungen liegen am Eingang eines Verstärkers, dessen Ausgang über eine Gleichrichter-

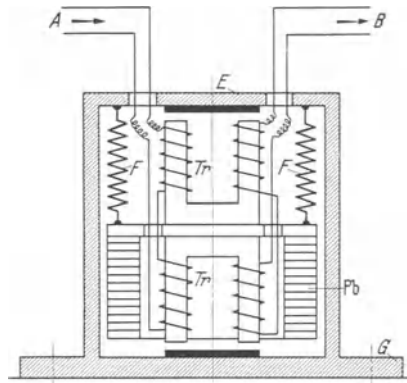


Abb. 221. Elektromagnetischer Vibrograph. (Aus Arch. techn. Messen V 171—2.)  
*A* Anschluß des Röhrengenerators; *B* Anschluß des Verstärkers; *E* Gehäuse; *F* Gegenfedern; *G* Grundplatte; *Tr* Transformator; *Pb* schwingende Masse.

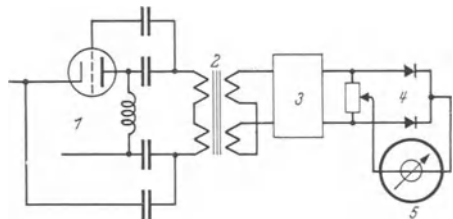


Abb. 222. Schaltung des Vibrographen von SIEBER.  
 1 Röhrengenerator; 2 induktiver Geber; 3 Verstärker; 4 Gleichrichter; 5 Tintenschreiber.



schaltung einen Drehspul-Tintenschreiber speist. Abb. 223 ist eine Ansicht des ausgeführten Gerätes, auf welcher die Öldämpfung und die federnde Aufhängung gut zu erkennen sind. Als Verwendungsbereich werden die Grenzen 4...250 Hz angegeben. Der Temperatureinfluß wurde durch geeigneten Aufbau aus Messing und Invar bis auf einen kleinen Restfehler kompensiert. Der Einfluß kurzzeitiger Temperaturschwankungen wird durch eine wärmeisolierende und gleichzeitig die magnetische Abschirmung übernehmende Hülle unschädlich gemacht.

Elektrodynamischer Schwingungsmesser. Die Differentialgleichung für die Bewegung einer schwingungsfähigen trägen Masse lautet:

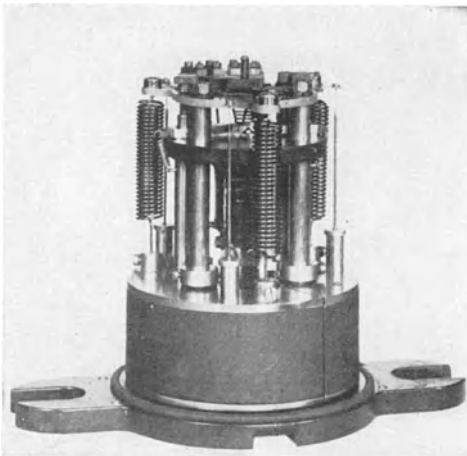


Abb. 223. Ansicht des Vibrographen von SIEBER ohne Kappe. (Aus Arch. techn. Messen V 171—2.)

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 \xi}{dt^2} + 2 \varepsilon_s \cdot \frac{d \xi}{dt} + \\ + \omega_s^2 \xi = - C_1 \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \end{aligned} \right\} (119)$$

Darin bedeuten:

$x$  Amplitude der aufzuzeichnenden Schwingung,

$\xi$  relative Bewegung der trägen Masse,

$\varepsilon_s$  die Dämpfungskonstante des Schwingungsmessers,

$\omega_s$  die ungedämpfte Eigenfrequenz des Schwingungsmessers,

$C_1$  eine Konstante.

Beim elektrodynamischen Schwingungsmesser

mit Tauchspule wird nun durch den Einbau eines differenzierenden Gliedes an Stelle der relativen Bewegung  $\xi$  die Geschwindigkeit  $d\xi/dt$  mit einem zweiten schwingungsfähigen System aufgezeichnet entsprechend

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \varepsilon_G \cdot \frac{d \varphi}{dt} + \omega_G^2 \cdot \varphi = C_2 \frac{d \xi}{dt} \quad (120)$$

Darin bedeuten:

$\varphi$  Ausschlag des Anzeigeelements,

$\varepsilon_G$  Dämpfungskonstante des Anzeigeelements,

$\omega_G$  ungedämpfte Eigenfrequenz des Anzeigeelements,

$C_2$  eine Konstante.

Ist die aufzuzeichnende Meßgröße  $x$  eine sinusförmige Schwingung von der Frequenz  $\omega$ ,  $x = c \cdot \sin \omega t$ , so erhalten wir je nach dem Verhältnis der Eigenfrequenzen des Schwingungsgebers  $\omega_s$  und des Anzeigesystems  $\omega_G$  zu der Frequenz der aufzunehmenden Schwingung  $\omega$  folgende Anzeigeverhältnisse:

a) Die Eigenfrequenzen des Schwingungsgebers und des Anzeigesystems sind sehr groß gegenüber der Frequenz der aufzunehmenden Schwingung  $\omega_s \gg \omega$ ;  $\omega_G \gg \omega$ . Die Aufzeichnung ist proportional der Beschleunigung ( $\varphi \sim \omega^3$ ).

b) Die Eigenfrequenz des Schwingungsgebers ist niedrig gegenüber der Meßfrequenz, die Aufzeichnung erfolgt jedoch mit einem Galvanometer hoher Eigenfrequenz  $\omega_s \ll \omega$ ;  $\omega_G \gg \omega$ . Die Aufzeichnung ist proportional der Geschwindigkeit ( $\varphi \sim \omega$ ).

c) Die Eigenfrequenz des Schwingungsgebers ist hoch gegenüber der Meßfrequenz, aber die Aufzeichnung erfolgt mit einem Meßgerät niedriger Eigenfrequenz  $\omega_s \gg \omega$ ;  $\omega_G \ll \omega$ . Die Aufzeichnung erfolgt proportional der Geschwindigkeit ( $\varphi \sim \omega$ ).

d) Der Schwingungsgeber ist niedrig abgestimmt gegenüber der aufzunehmenden Schwingung und das Galvanometer hat ebenfalls eine niedrige Eigenfrequenz  $\omega_s \ll \omega$ ;  $\omega_G \ll \omega$ . Die Aufzeichnung ist proportional dem integrierten Schwingweg ( $\varphi \sim 1/\omega$ ). Von praktischer Bedeutung sind in erster Linie die Ausführungsformen a und b.

Der elektrodynamische Schwingungsmesser besteht aus einer mit der schwingenden Masse verbundenen Tauchspule, die sich im ringförmigen Luftspalt eines Lautsprechermagnets bewegt. Die grundsätzliche Abb. 224 zeigt einen Erschütterungsmesser mit kleiner Masse (20...30 g), dessen Rückstellkraft durch zwei kreuzweise gespannte Stahldrähte gegeben ist, während Abb. 225 die Ansicht eines Gerätes mit großer Masse (0,5...1 kg) ist. Beim Anschluß eines stromverbrauchenden Anzeigeinstrumentes an einen solchen Schwingungsgeber tritt durch die Induktivität des Meßkreises ein Amplitudenfehler auf von der Größe

$$\Delta\varphi = \frac{1}{4} \cdot \omega \cdot \frac{L}{R} \cdot 100\%, \quad (121)$$

wenn  $\omega$  die Kreisfrequenz der zu messenden Schwingung und  $L/R$  die Zeitkonstante des Meßkreises bezeichnen. Der Fehler wächst also mit steigender Frequenz und muß durch die Schaltung kompensiert werden.

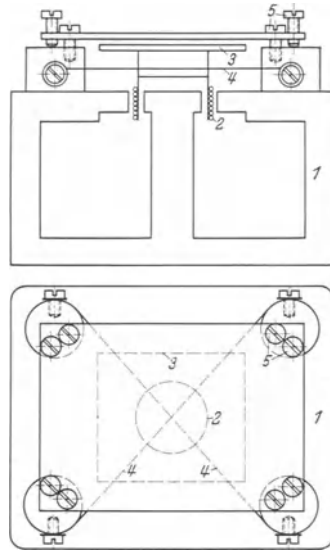


Abb. 224. Grundsätzliche Darstellung des elektrodynamischen Schwingungsgebers von H. MARTIN. [Aus Phys. Z. Bd. 40 (1933) S. 580.]  
 1 Lautsprechermagnet; 2 Schwingspule; 3 Dämpfungsplatte; 4 Spanndrähte; 5 Zug- und Druckschrauben zur Einstellung des Luftspaltes der Dämpfungsplatten.

Nach dem selbstdifferenzierenden Tauchspulen-Verfahren arbeitet auch der in Abb. 226 zur Hälfte dargestellte *Reutlinger* Schwingungsmesser. Die schwingende Masse von 50 g Gewicht besteht aus zwei

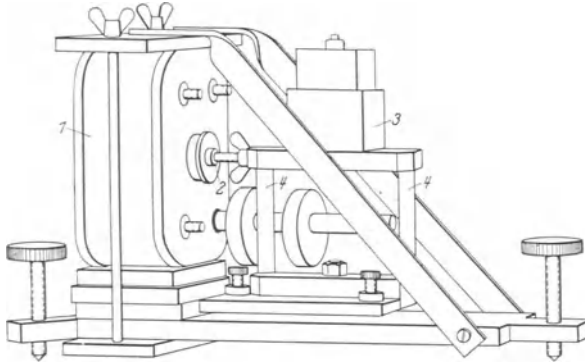


Abb. 225. Elektrodynamischer Schwingungsmesser mit schwerem System.  
[Aus Phys. Z. Bd. 40 (1933) S. 580.]

1 Lautsprechermagnet; 2 Schwingspule; 3 schwingende Masse; 4 Aufhängefedern.

über die Stoßstange *e* gekuppelten Tauchspulen *d* und ist an den auswechselbaren Rückstellfedern *c* aufgehängt. Durch Wirbelströme in zwei auf die Tauchspulen aufgebrauchten Kurzschlußwicklungen wird aperiodische Dämpfung erreicht. Die Tauchspulen bewegen sich im ringförmigen Luftspalt zweier durch die Wicklungen *b* erregter Topfmagnete *a*. Der Systemaufbau entspricht also vollkommen dem zweier gekoppelter elektrodynamischer Lautsprechersysteme. Die in den Tauchspulen induzierten Spannungen sind proportional der Bewegungsgeschwindigkeit, also der Schwingungsamplitude und Frequenz;

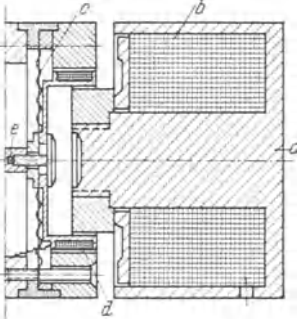


Abb. 226. Elektromagnetischer Schwingungsmesser nach TEMME.  
[Aus Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 1159.]  
*a* Joch; *b* Magnetspule; *c* Membran; *d* Induktionsspule; *e* Stoßstange.

si werden bei bekannter Frequenz mit einem Drehspul-Gleichrichter-Instrument gemessen, bei unbekannter Frequenz mit einem Oszillographen aufgezeichnet. Das Gerät kann durch Austausch des beweglichen Systems wahlweise als Schwingungs- oder Beschleunigungsmesser verwendet werden. Sollen Schwingungsmessungen ausgeführt werden, so erhält das System Membranfedern von solcher Rückstellkraft, daß sich eine Eigenfrequenz von 20...25 Hz ergibt. Sollen Beschleunigungen gemessen werden, so wird die Eigenfrequenz durch Einbau stärkerer Federn auf 100...300 Hz erhöht. Die Amplitude des beweglichen Systems beträgt maximal  $\pm 0,6$  mm. Das Magnetfeld ist soweit homogen, daß eine Auslenkung von  $\pm 1,5$  mm ohne Abweichung

von der Linearität zulässig wäre. Das radiale Magnetfeld ist 5...6 kG stark und verbraucht eine maximale Erregerleistung von 40 W bei einer Luftspaltbreite von 3 mm; gegebenenfalls können die Elektromagnete durch Dauermagnete ersetzt werden. Bei unzureichender Empfindlichkeit ist selbstverständlich eine Verstärkung der induzierten Spannung möglich. Der Widerstand der Meßspulen wird dem Anzeigergerät angepaßt. Die Normalausführung des Gerätes wiegt 3,5 kg, ein Kleingerät mit einer schwingenden Masse von 20 g wiegt nur 400 g. Beide Geräte weisen bis 80° keinen merkbaren Temperaturfehler auf.

## V. Zeitmessung.

### 1. Synchronuhren [42].

Die Synchronuhr besteht aus einem Normalfrequenz-Generator und einem von ihm gesteuerten Synchronmotor mit Zeigerwerk. Zwischen der Frequenz  $f$  eines Schwingungsvorganges und der Zahl  $n$  der in der Zeit  $t$  ausgeführten Schwingungen besteht die Gleichung  $f = n/t$ . Bei hinreichend genau bekannter und konstanter Frequenz können somit

Schwingungsvorgänge als Zeitmaßstab verwendet werden. Für die Erzeugung der Normalfrequenz stehen Stimmgabelgeneratoren, Röhrensummer und Schwingquarze zur Verfügung. Besonders geeignet sind die durch ein Wechselfeld hervorgerufenen elastischen Schwingungen des Piezoquarzes, auf denen die Quarzuhren der PTR beruhen. Der Steuerquarz ist ein Bergkristallstäbchen von quadratischem Querschnitt mit den ungefähren Abmessungen  $90 \times 11 \times 11$  mm, das in seinen Bewegungsknoten gehalten und durch ein Wechselfeld zu Längsschwingungen mit der ersten Oberwelle seiner longitudinalen Eigenfrequenz angeregt wird. Die Stabachse verläuft parallel der elektrischen Achse, die beiden Querschnittseiten parallel zur neutralen bzw. optischen Achse des Quarzkristalls. Diese Orientierung und das gewählte Längenverhältnis ergeben den kleinsten Temperatureinfluß. Der Quarzstab ist in seinen beiden Schwingungsknoten auf einem Metallbügel festgebunden und wird durch die in Abb. 227 gezeigte kastenförmige Elektrodenanordnung zu Längsschwingungen angeregt. Der Quarzstab ist in einen Glaskolben eingeschmolzen (Abb. 228) und arbeitet in einer Wasserstoffatmosphäre von

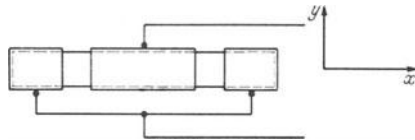


Abb. 227. Anordnung der Elektroden an dem Steuerquarz der Uhren III und IV der PTR.  
[Aus Hochfrequenztechn. Bd. 43 (1934) S. 37—47.]

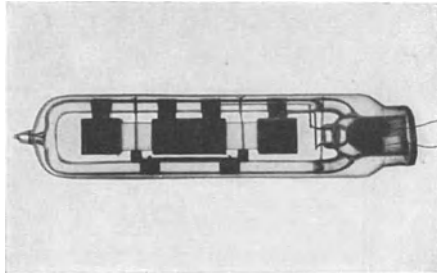


Abb. 228. Steuerquarz der Uhren III und IV der PTR.  
[Aus Hochfrequenztechn. Bd. 43 (1934) S. 37—47.]

20 mm Quecksilberdruck. Die Steuerfrequenz ist 60 kHz, ihre Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abb. 229. Der Temperaturkoeffizient ist außergewöhnlich klein und beträgt zwischen 35 und 37°

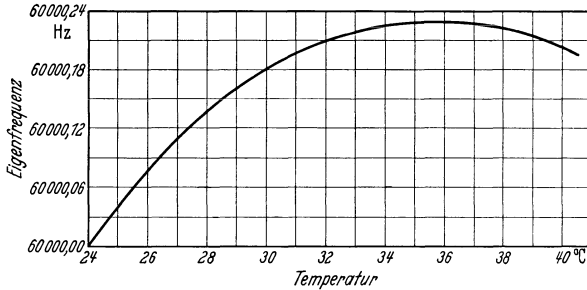


Abb. 229. Abhängigkeit der Eigenfrequenz des Steuerquarzes von der Temperatur. Betriebstemperatur 36° C. [Aus Hochfrequenztechn. Bd. 43 (1934) S. 37—47.]

weniger als  $5 \cdot 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ . Als Betriebstemperatur wurden deshalb 36° gewählt, sie wird durch Einbau in einen Doppelthermostat mit Kontaktthermometern auf  $\pm 0,002^{\circ}$  konstant gehalten. Die grundsätzliche

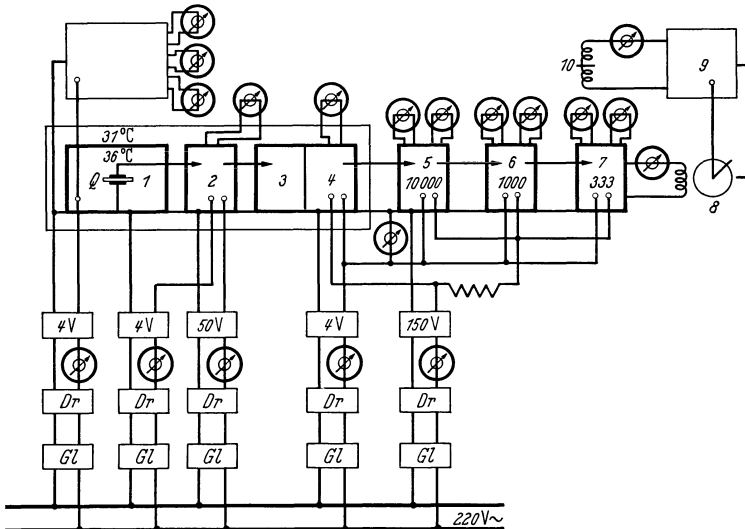


Abb. 230. Grundsätzliche Schaltung der Quarzuhr. [Aus Hochfrequenztechn. Bd. 43 (1934) S. 38.]  
 1 Steuerquarz; 2 Steuersender; 3 Widerstandverstärkerstufe; 4 Resonanzverstärkerstufe; 5 Frequenzteiler für 10 kHz; 6 Frequenzteiler für 1 kHz; 7 Frequenzteiler für 333 Hz; 8 Synchronmotor; 9 Zeitmarkengeber; 10 Zeitschreiber.

Schaltung ist in Abb. 230 gezeigt. Der Steuerquarz liegt zwischen Gitter und Kathode eines Steuersenders in der Schaltung von PIERCE und erregt den Anodenschwingkreis zu ungedämpften Schwingungen. Die Eigenfrequenz dieses Schwingkreises liegt 4,5% höher als die des

Steuerquarzes. Nach Verstärkung in einer Widerstands- und einer Resonanzverstärkerstufe werden die hochfrequenten Schwingungen von 60 kHz in drei Frequenzteilerstufen auf 333 Hz heruntertransformiert. Jede Frequenzteilerstufe besteht aus einem induktiv rückgekoppelten Sender, dessen Anodenkreis auf die durch Teilung zu erreichende Frequenz abgestimmt ist und dem die zu teilende Frequenz als zusätzliche Gitterspannung aufgedrückt wird. An den letzten Frequenzteiler ist ein Synchronmotor angeschlossen, dessen Kontakteinrichtung das Gitter

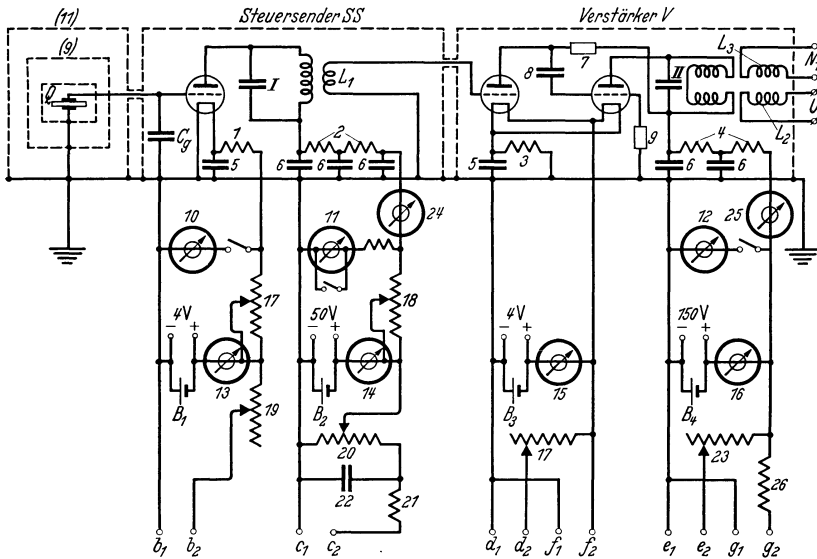


Abb. 231. Schaltung von Steuerquarz, Steuersender und Verstärker.  
[Aus SCHEIBE, ADELSBERGER: Die technischen Einrichtungen der Quarzuhren der PTR.  
Hochfrequenztechn. Bd. 43 (1934) S. 37–47.]

$Q$  Schwingquarz;  $C_g$  Parallelkondensator;  $L_1$  Kopplungsspule des Verstärkers;  $L_2$  Kopplungsspule des Frequenzteilers;  $L_3$  Kopplungsspule zur Entnahme der Normalfrequenz 60 kHz;  $B_1, B_2$  Heizbatterien;  $B_3, B_4$  Anodenbatterien;  $I$  Anodenschwingkreis des Steuersenders;  $II$  Anodenschwingkreis des Verstärkers;  $1, 2, 4, 5, 6$  Siebkreise für Heiz- und Anodenspannung;  $3$  Widerstand für die negative Gittervorspannung des Verstärkers;  $7, 8, 9$  Kopplungsglieder zwischen 1. und 2. Verstärkerstufe;  $10, 11, 12$  Spannungsmesser für Heiz- und Anodenspannungen;  $13 \dots 16$  Strommesser für die Batterieladeströme;  $17 \dots 20, 23$  Regelwiderstände;  $24, 25$  Anodenstrommesser.

einer weiteren Verstärkerröhre, den Zeitmarkengeber, steuert. Vom Zeitmarkengeber aus wird mittels Kondensatorentladungen ein Zeitschreiber betätigt. Die Zeitmarken dieses Schreibers werden mit dem Zeitzeichen der Sternwarten verglichen.

Die Schaltung des Steuerquarzes, Steuersenders und Verstärkers ist in Abb. 231 angegeben. Der Steuerquarz  $Q$  liegt parallel mit einem hochisolierten Kondensator  $C_g$  an Gitter und Kathode des Steuersenders. Heiz- und Anodenspannung des Steuersenders werden über Meß- ( $10, 11$ ) und Regeleinrichtungen ( $17, 18$ ), sowie Siebkreise ( $1, 2, 5, 6$ ) den Batterien  $B_1$  und  $B_2$  entnommen. Mit dem Anodenschwingkreis  $I$  des Steuer-

senders ist der zweistufige Verstärker induktiv gekoppelt, dessen beide Stufen durch Widerstands-Kapazitätsschaltung miteinander verbunden sind. Im Anodenkreis der zweiten Stufe liegt der auf 60 kHz abgestimmte Ausgangskreis, mit dem die beiden Spulen  $L_2$  und  $L_3$  gekoppelt sind.  $L_3$  gestattet die Entnahme einer Normalfrequenz von 60 kHz,  $L_2$  führt zum Eingang des dreistufigen Frequenzteilers (Abb. 232). Jede Frequenzteilerstufe besteht aus einem induktiv rückgekoppelten Sender, dessen Anodenkreis *III...V* auf die durch Teilung zu erreichende Frequenz abgestimmt ist. Im Gitterkreis liegen die Rückkopplungsspulen  $L_{10} \dots L_{12}$

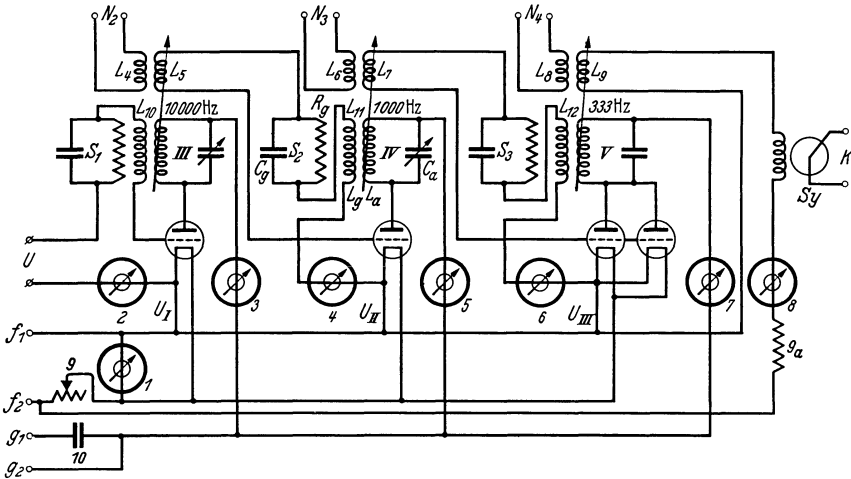


Abb. 232. Schaltung des Frequenzteilers. [Aus SCHEIBE, ADELSBERGER: Die technischen Einrichtungen der Quarzuhren der PTR. Hochfrequenztechn. Bd. 43 (1934) S. 37–47.]

*III...V* Anodenkreise der einzelnen Frequenzteilerstufen;  $S_1 \dots S_3$  Gitterschaltenelemente zur Erzeugung der Gittervorspannung;  $L_6$  und  $L_7$  Kopplungsspulen mit der vorhergehenden Stufe;  $L_4, L_6, L_8$  Kopplungsspulen zur Abnahme der Stufenfrequenzen;  $L_{10} \dots L_{12}$  Rückkopplungsspulen;  $L_9$  Kopplungsspule für den Synchronmotor  $S_y$ ,  $K$  Anschluß für den Zeitgeber;  $2 \dots 7$  Gitter- und Anodenstrommesser;  $8$  Strommesser für den Synchronmotor.

in Reihe mit den Schaltelementen  $S_1 \dots S_3$  und den Kopplungsspulen  $L_5$  und  $L_7$ , die mit dem Ausgangskreis der vorhergehenden Stufe gekoppelt sind. Die Gitterschaltenelemente  $S_1 \dots S_3$  dienen zur Erzeugung der Gittervorspannung durch den Spannungsabfall, den der Gitterstrom selbst an den Widerständen  $R_g$  hervorruft. Für den Wechselstrom sind diese Widerstände durch Kondensatoren  $C_g$  überbrückt. An den Spulen  $L_4, L_6$  und  $L_8$  können die Normalfrequenzen der einzelnen Stufen 10000, 1000 und 333 Hz abgenommen werden. Mit den Strommessern  $2 \dots 7$  werden die Gitter und Anodenströme überwacht. An die letzte Stufe des Frequenzteilers ist über die Kopplungsspule  $L_9$  der Synchronmotor  $S_y$  (Abb. 233) ausgeschlossen, der über ein Schneckengetriebe und eine Schaltstange einen Federkontakt betätigt. Schaltstange und Schaltfeder sind verhältnismäßig lang, um eine möglichst genaue Kontaktgabe

zu erzielen. Die Genauigkeit des Kontaktgebers ist  $0,2 \cdot 10^{-3}$  s. Von diesem Kontakt wird der Zeitmarkengeber (Abb. 234) gesteuert. Der Zeitmarkengeber besteht aus einem Verstärkerrohr, das normalerweise

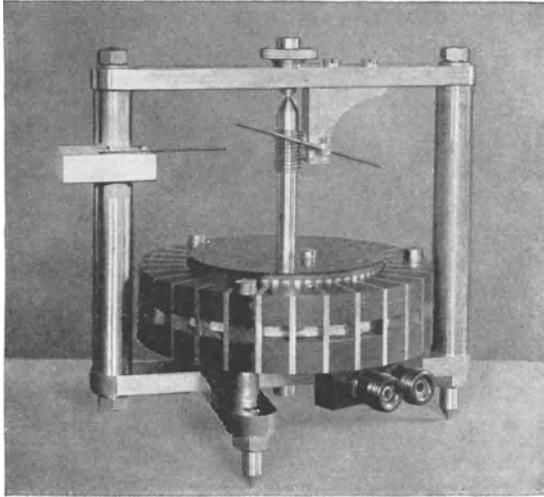


Abb. 233. Synchronmotor der Quarzuhr. [Aus Hochfrequenztechn. Bd. 43 (1934) S. 37.]

durch negative Vorspannung blockiert ist und nur im Augenblick des Impulses vom Synchronmotor kurzzeitig freigegeben wird. Im Anodenkreis des Verstärkers wird der Kondensator 2 von der Anodenbatterie aufgeladen und gibt bei jedem ankommenden Impuls einen kurzen scharfen Stromstoß auf den an die Klemmen *R* angeschlossenen Zeitschreiber. Auf diese Weise erhält man eine kurze scharfe Zeitmarke auf dem Papierstreifen des Zeitschreibers. Der Papierstreifen des Zeitschreibers wird ebenfalls von der Quarzuhr über einen Synchronmotor angetrieben und hat eine Geschwindigkeit von 100 mm/s. Die Lage der Zeitmarken auf dem Streifen läßt sich auf  $\frac{1}{10}$  mm genau bestimmen, entsprechend einer Zeit von  $\frac{1}{1000}$  s.

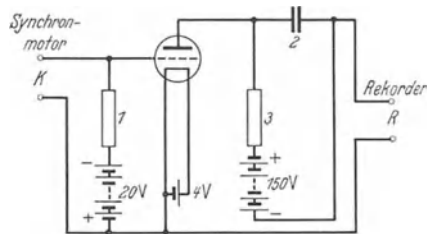


Abb. 234. Schaltung des Zeitgebers zur Quarzuhr der PTR. [Aus Hochfrequenztechn. Bd. 43 (1934) S. 37.]

*K* Eingang der Impulse vom Synchronmotor;  
*R* Ausgang der Impulse zum Zeitschreiber.

Die Einrichtung steht und fällt mit der Konstanz des Steuerquarzes, die zu  $1 \cdot 10^{-8} = 0,001$  s/d angegeben wird. Um diese außergewöhnliche Genauigkeit zu erreichen, war es notwendig, alle Einflußgrößen weitgehend zu verringern, in erster Linie Spannung und Temperatur konstant



zu halten. Eine Abhängigkeit der Frequenz von der Heizspannung konnte zwischen 3 und 4 V nicht festgestellt werden. Die Abhängigkeit von der Anodenspannung beträgt  $4 \cdot 10^{-8} = 0,003$  s pro Tag und Volt. Die Temperatur des Quarzes, des Steuersenders und des Verstärkers wird durch Einbau in einen doppelten Thermostaten mit Quecksilberkontakt-Thermometern auf  $36 \pm 0,002^\circ$  konstant gehalten. Diese Uhren können als die genauesten, derzeit verfügbaren Zeitnormalien angesehen werden und eignen sich für Lang- und Kurzzeitmessung gleich gut. Die Frequenz des mittleren Frequenzteilers von 1 kHz wird von der PTR über Telephonleitungen übertragen und steht somit einem großen Benutzerkreis als außerordentlich genaues Zeit- und Frequenznormal zur Verfügung.

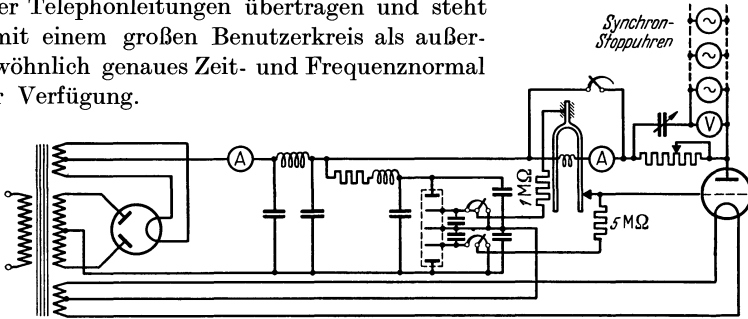


Abb. 235. Schaltung eines stimmgabelgesteuerten Röhrengenerators.  
[Aus ETZ Bd. 60 (1939) S. 1133.]

Für weniger genaue Messungen kann an Stelle der Quarzuhr ein Stimmgabelgenerator verwendet werden. Die Schaltung eines solchen Gerätes, das aus einer elektrisch erregten Stimmgabel und einem Verstärker besteht, zeigt die Abb. 235. Bei geschlossenem Stimmgabelkontakt hat das Gitter des Verstärkerrohres positives Potential. Der Anodenstrom durchfließt die zwischen den Gabelschenkeln liegende Erregerspule und die Stimmgabelschenkel bewegen sich nach innen. Die Kontaktfeder vermag ihnen jedoch nur kurzzeitig zu folgen, dann legt sie sich gegen einen festen Anschlag und die positive Gitterzuleitung wird unterbrochen. Das Gitter erhält nun negatives Potential, der Anodenstrom wird unterbrochen und die Stimmgabelschenkel federn zurück. Im Anodenkreis des Verstärkers liegt ein Regelwiderstand und parallel zu ihm ein Stromresonanzkreis, der aus einem Kondensator und den Induktivitäten der angeschlossenen Synchronmotoren gebildet wird. Durch diesen Resonanzkreis wird die rechteckige Kurvenform des Anodenstromes hinreichend sinusförmig verflacht, so daß ein einwandfreier Lauf der Synchronmotoren gewährleistet ist. Die Genauigkeit dieses einfachen Stimmgabelgenerators wird vom Verfasser zu  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  angegeben, während von anderer Seite für die Stimmgabel mit mechanischem Kontakt kurzzeitig  $1 \cdot 10^{-3}$ , auf lange Sicht  $20 \cdot 10^{-3}$ , für die elektrisch erregte Stimmgabel  $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-8}$  genannt wird. Für genaue Messungen sind Temperatur und Luftdruck konstant zu halten.

Im Gegensatz zu der Ausführung der PTR, wo der Synchronmotor nur zur Kontaktgabe dient, wird er bei den technischen Synchronuhren unmittelbar zur Bewegung des Zeigerwerkes herangezogen. Als Frequenzgenerator wird dabei nur in seltenen Fällen ein Normalfrequenzgeber (Quarz oder Stimmgabel) benutzt, da für die meisten technischen Messungen die Frequenzkonstanz der Kraftnetze ausreicht. Beispielsweise beträgt die maximale Frequenzabweichung des Berliner Netzes bei 50 Hz Grundfrequenz  $\pm 0,02 \text{ Hz} = \pm 0,04\%$ . Synchronuhren für Langzeitmessung mit selbstanlaufendem Synchronmotor erhalten eine

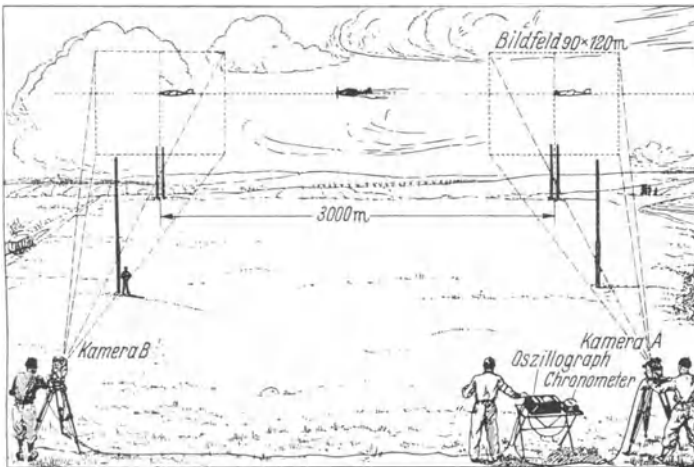


Abb. 236. Anordnung der Zielmarken für die kinematographische Geschwindigkeitsmessung.  
[Aus Meßtechn. Bd. 15 (1939) S. 159—161.]

Nullspannungs-Fallklappe zur Anzeige vorübergehender Stromunterbrechung. Synchronmotoren als Kurzzeitmesser werden von dem Meßvorgang ein- und ausgeschaltet bzw. bei ständig laufendem Motor elektromagnetisch mit dem Zeigerwerk gekuppelt, wobei die Masse der bewegten Teile möglichst klein zu halten ist, um den An- und Auslauffehler zu verringern. Solche Geräte sind bereits an vielen Stellen anstatt mechanischer Stoppuhren in Gebrauch und gestatten Zeitablesungen auf  $\frac{1}{100} \text{ s}$ . Als Beispiel sei die Geschwindigkeitsmessung bei Sportveranstaltungen erwähnt: Ein 200 Hz-Normalfrequenzgenerator (Stimmgabelgenerator) treibt einen Synchronmotor mit 10 Umdr/s an, der durch eine magnetische Kupplung mit drei konzentrischen Zifferblättern verbunden werden kann. Das erste Zifferblatt hat 60 Teilstriche und macht 1 Umdr/h, das zweite ebenfalls 60teilige 1 Umdr/min und das dritte mit 100 Teilstrichen läuft in 1 s einmal um. An den Zifferblättern können also min, s und  $\frac{1}{100} \text{ s}$  abgelesen werden; sie werden zusammen mit dem Zielbild von einer Filmkamera mit 128 Bildern/s aufgenommen. Die

Kupplung des Synchronmotors mit den Zifferblättern erfolgt durch einen Kontakt an der Starterpistole. Das Verfahren weist einige kleine Ungenauigkeiten auf: Die Eigenzeit des Schlagbolzens, das ist der Zeitunterschied zwischen dem Schließen des Kontakts und der Entzündung der Patrone, die Laufzeit des Schalles von der Pistolenmündung bis zu den Startenden und die Kupplungs- und Beschleunigungszeit des Zeigerwerks. Für eine völlig exakte Zeitmessung müßte die Anlaufverzögerung des Zeigerwerks gleich der Zeit vom Betätigen des Kontaktes der Starter-

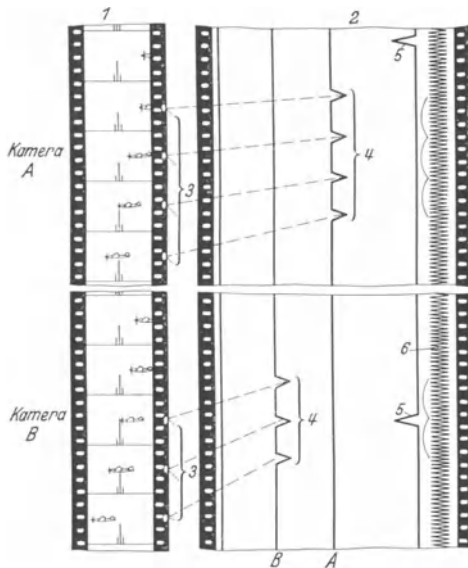


Abb. 237. Film und Oszillogramm der kinematographischen Geschwindigkeitsmessung. [Aus Meßtechn. Bd. 15 (1939) S. 159—161.]

1 Filmstreifen mit Zielbild, 2 Oszillogramm; 3 Lichtmarken auf dem Film; 4 zugehörige Zeitmarken; 5 s-Impulse der Normaluhr; 6 500 Hz-Normalfrequenz; A Zeitschleife für Filmkammer A, B Zeitschleife für Filmkammer B.

pistole bis zum Eintreffen des Schalles bei den startenden Läufern sein.

Die Geschwindigkeit von Flugzeugen kann nach dem kinematographischen Verfahren der *Askania* ermittelt werden. Als Zeitnormal wird eine Normalfrequenz von 500 Hz verwendet, als Aufnahmegeräte dienen 2 Kinokameras und ein Oszillograph. Die Meßstrecke ist durch 3 Pfähle in Form eines Balkenvisiers abgestreckt und die Filmkammer in der Visierebene aufgestellt (Abb. 236). Jede Kamera hat ein Blickfeld von  $90 \cdot 120 \text{ m}^2$ . Etwa 500 m vor dem Anflug wird die Kamera A mit 50 Bildern/s und einer Belichtungszeit von  $\frac{1}{600} \text{ s}$  eingeschaltet. Beim

Eintritt des Flugzeuges in das Blickfeld wird ein Kontaktkreis geschlossen, der vom Kameramotor gesteuert wird und bei jeder Belichtung eine auf die Kamera aufgebaute Glühlampe, sowie eine Oszillographenschleife kurzzeitig einschaltet. Die Glühlampe erzeugt einen Lichtpunkt auf dem Rand des Filmstreifens, die Oszillographenschleife gibt Zeitmarken, zusammengehörnde Bilder und Zeitmarken sind also ohne weiteres kenntlich. Zur Zeitorientierung der einzelnen Marken werden auf dem Oszillographenstreifen außerdem die Impulse einer Sekundenuhr und die 500 Hz-Normalfrequenz aufgezeichnet. Nachdem das Flugzeug das Bildfeld verlassen hat, wird die Filmkammer A ausgeschaltet und die Filmkammer B in Betrieb genommen, der Oszillograph ist für beide Kameras gemeinsam. Abb. 237 zeigt den Filmstreifen mit dem zu-

gehörigen Oszillogramm. Die Genauigkeit hängt natürlich von der Toleranz der Sekundenuhr und der Normalfrequenz, sowie der Schärfe der Zeitmarken ab und wird zu  $1 \cdot 10^{-3}$  s angegeben.

## 2. Zeitregistriergeräte [43].

Zeitschreiber sind Geräte zur Überwachung des zeitlichen Ablaufs eines oder mehrerer Vorgänge; sie zeichnen mechanisch, optisch oder elektrisch, meist mit einer Vielzahl von Schreibeinrichtungen, Zeitmarken auf einem mit konstanter Geschwindigkeit ablaufenden oder umlaufenden Papier- oder Filmstreifen auf. Die Zeitschreiber eignen sich für statistische Erhebungen und Kontrolle von Arbeitsvorgängen jeder Art, beispielsweise für die Überwachung der Arbeitszeit und Arbeitsgeschwindigkeit von Maschinen, zur Ermittlung der Stillstand- und Laufzeiten, zur Erhebung der Belegung von Vor- oder Gruppenwählern in der automatischen Telephonie, zur Bestimmung der Hauptverkehrszeiten von Nachrichten- und Verkehrseinrichtungen, zur Aufzeichnung der Häufigkeit, Dauer und zeitlichen Lage von Telefongesprächen, zur Überwachung von Schutzeinrichtungen in Elektrizitätsversorgungsnetzen, zur Kontrolle von Feuermelder- und Alarmanlagen, zur Feststellung der Dauer, Geschwindigkeit und Regelmäßigkeit einer Produktion, usw. Einige gebräuchliche Verfahren zur Erzeugung der Zeitmarken sind (Abb. 238):

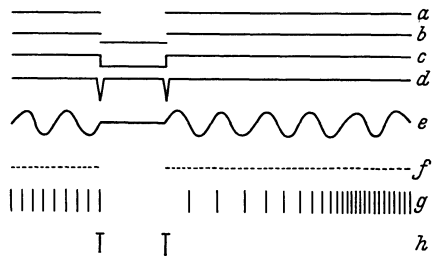


Abb. 238. Verschiedene Aufzeichnungsverfahren von Zeitschreibern.

a) Das Schreibwerk schreibt nur während der Dauer des elektrischen Impulses eine gerade Linie.

b) Der Schreiber zeichnet jeden Vorgang mit 2 Schreibwerken auf, von denen das eine während der Impulspause, das andere während des Impulses schreibt.

c) Das Schreibwerk schreibt im Ruhezustand eine gerade Linie, die während der Impulsdauer seitlich versetzt wird.

d) Das Schreibwerk schreibt im Ruhezustand eine gerade Linie und gibt bei jedem Impuls unabhängig von seiner Dauer eine Zeitmarke.

e) Das Schreibwerk schreibt im Ruhezustand eine gerade Linie, während der Impulsdauer Sinusschwingungen mit konstanter Frequenz.

f) Das Schreibwerk schreibt im Ruhezustand gar nicht und zeichnet während des Betriebs Zeitmarken in einem konstanten Rhythmus.

g) Das Schreibwerk schreibt im Ruhezustand gar nicht und gibt während der Impulsdauer Zeitmarken in einem Rhythmus, der von einer Meßgröße gesteuert wird.

h) Das Schreibwerk ruht während der Impulspause und gibt bei jedem Impuls eine Zeitmarke, die unabhängig von der Impulsdauer ist.

Dies sind nur einige Möglichkeiten; sie lassen sich untereinander oder mit anderen Aufzeichnungsverfahren beliebig zusammensetzen. Die Aufzeichnung erfolgt mit einem der bekannten Naß- oder Trockenschreib- oder -Druckverfahren in Tintenschrift, mit Farbband, Ruß-, Wachs- oder Elektrolytpapier. Wesentlich für alle Geräte ist konstante

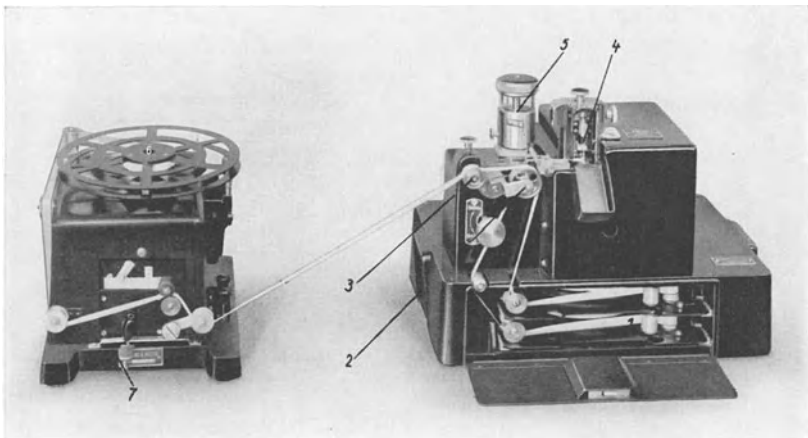


Abb. 239. Siemens-Drehspul-Morse-Schnellschreiber. (Aus Druckschrift S. & H. 7349, 1. 10. 38. T.T. 1: Das Siemens-Schnellmorsesystem.)

1 Vorratsrolle; 2 Schreibrolle; 3 Führungsrolle; 4 Schreibsystem; 5 Tintenbehälter;  
6 Aufwickeltrommel; 7 Geschwindigkeitsregler.

Ablaufgeschwindigkeit des Papiers. Dem Papierantrieb ist deshalb besondere Sorgfalt zuzuwenden, wo kein konstanter Papierablauf gewährleistet ist, muß eines der Schreibwerke Zeitmarken einer Präzisionsuhr oder eine Normalfrequenz aufzeichnen, doch wird die Auswertung dann recht umständlich. Ferner ist die Eigenfrequenz bzw. die Ansprechzeit der Schreibwerke von großer Wichtigkeit. Sie muß auf jeden Fall so kurz sein, daß sie gegenüber der Dauer des aufzunehmenden Vorgangs keine Rolle spielt, oder aber es müssen Ein- und Ausschaltzeiten entgegengesetzt gleich sein. Die Steuerung der Schreibwerke kann durch beliebige Kontakteinrichtungen erfolgen. Die mechanischen Zeitschreiber werden mit Papiergeschwindigkeiten bis 500 mm/s, die optischen bis 50 m/s ausgeführt. Ihr Anwendungsgebiet ist nahezu unbegrenzt; sie dienen zur Aufzeichnung des Zeitpunktes, der Dauer, Geschwindigkeit, Zahl, Häufigkeit und zeitlichen Folge von Ereignissen oder der Art und Dauer eines Zustandes auf allen Gebieten.

Chronographen. Die Chronographen sind ursprünglich zur Aufnahme von Telegraphiezeichen entwickelt; sie eignen sich jedoch in gleicher Weise zur Aufzeichnung der Länge eines Stromstoßes, des Abstandes zweier Stromstöße oder Ereignisse, sowie der zeitlichen Folge mehrerer Vorgänge. Ein Chronograph mit einem Schreibsystem ist der in Abb. 239 gezeigte Siemens-Morseschnellschreiber, der auf einem 10 mm breiten Papierstreifen in Tintenschrift aufzeichnet und ursprünglich als Empfänger beim Schnellmorsesystem entwickelt wurde, jedoch auch als Zeitschreiber verwendet werden kann. Der Apparat eignet sich besonders zur Aufzeichnung der Dauer eines Vorganges oder des zeitlichen Abstandes mehrerer Vorgänge bei sehr hoher Papiergeschwindigkeit. Er kann mit Gleich- oder Wechselstrom betrieben werden und zeichnet in einem Fall in einer gebrochenen Geraden gemäß Abb. 238c, im anderen Fall in Sinuslinien gemäß Abb. 238e auf. Das Gerät besteht aus zwei völlig getrennten Teilen, dem eigentlichen Schreiber und dem Aufwickler. Der Schreiber hat ein Drehspulsystem mit sehr langer und schmaler Drehspule (Abb. 240), um eine hohe Empfindlichkeit bei geringem Trägheitsmoment zu erzielen. Die Drehspule ist an stählernen Spannbändern, die gleichzeitig der Stromzuführung dienen, reibungsfrei im Feld eines starken Elektromagnets aufgehängt. Die Länge der Spannbänder und damit die Eigenfrequenz des schwingenden Systems kann durch Verschieben zweier Elfenbeinschneiden von außen und während des Betriebes eingestellt werden, die größte erreichbare Eigenfrequenz ist etwa 150 Hz. Das gesamte Meßsystem ist in einem leicht auswechselbaren Einsatzstück untergebracht. Mit dem Drehspulsystem fest verbunden ist der Schreibarm mit der einhängbaren Kapillarfeder. Die Tintenzuführung zur Schreibfeder erfolgt selbstregelnd aus einem luftdicht verschlossenen Vorratsbehälter (Abb. 241). Die Tinte fließt aus dem luftdichten Behälter *V* durch das Fallrohr *F* in das Regelgefäß *R*. Ist der Flüssigkeitsspiegel in *R* soweit gesunken, daß durch das Steigrohr *E* Luft in das Vorratsgefäß eindringen kann, so fließt neue Tinte nach. Die Höhe des Flüssigkeitsspiegels in *R* läßt sich durch

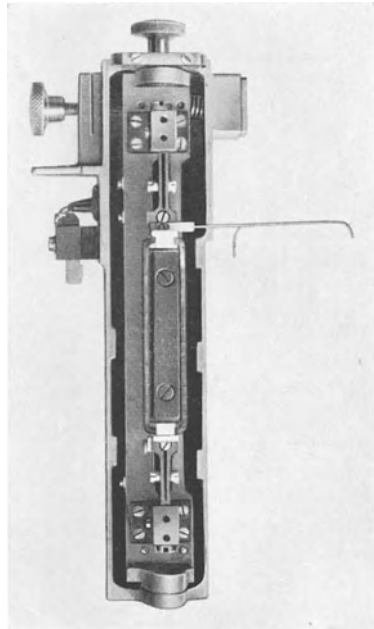


Abb. 240. Einsatzsystem  
des Siemens-Morse-Schnellschreibers.  
(Aus Druckschrift S. & H. 7349 I. 10. 38 T. T. 1.)

aufgehängt. Die Länge der Spannbänder und damit die Eigenfrequenz des schwingenden Systems kann durch Verschieben zweier Elfenbeinschneiden von außen und während des Betriebes eingestellt werden, die größte erreichbare Eigenfrequenz ist etwa 150 Hz. Das gesamte Meßsystem ist in einem leicht auswechselbaren Einsatzstück untergebracht. Mit dem Drehspulsystem fest verbunden ist der Schreibarm mit der einhängbaren Kapillarfeder. Die Tintenzuführung zur Schreibfeder erfolgt selbstregelnd aus einem luftdicht verschlossenen Vorratsbehälter (Abb. 241). Die Tinte fließt aus dem luftdichten Behälter *V* durch das Fallrohr *F* in das Regelgefäß *R*. Ist der Flüssigkeitsspiegel in *R* soweit gesunken, daß durch das Steigrohr *E* Luft in das Vorratsgefäß eindringen kann, so fließt neue Tinte nach. Die Höhe des Flüssigkeitsspiegels in *R* läßt sich durch

Höher- oder Tiefschrauben des Vorratsbehälters einstellen. Vom Regelgefäß fließt die Tinte in das eigentliche Schreibgefäß und wird von dort durch eine Kapillarfeder auf das Papier gesaugt. Der Schreibdruck ist durch Verstellen der Schreibrolle einstellbar. Die Papiergeschwindigkeit wird durch den Aufwickler bestimmt. Der Aufwickler enthält einen Gleichstrommotor mit Fliehkraftregler und ein Reibscheibengetriebe mit wählbarem Übersetzungsverhältnis. Die größte Papiergeschwindigkeit

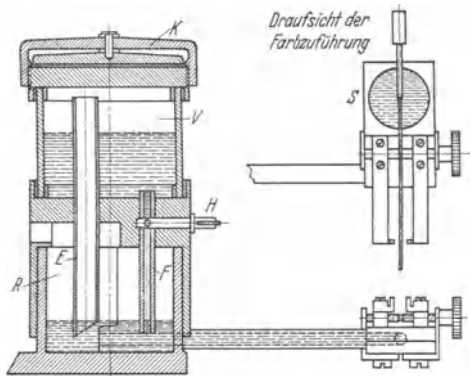


Abb. 241. Tintengefäß des Siemens-Morse-Schnellschreibers. (Aus Druckschrift S. & H. 7349 I. 10. 38 T.T. 1.)

*E* Steigrohr; *F* Fallrohr; *H* Hahn; *K* Kappe; *R* Reguliergefäß; *S* Farbnahmebehälter; *V* Vorratsgefäß.

ist  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Abb. 242 ist ein Diagramm des Zeitschreibers bei der Aufnahme von Morsezeichen und einer Telegraphiergeschwindigkeit von 150 Worten/min.

Während bei dem vorher beschriebenen Siemens-Morseschreiber ein Drehspulsystem als Meßwerk verwendet wird, die Amplitude der Aufzeichnung also von der Intensität des Stromstoßes abhängig ist, arbeiten die folgenden Chronographen von H. WETZER, Pfronten mit elektromagnetischem Klappankerrelais in verschiedenen Ausführungsformen. Die Amplitude ist also durch die Einstellung des Ankerhubs ein für allemal gegeben und unabhängig von der Stromstärke und die Aufzeichnung

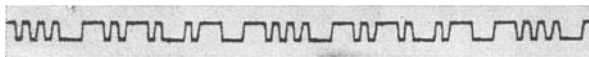


Abb. 242. Diagramm des Morseschnellschreibers der Siemens & Halske AG. (Aus Druckschrift S. & H. 7349, I. 10. 38 T.T. 1.)

erfolgt in einem gebrochenen Linienzug. Einen Streifen-Chronographen dieser Art mit Uhrwerksantrieb und drei elektromagnetischen Schreibwerken zeigt Abb. 243. Die Schreiber werden mit Papiergeschwindigkeiten von  $5 \dots 250 \text{ mm/s}$  ausgeführt und lassen sich während des Betriebes auf verschiedene Geschwindigkeiten umschalten. Bei  $10 \text{ mm}$  Vorschub ist die Laufzeit des Uhrwerks  $18 \text{ min}$ , sie verkürzt sich umgekehrt proportional der Geschwindigkeit. Die Schreiber werden mit  $2 \dots 36$  Schreibstellen und Papierbreiten von  $20 \dots 350 \text{ mm}$  hergestellt. Die Registrierung erfolgt mit Tinte, auf Wachspapier oder mit Nadelstichen. Das elektromagnetische Relais vermag  $250$  Schaltungen/s auszuführen, hat also eine außerordentlich kurze Eigenzeit. Abb. 244 ist eine Aus-

führung mit 3 Schreibstellen und Papieraufwickler, während Abb. 245 die Anordnung von 8 Schreibstellen in 2 Schreibebenen zeigt. Bei der Auswertung dieser Diagramme muß also der Abstand der beiden Schreibebenen berücksichtigt werden, ein Nachteil, der bei dem in Abb. 246

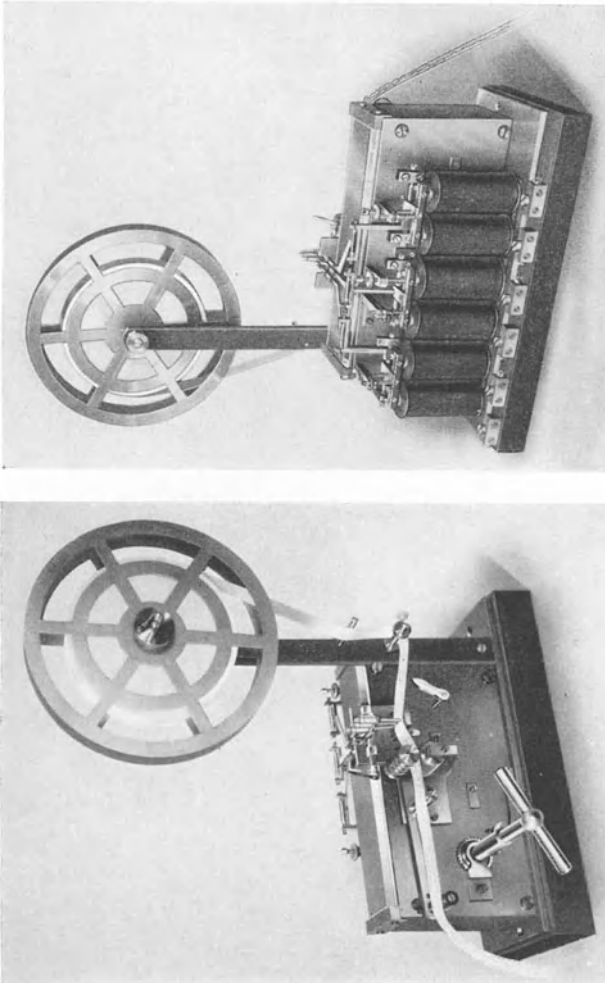


Abb. 243. Vorder- und Rückansicht des Streifen-Chronographen mit 3 Schreibstellen von H. Wetzer.

gezeigten Bandschreiber mit 30 Schreibfedern vermieden ist. Ein auf Wachspapier geschriebenes Diagramm, dessen außerordentlich dünne Strichstärke für alle Wachspapieraufzeichnungen charakteristisch ist, zeigt die Abb. 247. Die Aufzeichnung kann bei den Chronographen mit Wachspapier außer durch Auskratzen der Wachsschicht mit einem



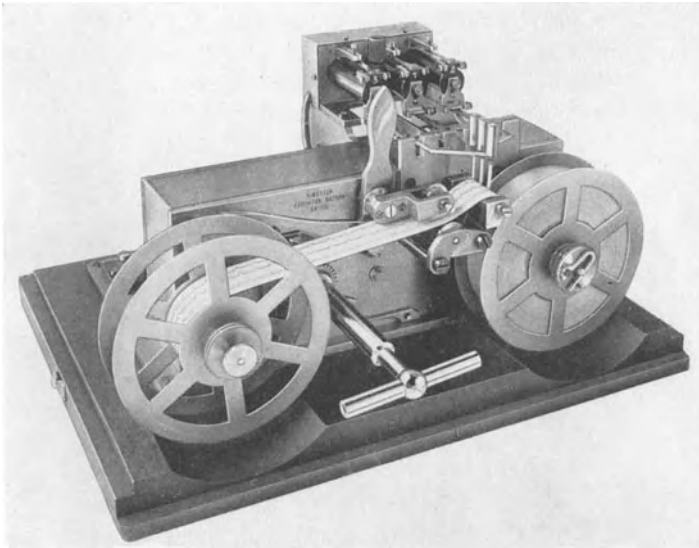


Abb. 244. Streifen-Chronograph mit 3 Schreibstellen und Papieraufwickler (Hersteller: H. Wetzler, Pfronten). (Aus Liste: Registriergeräte von H. Wetzler, Ausgabe E.)

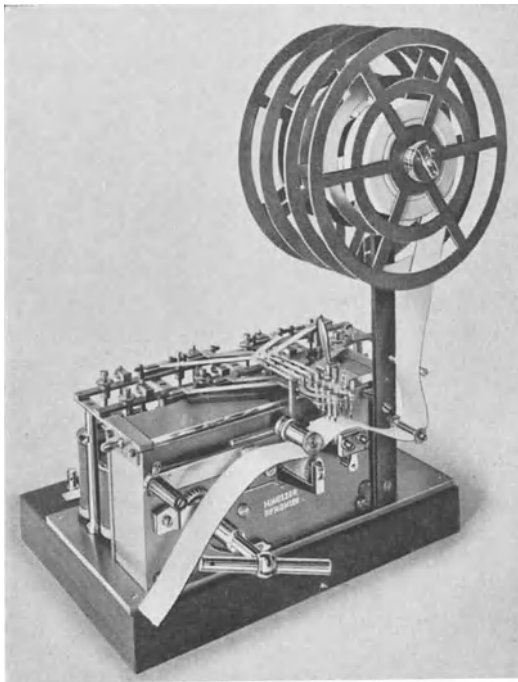


Abb. 245. Streifen-Chronograph mit  $2 \times 4$  Schreibstellen in 2 Schreibebeben (Hersteller: H. Wetzler, Pfronten).

Stichel auch durch Ausschmelzen mit einem geheizten Schreibstift oder durch einen Funkenüberschlag erfolgen. Die Wachsfunkenschrift hat gegenüber der älteren Funkenaufzeichnung auf Rußpapier den Vorteil der größeren Sauberkeit, gegenüber der reinen Wachsschrift den der besseren Pausfähigkeit. Die Funken werden je nach Art der Aufzeichnung und nach der Schreibgeschwindigkeit auf verschiedene Weise erzeugt. Überschläge für einzelne Zeitmarken, beispielsweise bei der Messung von Geschößgeschwindigkeiten, erzeugt man durch den Spannungsstoß,

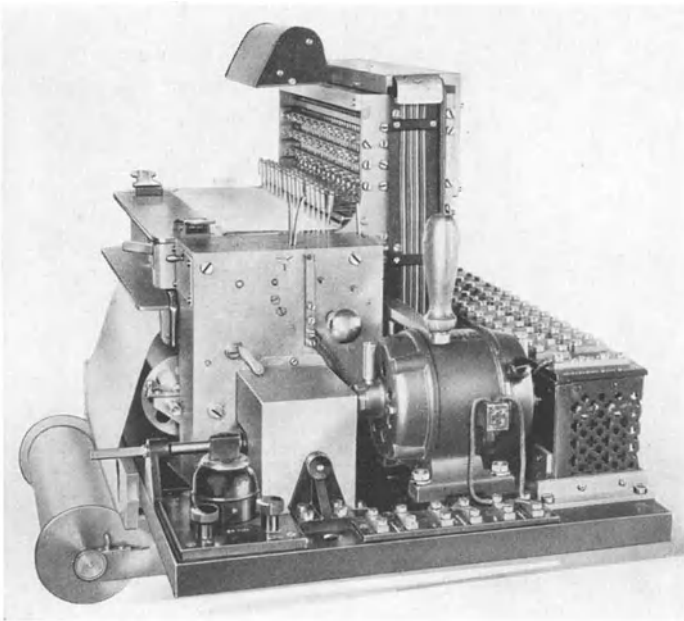


Abb. 246. Band-Chronograph mit 30 Schreibstellen von H. Wetzler, Pfronten.

der im Sekundärkreis eines Übertragers beim Öffnen des Primärstromkreises induziert wird, beispielsweise beim Zerstören eines Bensberg-Gitters (Abb. 248). Ständige Funkenströme werden von Unterbrechern und Induktorien oder von Hochspannungswandlern aus dem Netz geliefert. Mit dem Hammerunterbrecher erzielt man etwa 20 Funken/s, mit Motorunterbrechern 50...70, während ein 50periodiger Wechselstrom 100 Funken/s gibt. Die Schaltung für die Funkenerzeugung aus dem 50 Hz-Netz zeigt Abb. 249. Der primäre Vorwiderstand hat den Zweck, die Spannungskurve zu verzerren, da eine möglichst spitze Kurvenform zur Erzielung eines kurzen und rasch abreißenden Funkens erwünscht ist. Abb. 250a und b sind 2 Oszillogramme der Primär- und Sekundärspannung des Funkenerzeugers. Beim Oszillogramm *a* war

die Funkenstrecke kurzgeschlossen, bei *b* ist die Funkenstrecke in Betrieb. Der Funkenüberschlag ist durch die Einsattelung der Spannungskurve deutlich zu erkennen. Bei allen Funkenschreibern ist eine sorgfältige

Entstörung notwendig, um eine Beeinträchtigung des Rundfunkempfangs zu vermeiden.

Einen Wachsfunken-Chronographen der Bell Laboratories zur Überwachung von Uhren zeigt Abb. 251. Bei diesem Gerät läuft das Wachspapier über eine als scharfe Metallkante ausgebildete Hochspannungselektrode, während die geerdete Gegenelektrode in Form einer Spirale um eine Metalltrommel gelegt

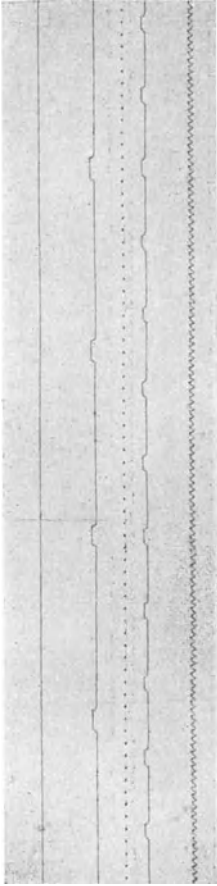


Abb. 247. Wachspapier-Niederschrift eines Streifen-Chronographen von H. Wetzler, Pfronten.

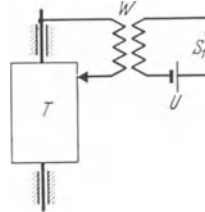


Abb. 248. Schaltung eines Funken-Chronographen für Geschößgeschwindigkeitsmessung.

*T* Registriertrommel; *W* Übertrager; *U* Gleichspannungsquelle; *S<sub>1</sub>* Ausschalter (Bensberg-Gitter).

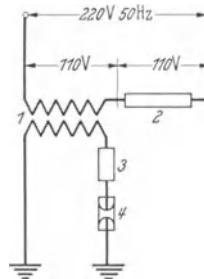


Abb. 249. Funkenerzeugung aus dem Wechselstromnetz.

*1* Hochspannungswandler; *2* Vorwiderstand auf der Primärseite; *3* Vorwiderstand auf der Sekundärseite; *4* Funkenstrecke.

ist und das Wachspapier nicht berührt. Die Funkenstrecke wandert also bei jeder Trommelumdrehung einmal quer über das Papier. Die Trommel wird von einer Normaluhr synchron angetrieben. Wenn die Impulse der zu vergleichenden Uhr in Abständen eintreffen, die ein ganzzahliges Vielfaches der Trommelumlaufzeit darstellen, so entstehen die Funkenmarken stets an derselben Stelle der Trommelbreite und auf

dem Registrierpapier erscheint eine senkrechte Reihe von Funkenmarken. Eine Neigung der Registriermarken nach der einen oder anderen Seite

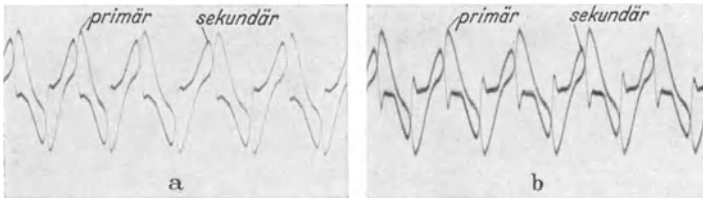


Abb. 250. Primär- und Sekundärspannung des Funkenzeugers.  
a Mit kurzgeschlossener Funkenstrecke; b mit eingeschalteter Funkenstrecke;

bedeutet eine Gangdifferenz zwischen der Normal- und der X-Uhr; ihre Größe läßt sich aus dem Neigungswinkel ermitteln. Die Umlaufzeit

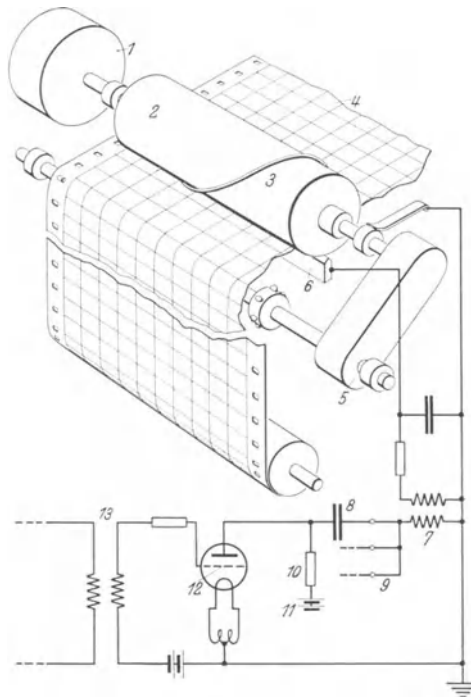


Abb. 251. Anordnung des Wachsfunken-Chronographen der Bell Laboratories.  
[Aus Bell. Labor. Rec. Bd. 18 (1939) S. 55.]

1 Antriebsmotor, 2 Schreibtrommel, 3 Spiralelektrode; 4 Wachspapier; 5 Papierantrieb;  
6 Hochspannungselektrode; 7 Übertrager; 8 Kondensator; 9 Anschlüsse für weitere Impulsgeber;  
10 Vorwiderstand; 11 200 V-Batterie; 12 Schaltrohr; 13 Eingangsübertrager.

der Trommel ist 0,5 s und dieselbe Zeit entspricht demnach einer vollen Papierbreite. Der Papiervorschub ist 75 mm/d, die Ablesegenauigkeit

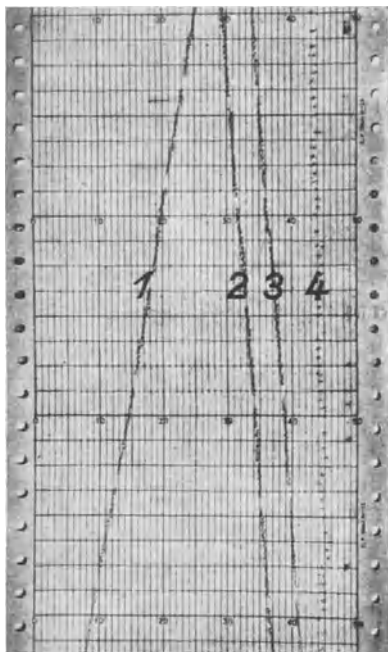


Abb. 252. Diagramm des Wachsfunkenschreibers der Bell Laboratories.

[Aus Bell Labor. Rec. Bd. 18 (1939) S. 55.]

1...3 Aufzeichnung des Ganges von Quarzuhren, 4 Rundfunkzeitsignal.



Abb. 253. Mikrophotographie von Funkenmarken auf Wachspapier.

[Aus Bell Labor. Rec. Bd. 18 (1939) S. 55.]

1 ms. Die Hochspannungsfunken werden durch Induktion erzeugt. Der Anodenkondensator 8 wird von einer 200 V-Batterie 11 über den Widerstand 10 allmählich aufgeladen und entlädt sich beim Ankommen eines Impulses über die Primärwicklung 7 des Wandlers und das Schaltrohr 12. Der auf der Sekundärseite des Wandlers induzierte Spannungsstoß ruft den Überschlag der Funkenstrecke hervor. Es können mehrere Impulsgeber an denselben Funkenschreiber angeschlossen werden. Zur Unterscheidung der einzelnen Aufzeichnungen wird alle paar Stunden eine besondere Impulsfolge als Schlüssel gesendet. In Abb. 252 ist die Aufzeichnung eines solchen Wachsfunkenschreibers vom Gang dreier Quarzuhren sowie eines Rundfunk-Zeitsignals wiedergegeben.

Abb. 253 ist eine Mikrophotographie des Diagramms und zeigt die wesentlich bessere Erkennbarkeit der Wachsfunkendurchschläge gegenüber Funkenschlägen durch gewöhnliches Papier.

Zeitschreiber. Der Siemens-Zeitschreiber (Abb. 254) wird mit 6 oder 12 elektromagnetischen Relais ausgeführt und zeichnet ebenso viele Vorgänge auf einem ablaufenden Papierstreifen von 120 mm Breite und 30 m Länge in Tintenschrift auf. Die Vorschubgeschwindigkeit des Diagramms kann zwischen 10 mm/h und 20 mm/s gewählt werden. Die kurze Ansprechzeit des Relais rechtfertigt auch hohe Papiergeschwindigkeit

für rasch ablaufende Vorgänge. Die einzelnen Schreibfedern werden entweder als Konusfedern aus einzelnen kegelförmigen Tintennäpfchen

oder als Kapillarfedern aus einem gemeinsamen Tintentrog gespeist. Das Diagramm zeigt rechtwinkelig gebrochene, senkrechte Linien, deren einzelne Auslenkungen den Zeitpunkt des aufgezeichneten Ereignisses angeben (Abb. 255). Das Relais hat eine Umschlagzeit von 60 ms, vermag also 8 Vorgänge/s ohne Schwierigkeiten aufzunehmen und ist für Gleich- und Wechselstrom geeignet. Sein Verbrauch ist 0,5 W bei Gleichstrom und 0,8 VA bei Wechselstrom. Die Schreiberrelais können mit normalen Schaltern oder mit besonderen Schalteinrichtungen

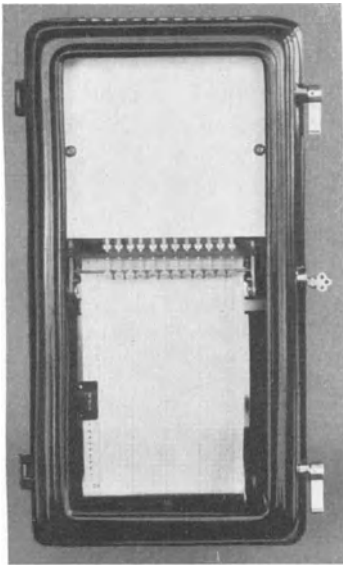


Abb. 254. Siemens-Zeitschreiber mit 12 Schreibfedern.

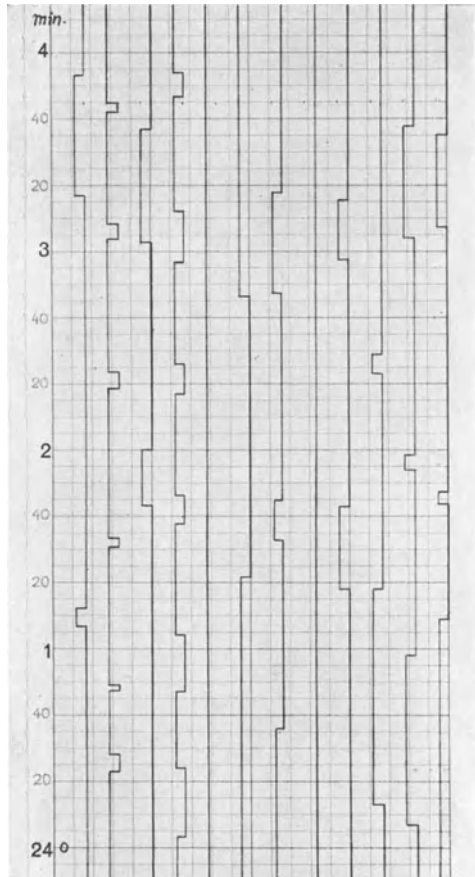


Abb. 255. Diagrammstreifen eines Siemens-Zeitschreibers.

betätigt werden, die dem jeweiligen Verwendungszweck angepaßt sind. Eine Schaltung zum Überwachen des Ansprechens von Schutzrelais ist in Abb. 256 angegeben. Bei dieser Ausführung steht das Papier normalerweise still und wird erst bei einer Störung mit einer Geschwindigkeit von 10 mm/s angetrieben, nach Beendigung der Störung wird es wieder stillgesetzt. Die Schutzrelais 1 schalten die Hilfsschütze 2 und die in Reihe mit ihnen liegenden Zeitschreiberrelais 3 ein; von den Hilfsrelais

wird das Schnellläuferuhrwerk 4 ausgelöst und ein Alarmsignal 5 betätigt.

Die Zeitschreiberaufzeichnung gibt also Aufschluß über die Reihenfolge und den zeitlichen Abstand der Relaisbetätigungen und Schalterauslösungen und gestattet somit einen vollkommenen Überblick über das Arbeiten des Schutzes und der Leistungsschalter. Der Siemens-Zeitschreiber eignet sich vorwiegend für die Aufzeichnung der Art und Dauer eines Zustandes, der Häufigkeit und des Zeitpunktes von Zustandsänderungen absolut und relativ zu anderen Vorgängen.

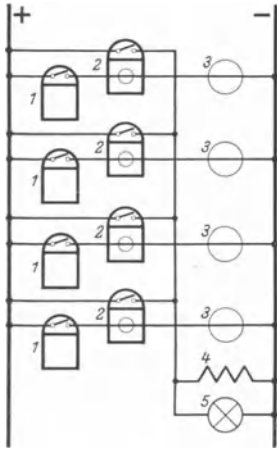


Abb. 256. Schaltung eines Zeitschreibers zur Überwachung von Schutzrelais.

- 1 Schutzrelais; 2 Hilfsschütz;
- 3 Schreibrelais;
- 4 Uhrwerkslösung;
- 5 Alarmsignal.

Im Gegensatz zu dem mit Tinte geschriebenen Liniendiagramm des Siemens-Zeitschreibers gibt der Ericsson-Zentralograph ein Punktdiagramm in Trockenschrift mit Farbband. Der in Abb. 257 gezeigte Schreiber enthält 30 Schreibrelais, deren hammerartig ausgeführte Anker bei jedem Stromstoß auf das Papier schlagen und eine Schreibmarke in Form eines 2 mm breiten Querstriches hinterlassen. Zu jedem Schreibrelais gehört

eine ständig arbeitende Kontakteinrichtung, deren Impulshäufigkeit der Geschwindigkeit des überwachten Vorganges verhältnisgleich ist. Das Diagramm besteht sonach aus senkrechten Reihen kleiner Querstriche, deren Zahl pro Zeiteinheit proportional der Arbeitsgeschwindigkeit ist und die beim Stillstand des überwachten Gerätes eine Lücke aufweisen, wie aus dem Diagramm Abb. 258 zu ersehen ist. Der Apparat eignet sich für die Aufzeichnung der Betriebsdauer und Arbeitsgeschwindigkeit von Maschinen und Geräten, absolut und relativ zu anderen Vorgängen. Er eignet sich dagegen nicht zur Überwachung von Zuständen und Zustandsänderungen,

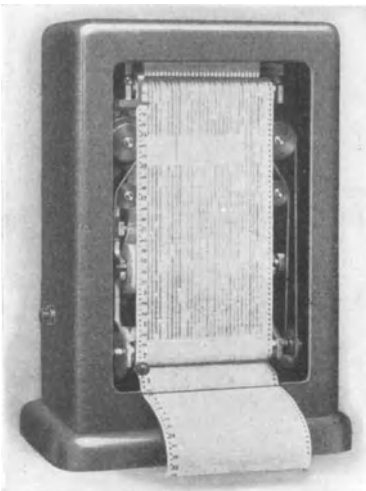


Abb. 257. Zeitschreiber der Fa. Ericsson.

sowie deren zeitlicher Folge; er hat aber den Vorteil geringer Wartung und hoher Schreibstellenzahl. Die Aufzeichnungen beider Schreiber sind insofern nicht völlig eindeutig, als die Schreibrelais keine besondere

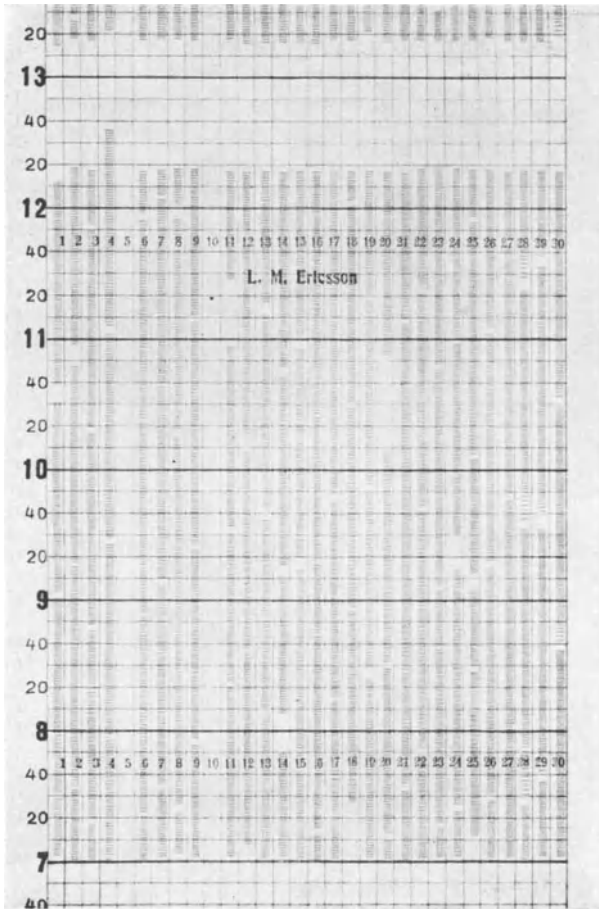


Abb. 258. Diagramm des Zeitschreibers der Fa. Ericsson.

Störungsmeldung haben, die Stellungen „Aus“ und „Stromlos“ also übereinstimmen. Dieser Mangel läßt sich durch Überwachung jedes Vorganges mit 2 Schreibrelais beheben. Es ergibt sich dann folgende Aufzeichnung:

Relaisstellung	Zustand des überwachten Vorganges oder Gerätes
Relais 1 in Arbeitsstellung	A
Relais 2 in Ruhestellung	
Relais 1 in Ruhestellung	B
Relais 2 in Arbeitsstellung	
Relais 1 in Ruhestellung	Störung am Gerät
Relais 2 in Ruhestellung	



Eine besondere Ausführungsform des Zeitschreibers ist der nicht auf dem Markt erschienene Stückzeitschreiber (Abb. 259). Der Stück-

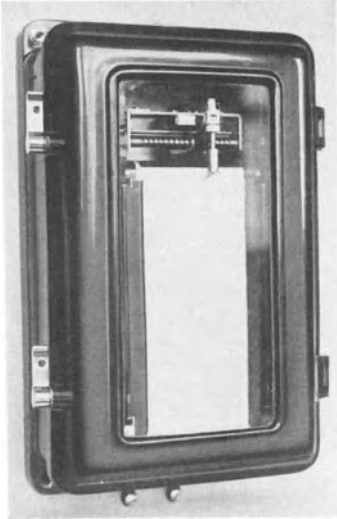


Abb. 259. Stückzeitschreiber.

zeitschreiber gestattet ebenso wie der Zeitschreiber die Ermittlung der Häufigkeit und des Zeitpunktes eines Vorganges; während aber der Zeitschreiber für mehrere Vorgänge bestimmt ist und in erster Linie eine bequeme Ablesung der Dauer und des Zeitpunktes gestattet, überwacht der Stückzeitschreiber nur einen Vorgang und gibt in erster Linie einen guten Überblick über die Häufigkeit und Regelmäßigkeit seiner Wiederkehr. Auf eine sehr genaue Zeitermittlung kommt es dabei weniger an. Der Zeitschreiber ist also mehr für einmalige Vorgänge bestimmt, die zu einem unbekanntem Zeitpunkt eintreten und rasch ablaufen, der Stückzeitschreiber dagegen für periodisch wiederkehrende Vorgänge, deren Zeitpunkt bekannt ist, zur

Summenbildung und zur Fabrikationsüberwachung. Die Schreibereinrichtung des Gerätes (Abb. 260) besteht aus einem Elektromagnet, der bei jedem ankommenden Stromstoß über

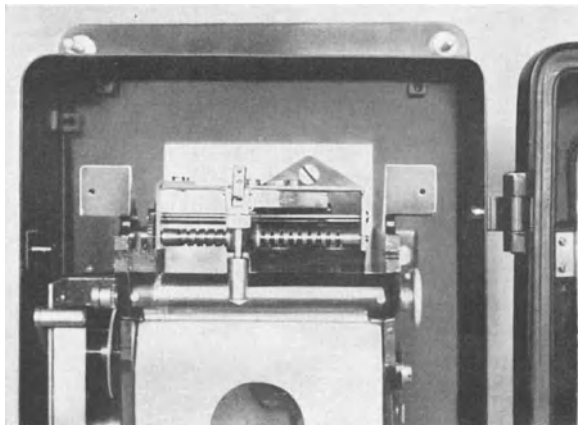


Abb. 260. Registrierwerk des Stückzeitschreibers.

ein Klinkwerk eine Welle um einen kleinen Betrag weiterdreht. Auf die Welle ist ein Rechts- und Linksflachgewinde aufgeschnitten, und auf diesem Gewinde wandert ein Schreibwagen mit Parallelführung bei

jedem Stromstoß um einen kleinen Betrag weiter, bis er einen Anschlag erreicht, wo er umgekehrt und in entgegengesetzter Richtung zurück-

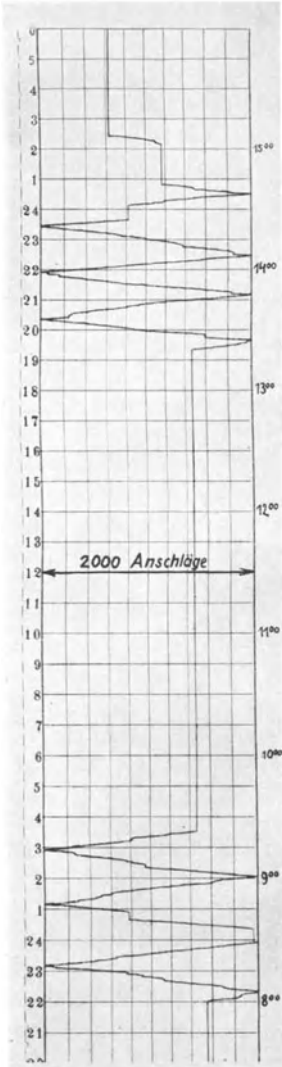


Abb. 261.  
Stückzeitschreiber an einer Schreibmaschine.  
1 Papierbreite = 2000 Anschläge,  
Papiervorschub = 40 mm/h.

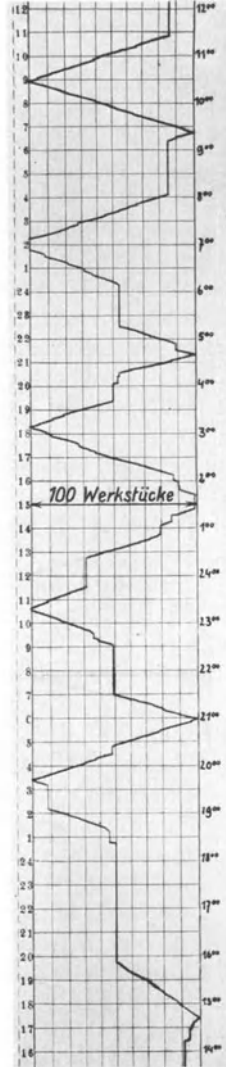


Abb. 262.  
Stückzeitschreiber an einer Spritzmaschine.  
1 Papierbreite = 100 Werkstücke,  
Papiervorschub = 20 mm/h.

wandert. Das Papier ist 70 mm breit, die Zahl der Stromstöße für eine Bewegung des Schreibschlittens über die volle Papierbreite beträgt 100.

Das Schreibpapier wird von einem Uhrwerk mit konstanter und wählbarer Geschwindigkeit angetrieben. Aus dem Diagramm können also ohne weiteres folgende Feststellungen getroffen werden:

Die Gesamtzahl der Überschreibungen des Papiers gibt die Gesamtzahl der aufgezeichneten Vorgänge an, da der von der Schreibfeder zurückgelegte Weg verhältnismäßig der Summe der Stromstöße ist. Die Neigung der geschriebenen Linienzüge gegen die Senkrechte ist ein Maß für die Stromstoßfrequenz, also für die Arbeitsgeschwindigkeit. Je stärker der Linienzug geneigt ist, desto schneller folgten die Stromstöße aufeinander. Ein senkrechter Diagrammstrich bedeutet, daß kein Stromstoß ankam, das überwachte Gerät also stillstand oder die Hilfsstromquelle abgeschaltet war. Der Zeitpunkt und die Dauer solcher Stillstände oder eines einzelnen Vorganges sind aus der Zeiteinteilung des Papiers zu ersehen. Abb. 261 zeigt beispielsweise die Anwendung des Stückzeitschreibers zur Ermittlung der Besetzung einer Schreibmaschine. Die Stenotypistin begann um 8 Uhr morgens die Diktate des Vortages aufzuarbeiten, ging um 9<sup>23</sup> Uhr zum Diktat und begann um 13<sup>20</sup> Uhr mit der neuen Niederschrift. Die reine Schreibzeit während des Tages betrug 2 h 48 min und die maximale Schreibgeschwindigkeit 2000 Anschläge in  $8\frac{3}{4}$  min oder 4 Anschläge/s, die Gesamtzahl der Anschläge während des Tages 25 800. Das nächste Diagramm (Abb. 262) wurde in einer Spritzgießerei aufgenommen. Während der 22stündigen Arbeitszeit wurden insgesamt 994 Stück gespritzt, die reine Arbeitszeit war 12 h, die Stillstandzeiten der Maschine 10 h. Die Maschine arbeitete also nur etwas über die halbe Zeit und war sehr schlecht ausgenutzt. Die höchste Arbeitsgeschwindigkeit betrug 100 Stück in 54 min oder 1 Stück in 32,5 s.

Oszillographen. An Stelle der mechanischen Zeitschreiber kann auch der Oszillograph zu Zeitaufnahmen herangezogen werden. Der Schleifenszillograph eignet sich infolge des hohen Papiervorschubs und der hohen Eigenfrequenz der Meßschleife besonders für sehr kurze Zeiten und kann in Verbindung mit einem passenden Anwurfgerät auch für ungesteuerte Vorgänge verwendet werden. Die Aufzeichnung erfolgt durch seitliche Auslenkung der Meßschleife mittels Gleichstrom, Wechselstrom oder Impulsen (Abb. 238 c...e); der Zeitmaßstab wird durch die Papierablaufgeschwindigkeit bestimmt. Für die höchste ausgeführte Papiergeschwindigkeit von 50 m/s und einen Abstand der Zeitmarken von 1 mm ergibt sich als kleinste meßbare Zeit 20  $\mu$ s. Beim Antrieb des Papiers durch Synchronmotor von einem frequenzgeregelten Netz und mäßigen Genauigkeitsansprüchen ist die Ablaufgeschwindigkeit allein ein hinreichend genauer Zeitmaßstab, bei unregelmäßigen Wechselstromnetzen und bei Gleichstromnetzen muß ein Zeitmaßstab mit aufgezeichnet werden, der entweder durch Impulse einer Normaluhr oder durch eine Normalfrequenz gegeben ist. Die Normalfrequenz kann unmittelbar

auf die Zeitmeßschleife gegeben oder mit einem besonderen Schwingungssystem aufgezeichnet werden. Die Siemens-Oszillographen werden mit einem besonderen Zeitschreiber für verschiedene Normalfrequenzen geliefert. Abb. 263 zeigt den Siemens-Universaloszillographen mit 6 Meßschleifen und einem Zeitschreiber. Das Gerät ist auf einem besonderen

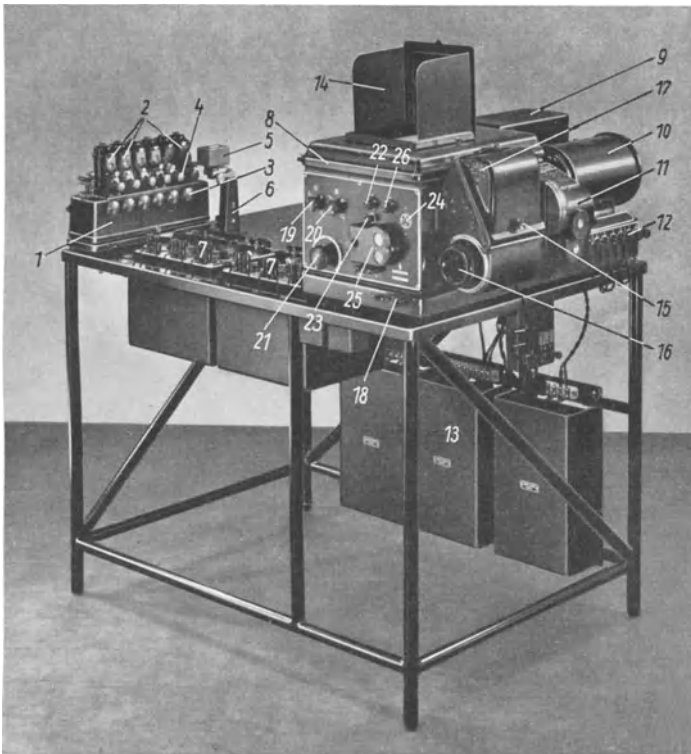


Abb. 263. Universaloszillograph von Siemens & Halske.

1 Meßschleifengestell; 2 Meßschleifen; 3 Seitenverstellung der Meßschleifen; 4 Höhenverstellung der Meßschleifen; 5 Zeitschreiber; 6 Schalter für den Zeitschreiber; 7 Regelwiderstände für die Amplitudeneinstellung; 8 Aufnahmegestell; 9 Lampengehäuse; 10 Universal-Antriebsmotor; 11 Motorgetriebe; 12 Anschlußklemmen des Motors; 13 Vorwiderstände für Lampe und Motor; 14 Beobachtungseinrichtung; 15 Ablaukkassette; 16 Aufnahmetrommel für das belichtete Papier; 17 Anzeiger für den Papiervorrat; 18 Kupplung für den Papierablauf; 19 Schalter für die Lichtquelle; 20 Schalter für den Antriebsmotor; 21 Drehzahlregler des Antriebsmotors; 22 Schalter zum Öffnen und Schließen des Verschlusses für Zeitaufnahmen; 23 Auslösung des Momentverschlusses; 24 Schauzeichen für den Aufzugzustand des Verschlusses; 25 Steuerschalter für gezielte Aufnahmen; 26 Umschalter für Zeit- und Momentaufnahmen.

Tisch aufgebaut und besteht aus dem Meßschleifengestell, dem Aufnahmeapparat und den Regelorganen. Die Meßschleifen enthalten eine schmale stromdurchflossene Drahtschleife im Feld eines Dauermagnets, auf deren Mitte ein kleiner Spiegel aufgekittet ist; sie werden mit Eigenfrequenzen bis 20 kHz ausgeführt und sind zwecks Dämpfung in ein ölfülltes

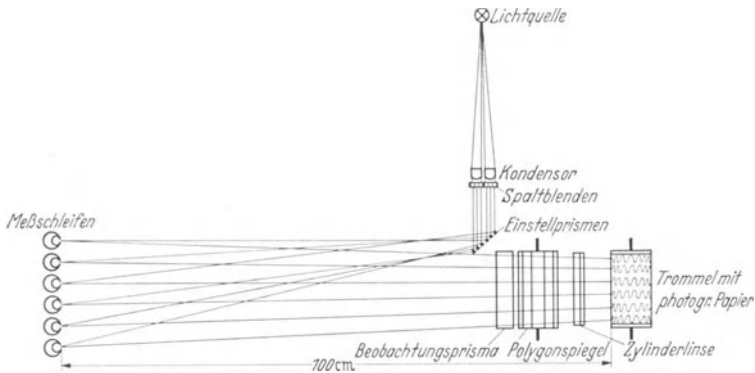


Abb. 264. Strahlengang der 6 Meßschleifen im Universal-Oszillographen von Siemens & Halske.

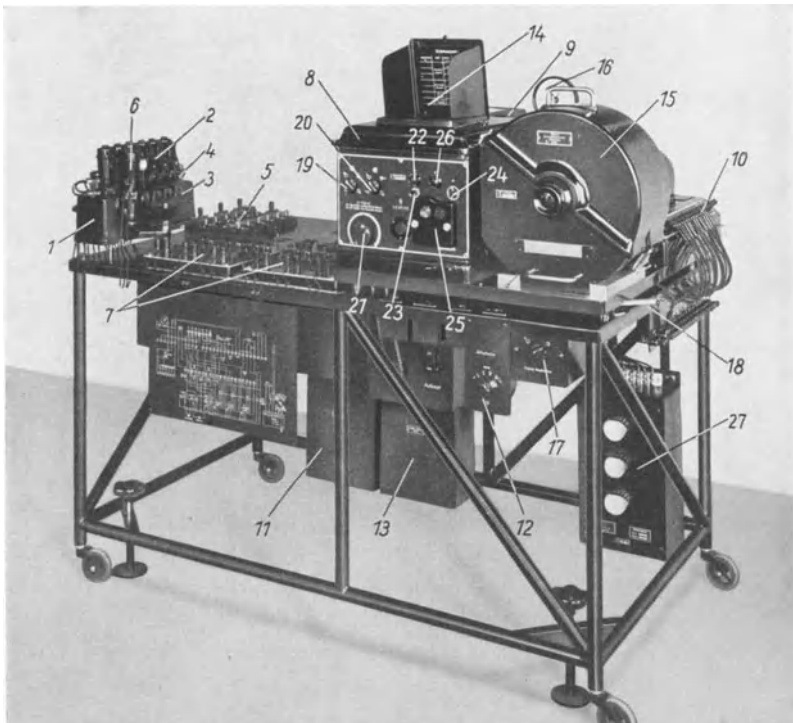


Abb. 265. 50 m-Oszillograph von Siemens & Halske.

1 Meßschleifengestell; 2 Meßschleifen; 3 Seitenverstellung der Meßschleifen; 4 Höhenverstellung der Meßschleifen; 5 Meßstellenumschalter; 6 Zeitschreiberschleife; 7 Amplitudenregler; 8 Aufnahmegerät; 9 Lampengehäuse; 10 Steuerwalze; 11 Vorwiderstände für die Lampe; 12 Umschaltung des Zeitschreibers auf verschiedene Normalfrequenzen; 13 Vorwiderstände für den Motor; 14 Beobachtungseinrichtung; 15 Trommelkassette; 16 Drehzahlmesser für die Trommelkassette; 17 Hauptschalter für die Meßvorgänge; 18 Kupplungshebel für die Papiertrommel; 19 Einschalter für die Lichtquelle; 20 Einschalter für den Antriebsmotor; 21 Drehzahlregler des Antriebsmotors; 22 Schalter zum Öffnen und Schließen des Verschlusses; 23 Auslösung des Momentverschlusses; 24 Schauzeichen für den Aufzugzustand des Verschlusses; 25 Steuerschalter für gezielte Aufnahmen; 26 Umschalter für Zeit- und Momentaufnahmen; 27 Normalfrequenzgeber.

Isolierstoffgehäuse eingesetzt. Die Meßschleifen werden mit 12 kV Prüfspannung gegeneinander und gegen Erde geprüft. Das Aufnahmegerät enthält die Lichtquelle, die Optik, eine Beobachtungsmattscheibe, sowie den Antriebsmotor mit Getriebe und sämtliche Schalt- und Regelorgane. An das Aufnahmegerät wird eine Trommel- oder Ablaufkassette seitlich angeschoben. Die Aufzeichnung erfolgt in rechtwinkligen Koordinaten auf 120 mm breitem Papier. Die höchste Papiergeschwindigkeit ist bei der Trommelkassette 10, bei der Ablaufkassette 2 m/s. Der Antriebsmotor ist für Gleich- oder Drehstrom verwendbar. Den Strahlengang

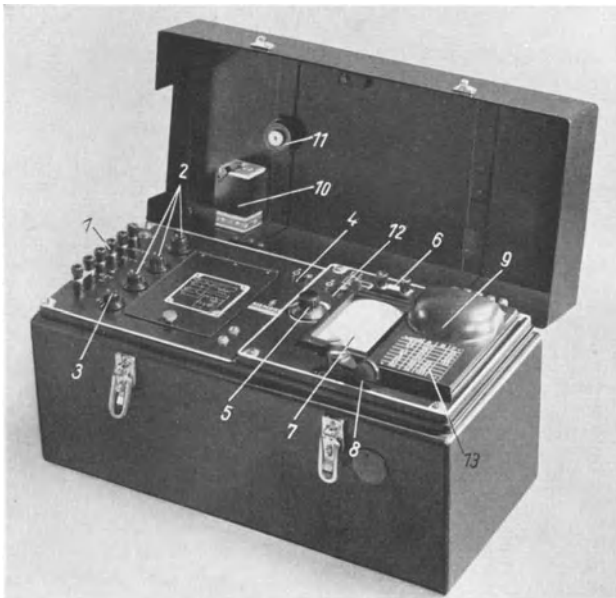


Abb. 266. Tragbarer Oszillograph der Siemens & Halske AG.

1 Anschlüsse für die Lampe; 2 Seitenverstellung der Meßschleifen; 3 Seitenverstellung des Nullpunktspiegels; 4 Lampenschalter; 5 Drehzahlregler; 6 Anschlußklemmen für den Motor; 7 Beobachtungsmattscheibe; 8 Papiertransportschalter; 9 Ablaufkassette; 10 Reservelampe; 11 Wechselräder; 12 Motorschalter; 13 Tabelle für Wechselgetriebe.

des Oszillographen zeigt Abb. 264. Das Licht der Bogenlampe wird zunächst durch einen Kondensator parallel gerichtet, dann werden mit 6 Spaltblenden die Strichdicken eingestellt und die einzelnen Strahlen mit drehbaren Prismen auf die Spiegel der Meßschleifen geworfen, die sie in den Aufnahmeapparat reflektieren. Zur Aufnahme wird jeder Lichtstrahl in 2 Teile aufgespalten. Ein Teil geht über einen umlaufenden Polygonspiegel zur Beobachtungsmattscheibe, der andere, durch eine Zylinderlinse auf einen Lichtpunkt zusammengezogen, auf die Schreibfläche. Abb. 265 zeigt eine Sonderausführung des Gerätes mit 7 Meßschleifen und Trommelkassette für Papiergeschwindigkeiten bis 50 m/s

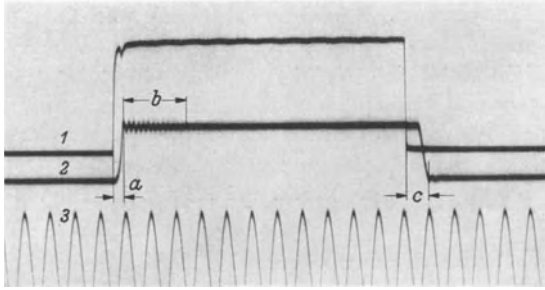


Abb. 267. Oszillogramm der Bewegung eines Relaisankers.  
 1 Relaisstrom; 2 Ankerbewegung; 3 Normalfrequenz 50 Hz; *a* Anzugzeit des Ankers 8 ms;  
*b* Ankerprellungen 56 ms; *c* Abfallzeit des Ankers 17 ms.

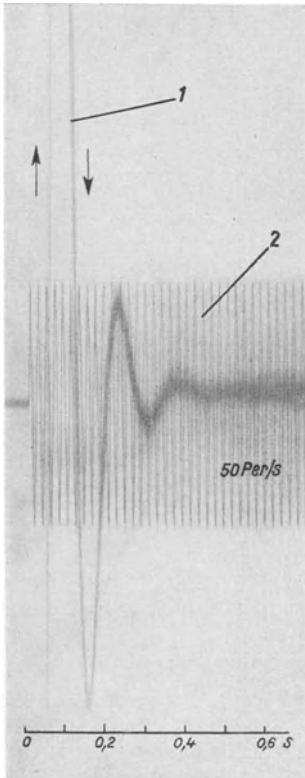


Abb. 268. Messung der Beruhigungszeit eines schnell-schwingenden Systems.  
 [Aus Siemens-Z. Bd. 13 (1933) S. 206.]

1 Bewegung des Meßwerks;  
 2 Vergleichsfrequenz 50 Hz.

auf einem fahrbaren Rohrgestell. Abb. 266 ist eine tragbare Ausführung mit 3 Meßschleifen. Der Apparat wird mit mehreren Einsatzkassetten für Standaufnahmen in der Größe  $9 \times 12$  cm oder Ablaufaufnahmen auf 9 cm breitem Papier und 1 m/s Höchstgeschwindigkeit geliefert. Ein Oszillogramm vom Bewegungsvorgang eines Relaisankers zeigt Abb. 267. Für die Aufnahme wurde der Relaisanker mit einem aufgeklebten Meßschleifenspiegel versehen und an Stelle einer Meßschleife in den Strahlengang des Oszillographen gebracht. Durch gleichzeitige Aufzeichnung des Relaisstromes, der Ankerbewegung und einer Normalfrequenz erhält man einen Einblick in die Arbeitsweise des Relais und kann die Zeiten für Anzug und Abfall des Ankers genau ermitteln. In ähnlicher Weise wurde die Abb. 268 aufgenommen, es zeigt den Einschwingvorgang eines Meßgerätes zwecks Ermittlung der Beruhigungszeit. Die Aufnahme wurde durch Aufkitten eines Spiegels auf die Meßwerkachse und Einsetzen des Meßgerätes an Stelle einer Oszillographenschleife ermöglicht. Die Zeitkurve wurde mit einer 50 Hz-Normalfrequenz geschrieben. Ein anderes Verfahren zu dem gleichen Zweck zeigt Abb. 269. Bei dieser Aufnahme wurde eine mit der Normalfrequenz betriebene Meßschleife über die ganze Papierbreite mit engliegenden Sinuskurven

ausgesteuert, also die volle Papierbreite mit engliegenden Sinuskurven

beschrieben, die unmittelbar als Zeitlinien dienen können. In den Strahlengang der Meßschleife wird der Zeiger des Meßgerätes gebracht, dessen Einschwingvorgang nunmehr als weiße Schattenlinie erscheint.

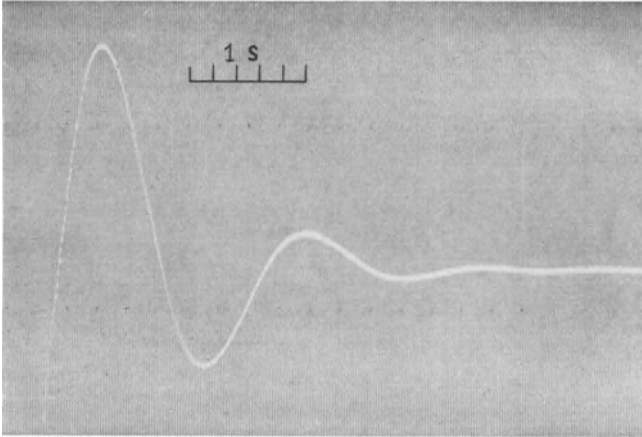


Abb. 269. Einschwingen eines Flachprofil-Drehspul-Instruments: Überschreiben des Diagramms mit einer Sinuslinie; Anordnung des Systems vor dem Aufnahmeapparat.

Für besonders kurze Zeiten wird der Elektronenstrahloszillograph eingesetzt. Beim Elektronenoszillographen werden die von einer Kathode ausgehenden Elektronen durch eine Elektronenoptik zu einem feinen

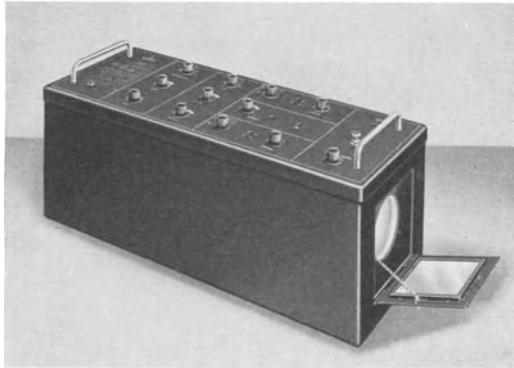


Abb. 270. Tragbarer Elektronenoszillograph mit 130 mm Kolbendurchmesser. (Bauart Siemens & Halske A.G.). (Aus Druckschrift S. & H. 7014a 1. 7. 39 Ms. VI.)

Strahlenbündel vereinigt, auf einen Leuchtschirm oder eine photographische Platte geworfen. Auf diesen Elektronenstrahl wirken zwei ablenkende Kräfte ein, die eine verhältnismäßig der zu messenden Größe, die andere als Funktion der Zeit. Werden die Ablenkplatten in zwei aufeinander senkrechten Richtungen angeordnet, so erfolgt die Aufzeichnung in



rechtwinkligen Koordinaten, während eine Zeitablenkung durch ein Drehfeld eine Aufzeichnung in Polarkoordinaten ergibt. Abb. 270 ist ein großer tragbarer Elektronenoszillograph der Siemens & Halske AG. mit 130 mm Schirmdurchmesser. Der Apparat kann wahlweise mit einer gasgefüllten oder einer evakuierten Röhre bestückt werden und ergibt in einem Fall eine höhere Schreibgeschwindigkeit, im anderen Fall einen

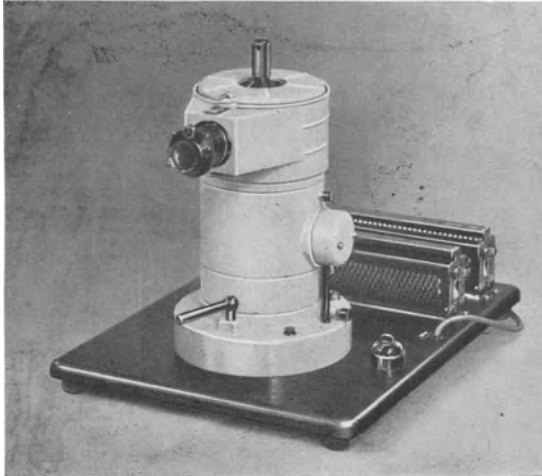


Abb. 271. Trommelkammer zum Siemens-Elektronenoszillograph.  
(Aus Druckschrift S. & H. 7013 a 3. 7. 39 Ms. VI.)

größeren Frequenzbereich. Die Anodenspannung  $U_a$  ist wählbar und kann auf die Werte 1000, 2000, 3000 oder 4000 V eingestellt werden. Die Empfindlichkeit und Schreibgeschwindigkeit mit beiden Röhren geht aus der folgenden Tabelle hervor:

Elektronenstrahlröhre	Gas	Vakuum
Schirmdurchmesser . . . . .	13 cm	13 cm
Empfindlichkeit der waagerechten Platten .	$650/U_a$ mm/V	$400/U_a$ mm/V
Empfindlichkeit der senkrechten Platten .	$600/U_a$ mm/V	$360/U_a$ mm/V
Empfindlichkeit der senkrechten Platten mit Verstärker . . . . .	$3000/U_a$ mm/V	$1800/U_a$ mm/V
Höchste Schreibgeschwindigkeit . . . . .	etwa 15 km/s	etwa 5 km/s

Die angegebenen Empfindlichkeiten gelten nur näherungsweise, sie sinken mit wachsender Anodenspannung  $U_a$  der BRAUNSCHEN Röhre in gleichem Verhältnis. Bei der größten Helligkeit, nämlich bei Betrieb mit 4000 V, herrscht demnach  $\frac{1}{4}$  der Empfindlichkeit bei  $U_a = 1000$  V. Beim Anlegen einer sinusförmigen Wechselspannung erhält man die

2,8fachen Werte der für Gleichspannung angegebenen Ausschläge. Die Kippfrequenz ist in weiten Grenzen regelbar; bei der größten einstellbaren Kippamplitude ist eine höchste Kippfrequenz von 70 kHz zu erzielen. Für die Registrierung kann eine Kamera für Standaufnahmen oder die in Abb. 271 gezeigte Trommelkamera mit 40 m/s Papiergeschwindigkeit angesetzt werden. Die Filmtrommel hat 63 cm Umfang und 9 cm Registrierbreite. Ihre Umfangsgeschwindigkeit läßt sich zwischen 1 und 40 m/s regeln und bei einer Sonderausführung sind 80 m/s erreichbar. Diese Papiergeschwindigkeit entspricht der Ablenkgeschwindigkeit der Kipp-schwingung. Die Optik der Kamera hat ein Öffnungsverhältnis  $f = 1:2$ . Der Compurverschluß ermöglicht Zeit- und Momentaufnahmen bis  $\frac{1}{200}$  s, er wird nach der Umdrehungszahl des Motors so eingestellt, daß die Belichtung der Filmtrommel während einer Umdrehung erfolgt.

Eine besonders bequem tragbare Ausführung für Vollnetzanschluß mit dem geringen Gewicht von 9 kg zeigt Abb. 272. Das Gerät enthält eine Vakuumröhre mit 75 mm Schirmdurchmesser, 650 V Anodenspannung und einer Empfindlichkeit von 0,5 mm/V in der waagerechten und 0,37 mm/V in der senkrechten Achse. Durch einen von 10 Hz bis 30 kHz verwendbaren Verstärker kann die Empfindlichkeit in der senkrechten Achse auf 37 mm/V gesteigert werden; der Verstärker läßt sich auch für die Verstärkung von Gleichspannungskomponenten umschalten, so daß er von 0...30 kHz verwendbar wird, die Empfindlichkeit in dieser Schaltung beträgt jedoch nur 18 mm/V. Die Kippfrequenz läßt sich von 30 Hz bis 120 kHz regeln, wodurch sich ein Frequenzbereich von 10 Hz bis 120 kHz ergibt. Die höchste Kippgeschwindigkeit, das ist der größte sekundliche Kippspannungsanstieg beträgt  $15 \cdot 10^6$  V/s,



Abb. 272. Tragbarer Elektronenoszillograph von Siemens & Halske.

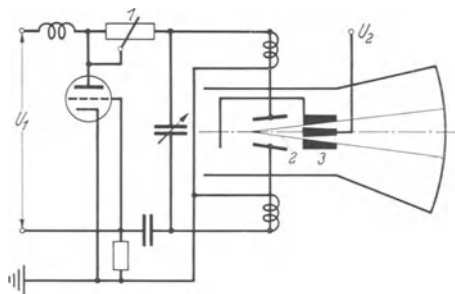


Abb. 273. Prinzipschaltung eines Polarkoordinaten-Oszillographen.

$U_1$  Synchronspannung;  $U_2$  Meßspannung; 1 Regler für den Skalen-Durchmesser; 2 Einstellen der Kreisform durch Abgleich der Ablenkamplitude; 3 Zylinderkondensator zur radialen Auslenkung.

die höchste Zeitdehnung  $7,5 \cdot 10^6$  mm/s und die größtmögliche Auflösung bei 1 MHz Nennfrequenz 7,5 mm. Die photographische Aufnahme der Kurven erfolgt bei diesem Gerät mit einer normalen Standkamera. Bis zu Geschwindigkeiten von 10 m/s lassen sich auch einmalig über den Schirm geschriebene Vorgänge aufnehmen. Die Kippgeschwindigkeit des Elektronenoszillographen, also die Zeitablenkung, entspricht der Papiergeschwindigkeit beim Schleifenoszillographen und muß deshalb für Zeitaufnahmen absolut konstant gehalten werden, da ja bei Einstrahlgeräten keine Möglichkeit besteht, Zeitmarken mitzuschreiben.

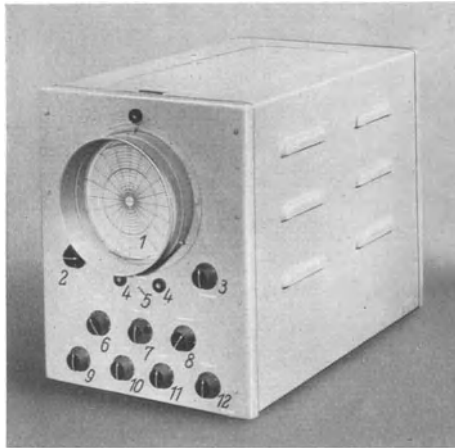


Abb. 274. Polar-Oszillograph.

1 Leuchtschirm in Polarkoordinaten; 2 Einstellung der Kreisform des Kathodenstrahls; 3 Einstellung des Diagramm-Durchmessers; 4 Anschluß der Steuerspannung; 5 Erdungsanschluß; 6 Umschalter für Eigen- und Fremderregung; 7, 8 Grob- und Feinregler für die Frequenz; 9 Einstellung der Punktlage waagrecht; 10 Einstellung der Punktschärfe; 11 Einstellung der Punkthelligkeit; 12 Einstellung der Punktlage senkrecht.

Bei Verwendung der Trommelkammer mit umlaufendem Film ist die Drehzahl konstant zu halten. Bei Mehrstrahloszillographen kann mit einem der Strahlen eine Normalfrequenz als Zeitmaßstab mitgeschrieben werden, die Ablenkgeschwindigkeit braucht also nicht bekannt zu sein. Beim Polarkoordinatenoszillograph wird als Ablenkensystem ein Zylinderkondensator, für die Zeitablenkung ein Drehfeld in der Schaltung der Abb. 273 verwendet. Der Elektronenstrahl beschreibt somit unter dem Einfluß der Zeitablenkung einen Kreis um die Röhrenachse, dem die Meßamplituden in radialer Richtung überlagert sind. Der Lichtkreis wird mit dem — der Skala des Meßgerätes entsprechenden — Nullkreis hinsichtlich Mittelpunktage und Durchmesser durch Regler zur Deckung gebracht. Der Umfang des Nullkreises ist 300 mm, die kürzeste Umlaufzeit des Elektronenstrahles  $5 \mu\text{s}$ , somit ergibt sich für einen Weg des Elektronenstrahles von 1 mm als kleinste meßbare Zeit  $0,0166 \mu\text{s}$ . Die

größte meßbare Zeit ist die Zeit für einen vollen Umlauf des Elektronenstrahles, sie beträgt bei der Normalausführung maximal 1,66 ms, bei einer Sonderausführung 20 ms. Abb. 274 ist eine Ansicht des Gerätes, Abb. 275 ein Oszillogramm des zeitlichen Abstandes zweier Impulse.

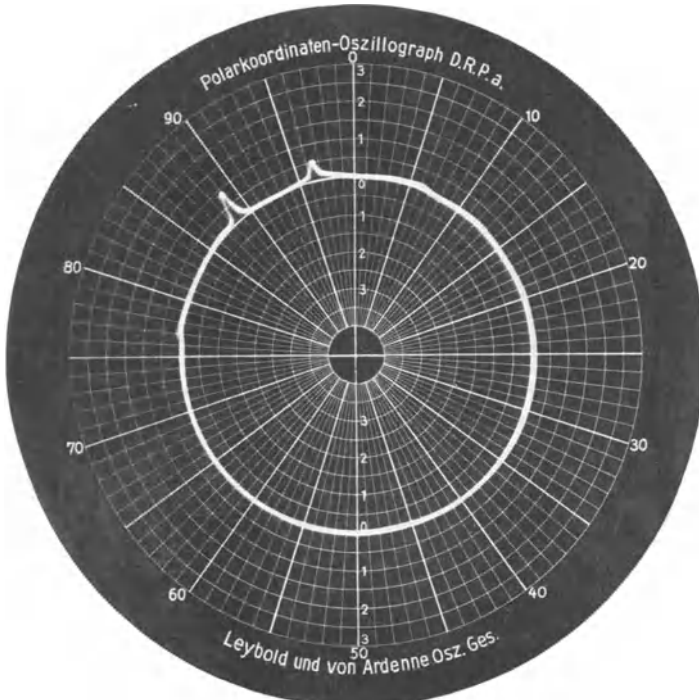


Abb. 275.

Oszillogramm eines Polar-Oszillographen zur Bestimmung des zeitlichen Abstandes zweier Impulse.  
1 Umlauf des Elektronenstrahles = 5  $\mu$ s.

### 3. Kurzzeitmesser [44].

Zeitmessung mit dem Drehspul-Instrument. Erteilt man einem Drehspul-Instrument einen Stromstoß  $i$ , dessen Dauer  $t$  klein ist gegen die Eigenschwingungszeit des Galvanometers, so ist der Ausschlag  $\alpha = \frac{i \cdot t}{C}$ , wenn  $C$  die ballistische Konstante des Galvanometers bezeichnet. Das Gerät ist also ein Amperesekundenmesser, der durch Konstanthalten des Stromes zum reinen Zeitmesser wird. Die notwendige große Schwingungszeit kann auf zweierlei Weise erzielt werden.

Beim ballistischen Galvanometer wird die gewünschte niedrige Eigenfrequenz durch ein sehr großes Trägheitsmoment erreicht. Die Dämpfung ist normal und das Instrument kehrt nach der Messung in die Ruhelage

zurück. Im Gegensatz dazu hat das Kriechgalvanometer kleines Trägheitsmoment und die hohe Eigenschwingungszeit wird durch ein sehr kleines Richtmoment erzielt. Die Dämpfung ist stark überaperiodisch und der Zeiger muß nach der Messung durch besondere Mittel in die Nullage zurückgeführt werden. Der Meßbereich dieser Zeitmesser reicht etwa von 1 ms bis 30 s. Die einfachste Schaltung des ballistischen

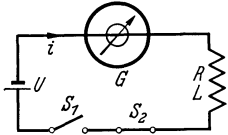


Abb. 276. Zeitmessung mit dem ballistischen Galvanometer mit Ein- und Ausschalter.

$U$  Meßspannungsquelle;  
 $R$  Widerstand des Meßkreises;  
 $L$  Selbstinduktion des Meßkreises;  $i$  Meßstrom;  $S_1$  Einschalter;  $S_2$  Ausschalter.

oder

$$U = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (122)$$

$$i = \frac{U}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (123)$$

In der Zeit  $t$  zwischen dem Schließen des Schalters  $S_1$  und dem Öffnen des Schalters  $S_2$  fließt durch das Galvanometer die Elektrizitätsmenge

$$Q = \int_0^t i \cdot dt = \frac{U}{R} \left[ t - \frac{L}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \right] = C \cdot \alpha. \quad (124)$$

Dabei ist zur Zeit  $t=0$ ;  $Q=0$  und  $i=0$  gesetzt. Für einen Stromkreis mit vernachlässigbarer Selbstinduktion folgt daraus

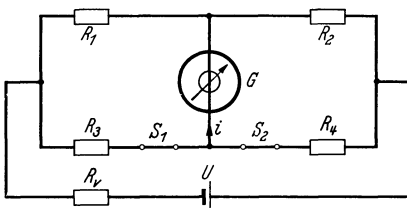


Abb. 277. Zeitmessung mit dem ballistischen Galvanometer in Brückenschaltung mit 2 Ausschaltern.  $U$  Meßspannung;  $R_1 \dots R_4$  Brückenwiderstände;  $R_0$  Vorwiderstand;  $i$  Meßstrom;  $S_1, S_2$  Ausschalter.

$$Q = \frac{U}{R} \cdot t = C \cdot \alpha \quad (125)$$

oder

$$t = \frac{Q \cdot R}{U} = C \cdot \alpha \cdot \frac{R}{U}. \quad (126)$$

Da die ballistische Konstante  $C$ , Widerstand des Stromkreises  $R$  und Meßspannung  $U$  Konstante der Meßanordnung sind, ist also der Ausschlag  $\alpha$  ein Maß für die gesuchte Zeit  $t$ . Die ballistische

Konstante  $C$  wird entweder durch Rechnung oder durch Eichung mit einer bekannten Zeit  $t$  ermittelt. Nach RAMSAUER ist dieses Verfahren einwandfrei bis zu Zeiten von  $t = 1 \cdot 10^{-6}$  s. Bei dieser Schaltung ist ein Ein- und ein Ausschalter notwendig. Häufig ist es aber wünschenswert, anstatt mit einem Stromschluß und einer Stromunterbrechung mit 2 Unterbrechungen zu arbeiten. Die Einrichtung wird dann nach Abb. 277 geschaltet. Solange beide Schalter  $S_1$  und  $S_2$  geschlossen sind, ist die Brücke im Gleichgewicht und das Galvanometer  $G$  stromlos. Durch Öffnen des Schalters

$S_1$  wird die Brücke verstimmt und in der Brückendiagonale beginnt der Meßstrom zu fließen. Durch Öffnen des Schalters  $S_2$  wird das Galvanometer wieder stromlos. Eine Röhrenschialtung mit 2 Einschaltern wurde von BÜGE angegeben (Abb. 278). Das Rohr  $V$  ist so geheizt, daß es nach dem Schließen des Schalters  $S_1$  seinen Sättigungsstrom liefert. Nach dem Schließen des Schalters  $S_2$  fließt durch den kleinen Widerstand  $W_2$  ein großer Strom und ruft am Widerstand  $W_1$  einen so großen Spannungsabfall hervor, daß das Gitter des Verstärkerrohres ein hinreichend großes negatives Potential zur völligen Sperrung des Anodenstromes erhält. Das ballistische Galvanometer erhält also in der Zeit zwischen dem Schließen von  $S_1$  und  $S_2$  einen Stromstoß mit dem Sättigungsstrom des Verstärkerrohres. An die Stelle des Galvanometers kann auch ein Kondensator gelegt werden, dessen Spannung nach der Aufladung gemessen wird.

Aufladung eines Kondensators. Bezeichnet  $i$  den Lade- oder Entladestrom,  $C$  die Kapazität und  $t$  die Lade- oder Entladedauer eines Kondensators, so gilt für seine Klemmenspannung

$$U = \frac{i}{C} \cdot t. \quad (127)$$

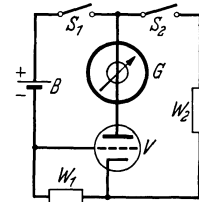


Abb. 278. Kurzzeitmessung mit ballistischem Galvanometer mit 2 Einschaltern.  $S_1, S_2$  Schalter;  $B$  Anodenbatterie;  $W_1, W_2$  Widerstände;  $G$  ballistisches Galvanometer;  $V$  Verstärker.

Bei konstantem Ladestrom kann somit die Klemmenspannung als Maß für die Ladezeit gelten, es ist jedoch nicht erforderlich, die Ladestromstärke konstant zu halten. Betrachtet man die an einer Gleichspannungsquelle liegende Reihenschaltung eines Kondensators  $C$  mit einem ohmschen Widerstand  $R$  nach Abb. 279, so gilt für die Ladung  $Q$  zur Zeit  $t$  nach dem Schließen des Schalters  $S$

$$Q = U \cdot C \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right). \quad (128)$$

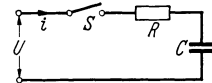


Abb. 279. Aufladung eines Kondensators von einer Gleichspannungsquelle.

Da die Daten des Stromkreises,  $U$ ,  $C$  und  $R$  konstant sind, kann also die Zeit  $t$  aus der mit elektrostatischem Spannungsmesser oder ballistischem Galvanometer ermittelten Kondensatorspannung bzw. Kondensatorladung bestimmt werden. In gleicher Weise kann die Entladung eines auf die Anfangsspannung  $U_a$  geladenen Kondensator  $C$  über einen Widerstand  $R$  zur Zeitmessung herangezogen werden. Die Ladung  $Q$  zur Zeit  $t$  nach dem Schließen des Entladeschalters beträgt

$$Q = U \cdot C \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}. \quad (129)$$

Nach dem Kondensatorverfahren wurden verschiedene Kurzzeitmesser durchgebildet. Abb. 280 zeigt das absolute Verfahren mit dem ballistischen Galvanometer, so genannt, weil die ballistische Konstante des

Galvanometers nicht in die Messung eingeht. Zu Beginn der Messung sind die Schalter  $S_1$  und  $S_2$  geschlossen und die Kapazität  $C$  auf die Spannung  $U$  aufgeladen. Eine Messung der auf dem Kondensator befindlichen Elektrizitätsmenge  $Q_0$  mit dem ballistischen Galvanometer  $G$  durch Umlegen des Schalters  $S_3$  gibt den Galvanometerausschlag  $\alpha_0$ . Nach dem Öffnen des Schalters  $S_1$  entlädt sich der Kondensator über den Widerstand  $R$ , bis das Öffnen von  $S_2$  die Entladung beendet. Die Messung der Restladung  $Q$  gibt den Galvanometerausschlag  $\alpha$ . Nun ist

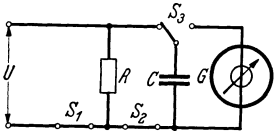


Abb. 280. Absolutes Verfahren der Zeitmessung durch Kondensator-entladung mit dem ballistischen Galvanometer.

$U$  Meßspannung;  $R$  Entladewiderstand;  $C$  Meßkapazität;  $G$  ballistisches Galvanometer;  $S_1, S_2$  Ausschalter;  $S_3$  Umschalter.

$$Q_0 = U \cdot C, \quad (130)$$

$$Q = U \cdot C \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}, \quad (131)$$

$$t = R \cdot C \cdot \ln \frac{Q_0}{Q} = R \cdot C \cdot \ln \frac{\alpha_0}{\alpha}. \quad (132)$$

Das Verfahren eignet sich für den Meßbereich  $1 \cdot 10^{-1} \dots 1 \cdot 10^{-6}$  s und hat seine größte

Genauigkeit bei einem Verhältnis der Galvanometerausschläge  $\frac{\alpha_0}{\alpha} = 3$ .

Bei dem Verfahren von MELZER (Abb. 281) zur Messung von Fahrzeuggeschwindigkeiten wird beim Durchfahren der Lichtschranke  $P_1$  das

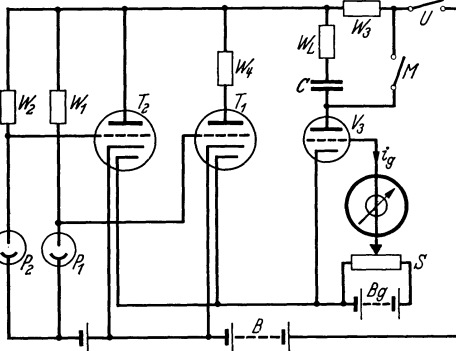


Abb. 281. Zeitmessung mit Kondensatorladung und lichtelektrischer Steuerung.

$P_1, P_2$  lichtelektrische Zelle;  $T_1, T_2$  Stromtor;  $C$  Meßkondensator;  $V_3$  Röhrenvoltmeter;  $M$  Entladeschalter;  $U$  Einschalter;  $B$  Anodenbatterie;  $Bg$  Gitterbatterie;  $S$  Potentiometer für Nulleinstellung.

Röhrenvoltmeters verhindert die Entladung des Kondensators. Gemessen wird der Gitterstrom  $i_g$  der Röhre  $V_3$ , nachdem vor der Messung der Gitterruhestrom bei entladene Meßkondensator mit dem Potentiometer  $S$  kompensiert wurde. Nach der Messung wird der Kondensator durch Schließen des Schalters  $M$  entladen und die Ionenrohre durch Öffnen des Schalters  $U$  gelöscht.

Ionenrohr  $T_1$  gezündet und der Spannungsabfall an  $W_4$  lädt den Meßkondensator  $C$  über den Widerstand  $W_L$  auf. Beim Durchfahren der zweiten Lichtschranke  $P_2$  zündet das Ionenrohr  $T_2$  und die Spannung an  $W_4$  bricht zusammen. Der Kondensator  $C$  wird also nur in der Zeit zwischen der Betätigung der beiden Lichtschranken geladen. Der Widerstand  $W_3$  nimmt die um die Brennspannung verminderte Anodenspannung  $B$  auf und die Röhre  $V_3$  des

Bei der folgenden amerikanischen Schaltung (Abb. 282) werden zwei Verstärkerröhren in Gegentaktschaltung verwendet. Gitter und Anoden der Verstärkerröhren  $V_1$  und  $V_2$  sind kreuzweise über Widerstände und Photozellen miteinander verbunden und blockieren sich gegenseitig. Durch Kurzschließen eines Gitterwiderstandes  $W_1$ ,  $W_2$  oder Änderung der Gitterspannung geht der Strom sprunghaft von einem auf das andere Rohr über. Die Steuerung dieser Umschaltung erfolgt entweder mechanisch durch die Kontakteinrichtungen  $S_1$  und  $S_2$  oder lichtelektrisch durch Verdunklung der Photozellen  $P_1$ ,  $P_2$ . Durch Schließen von  $S_1$  oder Verdunklung von  $P_1$  springt der Strom nach dem Rohr  $V_1$ , das Rohr  $V_2$  wird gesperrt. Durch Schließen von  $S_2$  oder Verdunklung von

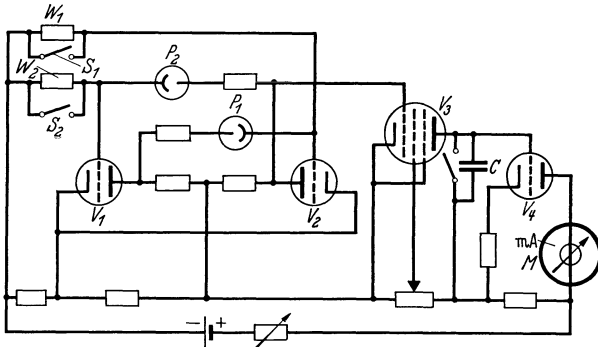


Abb. 282. Messung von Geschößgeschwindigkeiten durch Kondensatorladung.  
 $S_1$ ,  $S_2$  Schalter;  $V_1$ ,  $V_2$  Dreipolröhre;  $P_1$ ,  $P_2$  lichtelektrische Zelle;  $V_3$  Verstärkerrohr;  
 $V_4$  Röhrenvoltmeter;  $C$  Meßkondensator;  $M$  Drehspul-Instrument.

$P_2$  springt er nach  $V_2$  zurück.  $V_2$  wird also zwischen zwei Schaltvorgängen stromlos und gibt in dieser Zeit das Steuergitter der Röhre  $V_3$  frei, deren Anodenstrom den Meßkondensator  $C$  auflädt. Die Kondensatorspannung wird mit dem Röhrenvoltmeter  $V_4$  gemessen und ist ein Maß für das Zeitintervall zwischen den Kontaktbetätigungen. Die Anordnung bleibt lange Zeit konstant, wenn die Schirmgitterspannung von  $V_3$  und somit der Kondensatorladestrom konstant ist.

Der Zeittransformator. Auch der Zeittransformator beruht auf der Kondensatorladung. Ein Kondensator wird während der Meßzeit  $t_1$  mit dem konstanten Ladestrom  $i_1$  aufgeladen und während der Zeit  $t_2$  mit dem ebenfalls konstanten, wesentlich kleineren Strom  $i_2$  entladen. Dann ist

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{t_2}{t_1} = \ddot{u}, \quad (133)$$

wenn  $\ddot{u}$  das Übersetzungsverhältnis des Zeittransformators bedeutet. Man ist also in der Lage, die Meßzeit durch Wahl der Ströme  $i_1$  und  $i_2$  beliebig zu strecken. Die Schaltung ist in Abb. 283 gezeigt. Nach dem Schließen des Schalters  $S_1$  lädt die Spannung  $U_1$  den Meßkondensator  $C$



über das mit seinem Sättigungsstrom  $i_1$  arbeitende Ventil  $T_1$  auf. Der Spannung  $U_1$  wirkt die Spannung  $U_2$  entgegen, der Ladestrom kann also nur fließen, wenn  $U_1$  größer als  $U_2$  ist. Wird der Schalter  $S_2$  geschlossen, so wird die Ladung unterbrochen und der Kondensator  $C$  entlädt sich nun über das Ventil  $T_2$ , dessen Sättigungsstrom  $i_2$  sehr viel kleiner als  $i_1$  ist. Die Hilfsspannung  $U_3$  treibt den Sättigungsstrom  $i_2$  auch dann noch durch das Ventil  $T_2$ , wenn die Kondensatorspannung allein nicht mehr dazu in der Lage wäre. Die Spannung des Kondensators betätigt über einen Verstärker einen Zeitschreiber, der die Entladedauer  $t_2$  aufzeichnet und damit die Ermittlung von  $t_1$  aus dem bekannten Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  gestattet. Der Fehler durch die Entladung des

Kondensators über seinen Isolationswiderstand  $R_i$  beträgt

$$\frac{\Delta t_1}{t_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{t_2}{R_i \cdot C}. \quad (134)$$

In der praktischen Ausführung werden die Batterien durch Netzanschlußgeräte ersetzt und die Spannungen über Gleichhalter konstant gehalten. Der Meßkreis hat hochwertige Bernstein-Isolation. Während der Meßpausen wird der Kondensator  $C$  geerdet, damit er zu Beginn der Messung keine Ladung aufweist. Mit der Einrichtung können Zeiten bis herab zu  $10^{-6}$  s mit einer Genauigkeit von  $\pm 10\%$  gemessen werden. Das Übersetzungsverhältnis  $\ddot{u}$  läßt sich bis auf  $10^8$  steigern.

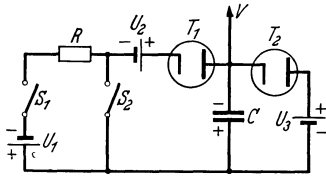


Abb. 283. Zeittransformator.

$S_1, S_2$  Schalter;  $U_1$  Hauptspannung;  
 $U_2$  Gegenspannung;  $U_3$  Hilfsspannung;  
 $C$  Meßkondensator;  $T_1, T_2$  Ventilrohr;  
 $V$  Verstärkeranschluß.

#### 4. Zeitwaagen [45].

Für die Untersuchung und Schnellregelung von Uhren kamen unter verschiedenen Handelsnamen elektrische Geräte auf den Markt, bei denen der Unterschied zwischen der Schlagfrequenz der zu prüfenden Uhr und einer Normalfrequenz zur unmittelbaren Anzeige des Uhrenanges dient. Sofern diese Geräte zur Schnellregelung verwendet werden, setzen sie gleichmäßigen Gang der Prüfuhr voraus, da die Gangschwankungen zwischen Vollaufzug und Ablauf der Feder bei einer Kurzprüfung nicht erkannt werden können, andererseits gestatten sie erstmalig, den augenblicklichen Gang einer Uhr festzustellen. Neben einer ganzen Reihe stroboskopischer, akustischer und elektronenoptischer Verfahren, die nur zur Gangregulierung verwendet werden, haben deshalb die schreibenden Ausführungen, mit denen der Gesamt- ablauf eines Uhrwerks überwacht werden kann, erhöhte Bedeutung für die Entwicklung und Prüfung von Uhrwerken.

Akustische Zeitwaagen. Die einfachsten Zeitwaagen beruhen auf einem akustischen Vergleich der Schlagzahl der X-Uhr mit einer

Normalfrequenz gleicher Größe. Wegen des leisen Ganges kleiner Uhren benötigen sie Verstärker, die verzerrungsfrei arbeiten müssen, sofern aus dem Klang des Uhrenschlages Schlüsse auf die Güte der Uhr gezogen werden sollen. Bei der Ausführung der Bell Telephone Mfg. Co. wird das Metallgehäuse der Uhr als der eine Belag eines Kondensatormikrophons benutzt und durch ein Stück dünnes Kondensatorpapier von einer ungefähr gleich großen festen Metallplatte getrennt. Durch die kleinen Bewegungen des Uhrengehäuses beim Schlag treten Kapazitäts- und somit Spannungsschwankungen auf; die nach entsprechender Verstärkung auf einen Kopfhörer übertragen werden. Die Uhr wird durch eine Feder mit Gummipuffer gehalten und kann in jede Gebrauchslage gedreht werden (Abb. 284). Die Gegenelektrode ist in Isolierstoff eingebettet, unmittelbar unter ihr liegt das erste Verstärkerrohr, um Streukapazität und Störspiegel klein zu halten. Ein guter Isolationszustand ist für ein einwandfreies Arbeiten der Anlage unerlässlich, da zu kleine Isolation die Empfindlichkeit mindert und Isolationsschwankungen Störgeräusche verursachen. Eine Schwammgummi - Unterlage hält die Gebäudeerschütterungen fern.

Durch Verdoppelung der Einrichtung und durch Benutzung einer Normaluhr ist man in der Lage, das Gerät, das ursprünglich nur zur Verstärkung des Uhrenschlages gedacht war, zur Schnellregelung von Uhren zu verwenden. Die Schläge der X- und der N-Uhr werden durch Verstärkungsregelung auf gleiche Lautstärke gebracht und gleichzeitig abgehört. Mit dem Apparat lassen sich bereits sehr kleine Schlagdifferenzen feststellen; eine genaue Eichung erfolgt durch Messen der Zeit zwischen zwei Koinzidenzen.



Abb. 284. Akustische Zeitwaage amerikanischen Ursprungs (Bell Telephone Laboratories).  
(Aus Arch. techn. Messen J 154—9.)

- 1 Mikrophon; 2 Dielektrikum; 3 Isolierstoffplatte;  
4 Gehäuse für das erste Verstärkerrohr; 5 Schwenkeinrichtung; 6 Verstärker; 7 Lautstärkeregler.

Stroboskopische Zeitwaagen. Bei diesen Einrichtungen wird entweder ein stroboskopisches Bild durch Ändern der Normalfrequenz zum Stillstand gebracht oder der in einer bestimmten Zeit zurückgelegte Weg gemessen.

Das Zeitmikroskop (Abb. 285) ist eine amerikanische Einrichtung der zweiten Art, bei der von einem Normalfrequenzgenerator ein Synchronmotor 2 mit 5 U/s betrieben wird. Auf die Motorachse ist ein unter  $45^\circ$  geneigter Spiegel 4 aufgekittet, auf dem über die Sammellinse 5

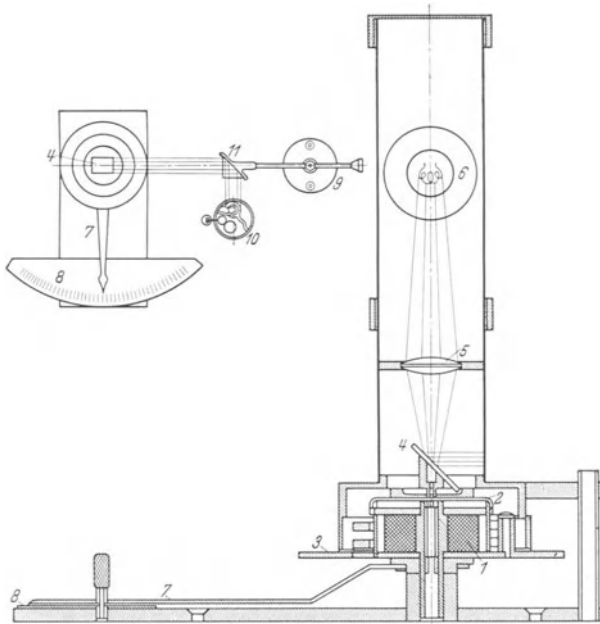


Abb. 285. Zeitmikroskop. (Aus Arch. techn. Messen J 154—9.)

1 Motorständer; 2 Motorläufer; 3 Rutschkupplung; 4 Spiegel; 5 Sammellinse; 6 Lichtquelle; 7 Zeiger; 8 Skala; 9 Schwenkeinrichtung; 10 Uhr; 11 Prisma.

ein Bild der Lampe 6 entworfen wird und der über das Prisma 11 Lichtblitze auf die zu untersuchende Uhr 10 wirft. Das Prisma ist schwenkbar, so daß die Uhr in alle Gebrauchslagen gebracht werden kann. Durch Verdrehen des Motorständers 1 mit der Rutschkupplung 3 wird die Phase der Lichtblitze so eingestellt, daß der Unruhearm im Augenblick seiner größten Geschwindigkeit in beiden Durchgangsrichtungen beleuchtet wird und ein einziges stroboskopisches Bild entsteht. Bei jedem Gangunterschied zwischen den Lichtblitzen und der Unruhe beginnt das eingestellte Bild zunächst unruhig zu werden und zu flackern, dann zerfällt es in zwei Bilder, die sich nach entgegengesetzten Richtungen von der Ursprungslage fortzubewegen scheinen. Nach einer Beobachtungszeit von 1 min werden die Bilder durch Neueinstellung der

Beleuchtungsphase mit dem Zeiger 7 wieder zur Deckung gebracht und an der Skala 8 der Gang der Uhr unmittelbar abgelesen. Die kleinste ablesbare Zeigerverdrehung von  $\frac{1}{4}^\circ$  entspricht einer Gangabweichung von  $\frac{1}{5}$  s/d. Diese Phasenabweichung zwischen Unruheschwingung und Lichtblitz ruft bereits ein merkliches Flackern des stroboskopischen Bildes hervor. Die Genauigkeit der Einrichtung ist natürlich in erster Linie durch die Frequenzgenauigkeit der Lichtblitze bedingt, und es wurde deshalb ein besonderer Frequenzgenerator entwickelt, bestehend aus einer Pendeluhr mit einer Ganggenauigkeit von einigen Hundertstel s/d, die mit einer Kontakteinrichtung in Abständen von 1 s Stromstöße auf ein  $\frac{1}{5}$  s-Pendel gibt. Das  $\frac{1}{5}$  s-Pendel seinerseits trägt einen Quecksilber-Kontakt und erregt eine 60 Hz-Stimmgabel, deren Zinken eine feste Spulenordnung gegenübersteht. Die induzierte 60 Hz-Spannung wird verstärkt und treibt den Synchronmotor des Stroboskops.

Zeitwaagen mit Elektronenoszillograph. Eine Einrichtung dieser Art wird von der Bell Telephone Mfg. Co. geliefert. Die Normalfrequenz wird für die Zeitablenkung des Elektronenstrahles benutzt, während der Schlag der zu untersuchenden Uhr durch ein Mikrophon in niederfrequente Impulse umgewandelt wird und eine Auslenkung des Kathodenstrahles entsprechend dem Uhrengeräusch hervorruft. Bei Synchronismus zwischen Uhrenschlag und Normalfrequenz erscheint das Bild des Uhrenschlages stets an derselben Stelle des Bildschirmes. Bei Gangdifferenzen wandert das Bild und es kann aus der Wanderungsgeschwindigkeit auf die Gangabweichung geschlossen werden. Eine vollkommen gleiche Einrichtung wurde von R. TAMM bei der Siemens & Halske AG. entwickelt, erschien jedoch nicht auf dem Markt, da in Deutschland die schreibende Zeitwaage bevorzugt wird. Bei einer anderen Ausführung wird die sinusförmige Normalfrequenz einem ersten Paar von Ablenkplatten unmittelbar, einem zweiten dazu senkrechten Paar Ablenkplatten über eine  $90^\circ$ -Schaltung zugeführt. Es entsteht also ein ablenkendes Drehfeld und der Kathodenstrahl beschreibt einen Kreis, dessen Durchmesser durch die Amplitude der Normalfrequenz gegeben ist und auf einen Normalwert eingeregelt werden kann. Der verstärkte Uhrenschlag wird einer Ringelektrode zugeführt und ruft eine radiale Auslenkung des Kathodenstrahles hervor. Die Wanderung dieser Auslenkung ist wieder ein Maß für den Uhrengang. Bei einer Normalfrequenz von 330 Hz macht der Kathodenstrahl in 1 s 330 volle Umläufe, legt also einen Winkel von  $118800^\circ$  zurück. Eine Gangabweichung von 1 s/d bedeutet in 30 s eine Abweichung von  $\frac{1}{2380}$  s. Das Bild des Uhrenschlages erscheint demnach nach 30 s an einer um  $41^\circ$  entfernten Stelle. Man erhält also bereits bei 330 Hz Normalfrequenz und sehr kurzer Prüfzeit eine ganz außerordentliche Anzeigegenauigkeit und kann sie durch Erhöhung der Frequenz oder der Beobachtungszeit nahezu beliebig steigern.

**Schreibende Zeitwaagen.** Der Watch Rate Recorder der Bell Telephone Mfg. Co. vergleicht die Frequenz des Uhrenschlages mit der Normalfrequenz einer 300 Hz-Stimmgabel. Die Stimmgabel ist aus einer Sonderlegierung hergestellt und wird in einem Thermostat auf gleich-

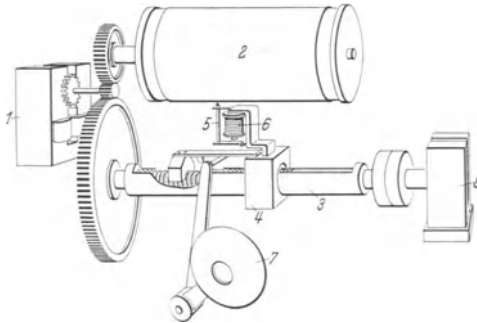
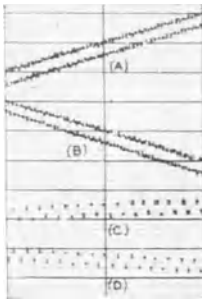


Abb. 286. Vereinfachte Darstellung der Schreibeinrichtung des Watch-Rate Recorders. (Aus Arch. techn. Messen J 154—9.)

1 Synchronmotor; 2 Schreibtrommel; 3 Leitspindel; 4 Führungsschlitten; 5 Schreibstift; 6 Elektromagnet; 7 Einschalt- und Rückstellhebel; 8 Asynchronmotor.

bleibender Temperatur gehalten. Der Verstärker liefert sowohl die Erregerleistung für die Stimmgabel, als auch die Leistung für einen im Aufnahmegerät sitzenden Synchronmotor. Die Genauigkeitstoleranz des Frequenzgenerators ist 1 : 100 000, entsprechend einem Gangfehler von 0,86 s/d. Der mit der Normalfrequenz laufende Synchronmotor 1 in Abb. 286 treibt einerseits eine Schreibtrommel 2 mit 5 Umläufen/s an, andererseits über ein Wechselgetriebe eine Leitspindel 3, auf der sich ein Führungsschlitten 4 mit einem Schreibstift 5 und einem Elektromagnet 6 parallel zu einer Mantellinie der Trommel bewegt. Die Geschwindigkeit

seits über ein Wechselgetriebe eine Leitspindel 3, auf der sich ein Führungsschlitten 4 mit einem Schreibstift 5 und einem Elektromagnet 6 parallel zu einer Mantellinie der Trommel bewegt. Die Geschwindigkeit



Kurve	Registrierdauer	Maßstab: 1 Teilstrich entspricht	Genauigkeit	Gangfehler der X-Uhr
A	30 s	5 s/d	2 s/d	+ 60 s
B	30 s	5 s/d	2 s/d	- 60 s
C	5 s	30 s/d	15 s/d	+ 60 s
D	5 s	30 s/d	15 s/d	- 60 s

Die Uhr hinkt (d. h. die Zeitdauer zwischen Tick-Tack stimmt nicht überein mit der Zeitdauer zwischen Tack-Tick) und es entsteht eine Doppelkurve, von der für die Auswertung nur eine berücksichtigt zu werden braucht.

Abb. 287. Diagramm des Watch-Rate Recorders. (Aus Arch. techn. Messen J 154—8.)

des Schreibschlittens kann mit dem Wechselgetriebe zu 5 oder 30 s für die ganze Papierbreite gewählt werden; sobald er seine rechte Endstellung erreicht, schaltet er den Synchronmotor ab. Mit dem Hebel 7 wird der Schreibschlitten in die linke Ausgangslage zurückgebracht und gleichzeitig der nicht selbstanlaufende Synchronmotor 1 durch den Asynchronmotor 8 wieder angeworfen. Bei jedem Ticken der Uhr erhält nun der Elektromagnet einen Stromstoß und schlägt den Schreibhebel kurzzeitig auf die umlaufende Trommel, wo er mittels

eines zwischengelegten Farbbandes einen Punkt hinterläßt. Bei richtiggehender Uhr bilden diese Punkte eine waagerechte Gerade; Gangabweichungen drücken sich durch Neigung der Geraden nach oben oder unten aus (Abb. 287).

Für die Umwandlung der Uhrschläge in die Stromstöße des Elektromagnets wird ein Tonabnehmer mit Verstärker verwendet, der in Abb. 288 gezeigt ist. Von der Einspannvorrichtung 3 wird der Körperschall durch einen steifen Draht 4 auf das elektromagnetische Mikrofon übertragen, das in einem schweren, gummigelagerten Bleigehäuse 5 untergebracht ist, um Raumgeräusche und Gebäudeerschütterungen abzuhalten. Ein Permalloy-Schirm schützt die zu prüfende Uhr vor dem Feld der Tonabnehmer-Magnete. Der

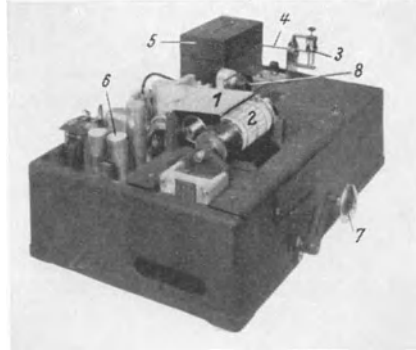


Abb. 288. Aufnahmegerät und Verstärker des Watch-Rate Recorders. (Aus Arch. techn. Messen J 154—9.)  
 1 Abreibvorrichtung; 2 Schreibtrommel; 3 Uhrhalter; 4 Übertragungsglied; 5 Mikrophonegehäuse; 6 Verstärker; 7 Einschalthebel; 8 Empfindlichkeitsregler.

Uhrenhalter läßt sich in alle Gebrauchslagen schwenken. Größere Uhren, die sich nicht einspannen lassen, werden durch einen steifen Draht mit dem Mikrofon verbunden. Der Draht überträgt die Körpergeräusche vollkommen hinreichend, um nach zweistufiger Verstärkung ein Ionenrohr auszusteuern, an dessen Ausgang der Elektromagnet der Schreibvorrichtung liegt (Abb. 289). Solange keine Uhr auf dem Mikrofon liegt, führt der Ausgangskreis des Ionenrohrs Kipp-schwingungen in  $\frac{1}{3}$  s-Takt aus. Durch die ver-

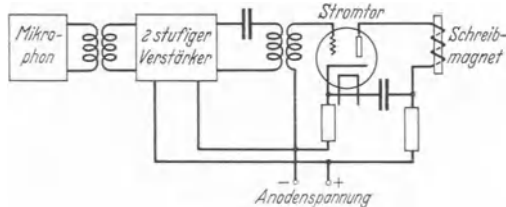


Abb. 289. Grundschialtung des Verstärkers zum Watch-Rate Recorder. (Aus Arch. techn. Messen J 154—8.)

stärkten Mikrophonströme ändert sich dieser Takt auf  $\frac{1}{5}$  s. Damit ist ein einfaches Mittel zur Einstellung des Verstärkergrades auf die Lautstärke der X-Uhr gegeben. Wenn nach dem Auflegen der Uhr auf das Mikrofon der  $\frac{1}{3}$  s-Takt noch aufrechterhalten bleibt, was durch die Schläge des Schreibstiftes oder einen ansteckbaren Kopfhörer leicht feststellbar ist, muß die Verstärkung vergrößert werden. Der Papiervorrat liegt im Inneren der Schreibtrommel 2, die Diagramme werden mit der über der Trommel sichtbaren Abreibvorrichtung 1 abgenommen. Der Trommelumfang ist 152 mm, die Papiergeschwindigkeit 760 mm/s.

Daraus errechnet sich die Ablesegenauigkeit für die Grobjustierung von 5 s Dauer zu 15 s/d, für die Feinjustierung von 30 s Dauer zu 2 s/d, und ein Teilstrich des Diagramms entspricht bei 5 s Schreibdauer 30 s/d, bei 30 s Schreibdauer 5 s/d. Das Gerät ist zunächst für Uhren mit 5 Schlägen/s bestimmt; es können jedoch auch Uhrwerke mit anderen Schlagzahlen untersucht werden, nur erhält man dann auch bei richtigem Gang eine geneigte Gerade. Zur Auswertung solcher Diagramme (Abb. 290) wird von der Herstellerfirma eine Korrekturtabelle mitgegeben; zweckmäßig erfolgt die Ablesung mit einem durchsichtigen Ableselineal, auf dem die Neigung der Geraden bei richtigem Gang angegeben ist. Die Gangfehler drücken sich als Abweichungen von diesen Geraden aus und können ebenso, wie bei einer Uhr mit  $\frac{1}{5}$  s-Schlag, unmittelbar abgelesen werden.



Abb. 290.

Diagramm einer richtiggehenden Uhr mit 20944 Schlägen/h, aufgenommen mit dem Watch-Rate Recorder. (Aus Arch. techn. Messen J 154-9.)

Wenn die Punktreihen weniger stark nach unten oder nach oben geneigt sind, geht die Uhr vor, wenn sie stärker nach unten geneigt sind, geht sie nach.

Der Printing Watch Timer von Gibbs hat eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Watch-Rate Recorder und vergleicht wie dieser die Schlagfrequenz der Uhr mit einer Normalfrequenz. Im einzelnen sind jedoch Unterschiede vorhanden, insbesondere erfolgt die Aufzeichnung auf einem ablaufenden Papierstreifen und die Beobachtungszeit kann beliebig gewählt werden. Es besteht also die Möglichkeit, den Gesamtlauf der Uhr aufzuzeichnen.

Der Frequenzgenerator ist eine Quarzuhr mit Frequenzteiler und Kraftverstärker, der an ein 60 Hz-Wechselstromnetz angeschlossen wird und zweckmäßig dauernd eingeschaltet bleibt.

Das Mikrophon ist piezoelektrisch und besteht im wesentlichen aus zwei dünnen quadratischen Platten aus Rochelle-Salz, die an drei Ecken festgelagert sind, während auf die vierte Ecke die Schwingungen des Uhrgehäuses über eine Blattfeder und einen Metallstift übertragen werden. Das Mikrophongehäuse ist nur vom Taststift durchbrochen und gewährt vollkommenen Schutz gegen äußere mechanische, akustische und elektrische Schwingungen. Bei jedem Uhrenschlag tritt eine leichte Verbiegung des Kristalls und eine Ladungsänderung auf, die nach entsprechender Verstärkung ein Ionenrohr steuert und eine Kondensatorentladung auslöst, mit der 2 Elektromagnete (9 in Abb. 291) kurzzeitig erregt werden und den Druckbügel 3 mittels der Zugstange 4 leicht durchbiegen.

Der Antrieb des Registriergerätes erfolgt durch den an der Normalfrequenz liegenden Synchronmotor 11 von etwa 10 W Leistung. Die Ausgangswelle dieses Motors macht 5 U/s und trägt zwei Druckscheiben

mit elf bzw. zwölf Zähnen, die durch Verschieben auf der Achse wahlweise in Druckstellung gebracht werden können. Die Druckscheiben laufen unterhalb des Papiers und quer zu seiner Vorschubrichtung. Die Papierbahn 1 wird an dieser Stelle durch ein Führungsblech entsprechend dem Radius der Druckscheiben gekrümmt. Schräg über die Papierbahn führt ein in beiden Richtungen umschaltbares Farbband 5 und über diesem liegt der von dem Elektromagnet 9 betätigte Druckbügel 3. Der Abstand zwischen Druckscheibe, Papierbahn, Farbband und Druckbügel ist außerordentlich klein. Die Farbbandrollen 6 und die Papier-

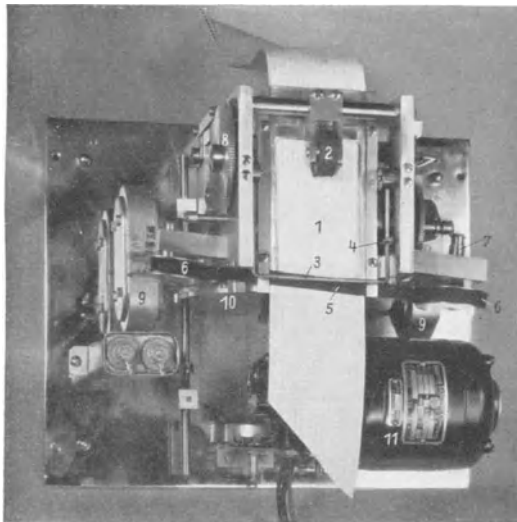


Abb. 291. Printing Watch-Timer. (Aus Arch. techn. Messen J 154—9.)

1 Diagrammstreifen; 2 Papiertransportrolle; 3 Druckbügel; 4 Antrieb für den Druckbügel;  
5 Farbband; 6 Farbbandrolle; 7 Farbbandantrieb; 8 Papierantrieb; 9 Elektromagnet  
für Druckbügel-Betätigung; 10 Druckräder; 11 Synchronmotor.

transportrolle 2 werden über die Zahnräder 7 und 8 gleichfalls von dem Synchronmotor angetrieben. Der Druckbügel preßt nun bei jedem Uhrschlag Farbband und Diagrammstreifen gegen einen Zahn der Druckscheibe, wodurch ein kurzer Querstrich auf dem Papier entsteht. Da die Länge des Druckstückes einer Zahnteilung entspricht, befindet sich in jedem Augenblick ein Zahn in Druckstellung unterhalb des Bügels. Nach dem Einschalten des Gerätes mit dem Hebel 8 in Abb. 292 wird zunächst die Spannung mit dem Voltmeter 7 und dem Drehregler 10 auf den richtigen Wert gebracht, dann die X-Uhr auf das Mikrophon gelegt und die Verstärkung mit dem Drehknopf 9 so eingestellt, daß saubere Striche geschrieben werden. Danach wird der Papiervorschub eingeschaltet. Die Druckscheibe macht 5 Umdrehungen und die Uhr 5 Schläge in 1 s. Es kommt also stets derselbe Zahn zum Drucken.



Der Augenblick des Druckens und damit die Lage der Schreibmarke auf dem Papier hängen jedoch vom Gang der Uhr ab. Bei richtiggehender Uhr drückt der Zahn stets an derselben Stelle der Papierbreite und das entstehende Strichdiagramm verläuft parallel zum Papierrand. Bei falschgehender Uhr laufen die Druckspuren schräg über das Papier (Abb. 293). Der Abstand zweier Schreibmarken entspricht  $\frac{1}{5}$  s, und der Papiervorschub ist zu 2,54 mm/s gewählt. Der Diagrammstreifen hat Querlinien in Abständen von 38 mm und eine Längslinierung in Abständen von 3,18 mm. Die Zeit zwischen zwei Querlinien entspricht

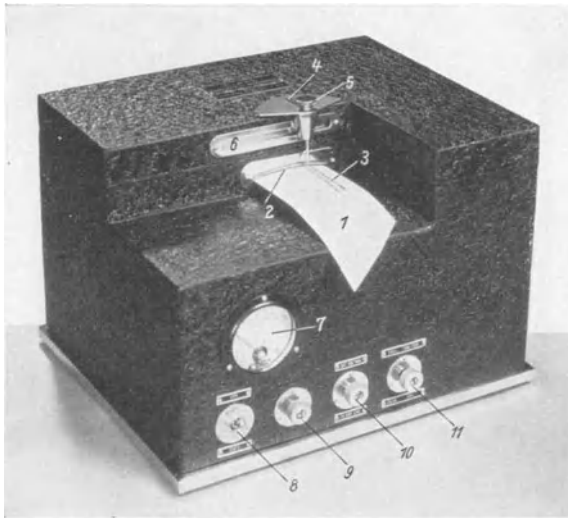


Abb. 292. Ansicht des Printing Watch-Timer. (Aus Arch. techn. Messen J 154—9.)

1 Diagrammstreifen; 2 Abreibblech; 3 Ableseineal; 4 Ableseskala; 5 Drehknopf für das Ableseineal; 6 Schlittenführung für das Ableseineal; 7 Spannungsmesser; 8 Einschalter; 9 Verstärkungsregler; 10 Spannungsregler; 11 Umschalter für verschiedene Schlagzahlen (300...330 und 360 Schläge je Minute).

15 s, zwischen zwei Längsstrichen 1,39 ms. Überschreitet also das Diagramm innerhalb einer Querteilung eine Längsteilung, so entspricht dies einem Gangfehler der Uhr von  $8 \text{ s/d}$  oder allgemein, wenn  $a$  die Zahl der gekreuzten Querteilungen und  $b$  die Zahl der gekreuzten Längsteilungen ist, beträgt der Gangfehler der Uhr  $f = 8 \cdot \frac{b}{a} \text{ s/d}$ . Man hat es also durch Verlängerung der Beobachtungszeit in der Hand, die Ablesegenauigkeit beliebig zu steigern, im allgemeinen werden jedoch 15...30 s ausreichend sein. Das Diagramm kann unmittelbar nach der Aufnahme an dem Abreibblech 2 abgerissen und der geprüften Uhr beigefügt werden. Ohne Rechnung, jedoch weniger genau, läßt sich der Uhrgang an der Ableseeinrichtung 3 ermitteln. Dazu setzt man den

Papiervorschub still und bringt das Ableselineal 3 durch Verschieben in der Schlittenführung 6 und Drehen des Knopfes 5 mit dem Diagramm zur Deckung. Der Uhrengang wird dann an der Skala 4 unmittelbar in  $s/d$  abgelesen. Uhren mit ungleichem Schlag ergeben ebenso wie beim Watch-Rate-Recorder eine Doppel-Aufzeichnung, ohne daß dadurch eine Genauigkeitseinbuße auftritt. Gangwerke mit  $5\frac{1}{2}$  Schlägen/s werden gleichfalls mit der 11zähligen Druckscheibe aufgenommen, bei Uhren mit 6 Schlägen in der Sekunde wird mit dem Knopf 11 das zweite 12zählige Druckrad unter den Druckbügel gebracht.

Bei der Siemens-Zeitwaage wird die Normalfrequenz von 5 Imp/s von einer Normaluhr mit mechanischer Kontakteinrichtung oder von einem  $\frac{1}{5}$  s-Pendel gegeben. Die Schläge der X-Uhr werden mit einem Mikrophon abgenommen. Nach entsprechender Verstärkung schalten die Impulse der Normaluhr ein Ionenrohr ein, die Impulse der X-Uhr löschen es wieder. Bei völligem Gleichlauf beider Uhren ist die Zeit zwischen Ein- und Ausschalten konstant und der Verstärker gibt Stromstöße

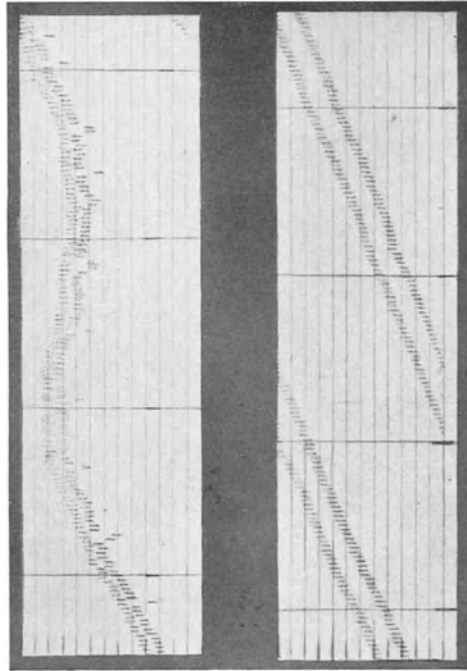


Abb. 293. Diagramm des Printing Watch-Timer. (Aus Arch. techn. Messen J 154—9.) Links Weckeruhr mit unregelmäßigem Gang, rechts Weckeruhr mit einer Fehlweisung von 40 s/d; beide Uhrwerke hinken.

gleicher Dauer und gleicher Höhe, deren arithmetischer Mittelwert von einem Drehspul-Schreiber als senkrechte Gerade aufgezeichnet wird. Bei verschiedenem Gang der beiden Uhren ändert sich die Dauer dieser Stromstöße, ihr arithmetischer Mittelwert ist also nicht mehr konstant und das Registriergerät schreibt eine schräge Gerade. Hat die Gangdifferenz zwischen den beiden Uhren 0,2 s erreicht, so fallen Ein- und Ausschaltimpuls zusammen und der Meßstrom wird Null, um sodann wieder langsam bis zu seinem höchsten Wert kurz vor der nächsten Koinzidenz anzuwachsen. Die Schreibfeder des Registrierapparates wandert also schräg über das Papier, um nach Erreichen der Endlage auf die Anfangslage zurückzuspringen. Jede volle Überschreibung des

Registrierpapiers entspricht einer Gangdifferenz von 0,2 s. Je nachdem ob die Vergleichsuhr vor- oder nachgeht, steigen die Ganggeraden nach links oder rechts an und aus ihrer Neigung oder aus der Zeitdifferenz zwischen zwei Koinzidenzen, also einer vollen Überschreibung kann der Uhrgang abgelesen werden. Die Einrichtung eignet sich für Dauerbeobachtung und Schnellregelung. Ihre Genauigkeit hängt lediglich von der Genauigkeit der Normalfrequenz und der Beobachtungsdauer ab.

Abb. 294 zeigt die vollständige Anlage. Die zu untersuchende Uhr wird mit leichtem Federdruck in das elektromagnetische Mikrofon 1

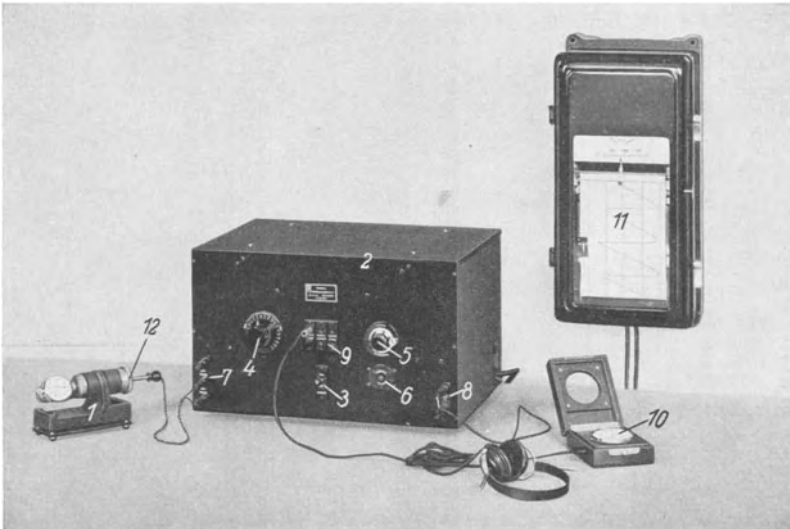


Abb. 294. Ansicht der Siemens-Zeitwaage.

1 Mikrofon; 2 Verstärker; 3 Umschalter für Gang- oder Schlagstärke-Registrierung; 4 Einstellung des Verstärkungsgrades; 5 Nulleinstellung für die Lautstärke-Registrierung; 6 Nulleinstellung des Schreibers; 7 Anschlüsse für ein magnetisches oder ein Kohlemikrophon; 8 Anschluß für Normaluhr; 9 Anschlüsse für die Kopfhörer an Gang oder Lautstärke der Prüfuhr bzw. Gang der Normaluhr; 10 Normaluhr mit mechanischem Kontakt; 11 Schreibgerät; 12 Schwenkeinrichtung für die Prüfuhr.

eingesetzt, das an die Klemmen 7 des Verstärkers 2 angeschlossen wird. Außer diesen Klemmen ist noch eine weitere Anschlußklemme für ein Kohlemikrophon vorgesehen. Auf der anderen Seite des Verstärkers liegen die Klemmen 8 für eine Normaluhr mit mechanischem Kontakt oder ein  $\frac{1}{5}$  s-Pendel. Mit dem Drehknopf 4 kann der Verstärkungsgrad für die Impulse der X-Uhr gewählt werden. Gleichzeitig kann man den Schlag der X- oder N-Uhr durch Einstecken in das linke oder rechte Buchsenfeld des Verteilers 9 abhören. Der Nullpunkt des Schreibers 11 wird mit der Schraube 6 eingeregelt. Das Gerät kann entweder zur Ganganzeige oder zur Aufzeichnung der Schlagstärke durch Umschalten des Kippschalters 3 verwendet werden. Die Lautstärke-registrierung hat den Zweck, die Schlagstärke, also das Drehmoment

der Uhr während des Ablaufes zu verfolgen. Der Nullpunkt der Lautstärkeregistrierung wird mit dem Drehknopf 5 eingeregelt.

Eine Ansicht des Schreibers mit dem Diagramm einer regelmäßig, aber stark nachgehenden Uhr zeigt Abb. 295. Der Schreiber enthält einen

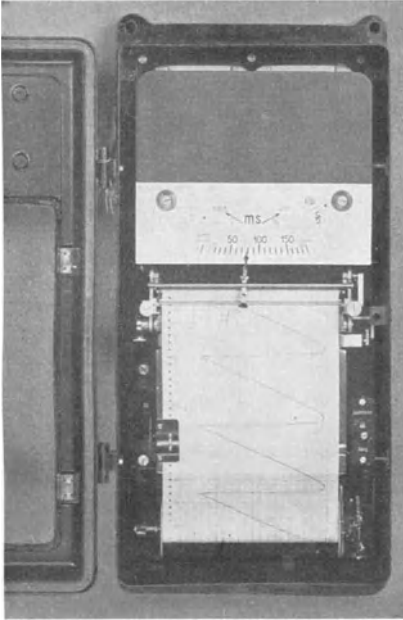


Abb. 295. Schreibgerät der Siemens-Zeitwaage.

Abb. 296. Diagramm der Siemens-Zeitwaage.

(Aus Arch. techn. Messen J 154—7.)

Sehr billige deutsche Taschenuhr (3.— RM), Zifferblatt oben. Geht von 1...4 Umdr. des Kronenrads nach, bei 5 wechselt sie die Gangrichtung, für den übrigen Teil der Laufzeit geht sie ziemlich regelmäßig 100...200 s/d vor. Der Schlag ist im allgemeinen unsauber und kratzend. Bei 7 ist er am reinsten, in Übereinstimmung mit dem Diagramm. Ab 15 Umdr. werden die Nebengeräusche stärker. Prellen tritt nicht ein.

Kippschalter, mit dem er auf Gang- oder Lautstärke - Aufzeichnung umgeschaltet werden kann. Abb. 296 zeigt das mit der Siemens-Zeitwaage aufgenommene Diagramm des vollständigen Ablaufs einer sehr billigen Taschenuhr. Die Zahlen am linken Bildrand bezeichnen den Aufzugszustand. Die Uhr geht vom Vollaufzug bei 20 Kronenrad-Umdrehungen bis etwa 7 Kronenrad-Umdrehungen ziemlich regelmäßig 100...200 s am Tag vor. Zwischen 6 und  $4\frac{1}{2}$  Kronenrad-Umdrehungen kehrt sich der Gang mehrfach um und während des letzten Teiles des Ablaufes geht sie stark nach.

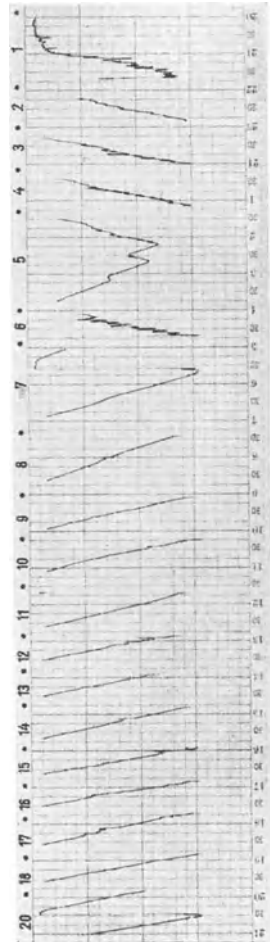


Abb. 296.

## Schrifttum.

[1] *Röhrenregler*. ASHWORTH, J. A. u. J. C. MOUZON: A voltage stabilizer circuit. Rev. sci. Instrum. Bd. 6 (1937) S. 127—129. — BERTHOLD, R. G. u. A. v. ENGEL: Neuere Entwicklung der Elektronenröhren-Feinregler und ihre Anwendungen. Siemens-Z. Bd. 14 (1934) S. 214—222. — BERTHOLD, R. G.: Spannungsfineinregelung von Maschinen mit Elektronenröhren. Arch. techn. Messen J 062—1. — BORDEN, P. A. u. M. F. BEHAR: Automatic control of voltage and current. Instruments Pittsb. Pa. Bd. 9 (1936) S. 201—210, 235—238, 259—262. — GULLIKSEN, F. H.: Electronic regulator for a.c.-generators. Electr. Engng. Bd. 53 (1934) S. 877—881. — HAUKE, H.: Röhrenregler für Zählereichstationen. ETZ Bd. 57 (1936) S. 873—876. — HUNT, F. V. u. R. W. HICKMAN: On electronic voltage stabilizers. Rev. sci. Instrum. Bd. 10 (1939) S. 6—21. — KELLER, F.: Röhrengesteuerte Spannungsgleichhalter-Einrichtung. AEG-Mitt. 1936, S. 329—333. — MEHLHORN, H.: Die Stromversorgung von Zählereichanlagen mit konstanter Spannung. Siemens-Z. Bd. 12 (1932) S. 428 bis 434.

[2] *Magnetische Konstanthalter*. GEYGER, W.: Selbsttätige Strom- und Spannungsregler, Beschreibung und Eigenschaften der elektromagnetischen Verfahren. Arch. techn. Messen J 062—7/8. — GEYGER, W.: Elektromagnetische Spannungsgleichhalter für Meßzwecke. Siemens-Z. Bd. 15 (1935) S. 464—467. — GREINER, R.: Über einen magnetischen Netzspannungs-Gleichhalter. ETZ Bd. 57 (1936) S. 489 bis 491.

[3] *Glimmlampen-Konstanthalter*. GOCKEL, H.: Über die Spannungskonstanz von Stabilovoltröhren bei Dauerbelastung. Phys. Z. Bd. 38 (1937) S. 65—67. — KÖRÖS, L.: Glimmstrecken-Spannungsteiler für Netzanschluß der Anoden- und Gitterspannungen. ETZ Bd. 50 (1929) S. 786—788. — KÖRÖS, L. u. R. SEIDELBACH: Die Grundlagen der durch Glimmteiler stabilisierten Stromquellen. Arch. Elektrotechn. Bd. 26 (1932) S. 539—552. — MORTON, C.: The application of the gaseous discharge tube to problems of voltage regulation. J. sci. Instrum. Bd. 14 (1937) S. 161—164. — *Stabilovolt G.m.b.H.*: Glimmteileröhre „Stabilisator“ für selbsttätige Spannungsregelung. Arch. techn. Messen J 062—9.

[4] *Thermische Konstanthalter*. GEYGER, W.: Selbsttätige Strom- und Spannungsregler, Thermische Verfahren. Arch. techn. Messen J 062—6. — Selbsttätige Konstanthaltung von Meßspannungen mit gewöhnlichen Metalldraht-Glühlampen. Arch. Elektrotechn. Bd. 28 (1934) S. 270—273.

[5] *Photoelektrische Konstanthalter*. *Anonym*: High-speed automatic potentiometer. Instruments Bd. 8 (1935) S. 343. — GILBERT, R. W.: A potentiometric d. c. amplifier and its applications. Proc. Inst. Radio Engrs., N. Y. Bd. 24 (1936) S. 1239—1246. — Practical standardization of power sources for instrument calibration. Instruments Bd. 11 (1938) S. 111—114.

[6] *Kohleldruckregler*. HOFFMANN, F.: Kohleldruckwiderstände. ETZ Bd. 58 (1937) S. 1111—1115, 1138—1142. — SCHAD: Wirkungsweise und Verwendung des Kohleldruckreglers. Helios, Lpz. Bd. 39 (1933) S. 405—406.

[7] *Kreuzspul-Meßgeräte*. BLAMBERG, E.: Einiges über die Summierung mit Kreuzspul-Ohmmetern. Arch. Elektrotechn. Bd. 24 (1930) S. 21—28. — Kreuzspul-Instrumente. Arch. techn. Messen J 726—2. — DALLMANN, H.: Die Anpassung von Quotienten-Meßgeräten. Arch. Elektrotechn. Bd. 28 (1934) S. 265—269. —

Grüss, H.: Eine neue Form von Kreuzspul-Instrumenten. *Wiss. Veröff. Siemens-Werk* Bd. 10 (1931) S. 137—152. — Elektrische Quotienten-Meßgeräte. *Meßtechn.* Bd. 9 (1933) S. 233—238. — KEINATH, G.: Die Technik elektrischer Meßgeräte, 3. Aufl., Bd. 1, S. 350. München: Oldenbourg 1928. — LORENZ, J.: Kreuzspul-Instrumente. *Arch. techn. Messen* J 726—3 (1939). — PALM, A.: Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen, S. 36—39. Berlin: Julius Springer 1937.

[8] *Spannungsunabhängige Dynamometer*. BLAMBERG, E.: Über ein neues eisen-geschlossenes Elektrodynamometer ohne mechanische Richtkraft für Wechselstrom und dessen verschiedene Verwendungsmöglichkeiten. *Arch. Elektrotechn.* Bd. 17 (1926) S. 281—315. — BOEKELS, H. u. F. W. MÜLLER: Hochempfindliche Zeigerfrequenzmesser. *ETZ* Bd. 57 (1936) S. 1259—1261. — DUBUSC, M. R.: Un nouveau fréquencesmètre enregistreur électrodynamique de haute précision. *Bull. Soc. franç. Electr.* Bd. 6 (1936) S. 845—854. — KAFKA, H.: Über elektrische Meßinstrumente für Wechselstrom mit elektromagnetischem Richtmoment. *Elektrotechn. u. Masch.-Bau* Bd. 42 (1924) S. 1—5. — PALM, A.: Elektrische Meßgeräte und Meßeinrichtungen, S. 61—71. Berlin: Julius Springer 1937. — TÄUBER-GRETLER, A.: Ein Beitrag zur Messung der Wicklungstemperatur an elektrischen Maschinen und Apparaten. *Bull. schweiz. elektrotechn. Ver.* Bd. 13 (1922) S. 225—236.

[9] *Dreheisen-Quotientenmesser*. GEYGER, W.: Dreheisen-Quotientenmesser. *Arch. techn. Messen* J 733—2. — Ein neuer Dreheisen-Quotientenmesser für Wechselstrom und seine Verwendung in wärmetechnischen Überwachungsanlagen. *Arch. Elektrotechn.* Bd. 25 (1931) S. 1—16. — Neue Anwendungen des Ringeisen-Quotientenmessers. *Arch. Elektrotechn.* Bd. 25 (1931) S. 655—658. — JOENS, W. H.: Ringeisen-Quotientenmesser. *Arch. techn. Messen* J 733—3. — KEINATH, G.: Dreheisen-Quotientenmesser. *Arch. techn. Messen* J 733—1.

[10] *Auflösungsvermögen*. HOFMANN, W.: Dämpfung von Meßgeräten. *Arch. techn. Messen* J 014—1, 5 usw. — HOFMANN, W. u. P. M. PFLIER: Der Siemens-Störungsschreiber. *Siemens-Z.* Bd. 11 (1931) S. 325—333. — PFLIER, P. M.: Betriebs-Meßgeräte. *Siemens-Z.* Bd. 18 (1938) S. 1—7. — ZÖLLICH, H.: Aufzeichnung schnellveränderlicher Vorgänge. *Arch. techn. Messen* V 365—1—7. — Dämpfungsbeflussung. *Arch. techn. Messen* J 014—6.

[11] *Übertragungsentfernung*. PFLIER, P. M.: Begrenzung der Übertragungsentfernung durch den Leitungswiderstand. *Arch. techn. Messen* V 381—1. — SCHLEICHER, M.: Die elektrische Fernüberwachung und Fernbedienung für Starkstrom-Anlagen und Kraftbetriebe. Berlin: Julius Springer 1932.

[12] *Ausführung von Rechenoperationen*. CAUER, W.: Elektrische Methoden und Maschinen zur Auflösung von Systemen linearer Gleichungen. *Elektr. Nachr.-Techn.* Bd. 12 (1935) S. 147—157. — GARDNER, G. F.: Simple mathematical operations performed by electrical instruments. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 37 (1934) S. 148—154. — GEYGER, W.: Summen- und Differenzbildung. *Arch. techn. Messen* J 0821—2. — HERR, D. L. u. R. S. GRAHAM: An electrical algebraic equation solver. *Rev. sci. Instrum.* Bd. 9 (1938) S. 310—315. — KRÖNERT, J.: Meßbrücken und Kompensatoren, Bd. 1, S. 127. München: Oldenbourg 1935. — Elektrische Rechenoperationen. *Arch. techn. Messen* J 0821—2. — LIENEWEG, F.: Darstellung von Parameterfunktionen mittels elektrischer Meßanordnungen. *Wiss. Veröff. Siemens-Werk* Bd. 15 (1936) H. 3, S. 92—108. — RECK, M.: Elektrisches Gerät zur selbsttätigen Auflösung von Gleichungen ersten und höheren Grades. *Arch. Elektrotechn.* Bd. 32 (1938) S. 190—197. — SEWIG, R.: Durchführung von Rechenaufgaben auf elektrischem Wege. *Z. Instrumentenkde.* Bd. 55 (1935) S. 34—36.

[13] *Elastischer Spannungszustand und spezifischer Widerstand*. GRÜNEISEN: Metallische Leitfähigkeit. GEYGER-SCHEEL, *Handbuch der Physik*, Bd. 13, S. 34. — KOHLRAUSCH: Elektrisches Widerstandsmanometer. *Lehrbuch der praktischen Physik*, 15. Aufl., S. 120. Leipzig: B. G. Teubner 1927.

[14] *Magnetoelastizität*. BECKER, R.: Zur Theorie der Magnetisierungskurve. Z. Phys. Bd. 62 (1930) S. 253—269. — BECKER, R. u. M. KERSTEN: Die Magnetisierung von Nickeldraht unter starkem Zug. Z. Phys. Bd. 64 (1930) S. 660—681. — KERSTEN, M.: Über die Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaften des Nickels von den elastischen Spannungen. Z. Phys. Bd. 71 (1931) S. 553—592. — MERZ, L. u. H. SCHARWÄCHTER: Magnetoelastische Druckmessung. Arch. techn. Messen V 132—15. — PFANNENMÜLLER, H.: Überblick über die Meßverfahren mit Gleichrichtern. Arch. Elektrotechn. Bd. 28 (1934) S. 356—384. — Zur Wirkungsweise schaltgesteuerter Gleichrichter. Wiss. Veröff. Siemens-Werk Bd. 13 (1934) S. 1—12. PREISACH, F.: Untersuchungen über den Barkhausen-Effekt. Ann. Phys., Lpz. Bd. 395 (1929) S. 737—799. — STEINHAUS, W.: Änderung der magnetischen Eigenschaften durch mechanische Eingriffe. GEIGER-SCHEEL: Handbuch der Physik, Bd. 15, S. 196. Berlin: Julius Springer 1927.

[15] *Röntgenverfahren*. BERTHOLD, R.: Grundlagen der technischen Röntgendurchstrahlung. Leipzig: Johann Ambrosius Barth 1930. — MÜLLER, E. A. W.: Fehlererkennbarkeit bei der technischen Röntgendurchstrahlung. Arch. techn. Messen V 9114—11 (Dez. 1939). — TROST, A.: Ionisationskammer und Zählrohr. T./Rö. 10/4—6. In BERTHOLD: Atlas der zerstörungsfreien Prüfverfahren. Leipzig: Johann Ambrosius Barth. 1938.

[16] *Magnete*. BETTERIDGE, W.: Nickel-Iron-Aluminium permanent-magnet alloys. Engineering Bd. 147 (1939) S. 632—634. — GEIGER-SCHEEL: Abhängigkeit der Magnetisierung von der Temperatur. Handbuch der Physik, Bd. 15, S. 189. Berlin: Julius Springer 1927. — KEINATH, G.: Elektrische Drehzahlmesser. Arch. techn. Messen J 162—1. — KÖSTER, W.: Dauermagnetwerkstoffe auf der Grundlage der Ausscheidungshärtung. Stahl u. Eisen Bd. 53 (1933) S. 849—856. — KUSSMANN, A.: Neue Werkstoffe für Dauermagnete. Z. VDI Bd. 79 (1935) S. 1171 bis 1173. — MESSKIN, W. S. u. B. SOMIN: Eigenschaften von Ni-Al-Magnetstahl. Arch. Eisenhüttenw. Bd. 8 (1935) S. 315—318. — WHIFFIN, A. C.: The effect of change of temperature on the strength of permanent magnets, with special reference to modern magnet steels. J. Instn. electr. Engrs. Bd. 81 (1937) S. 727—740. — WILLIAMS, C. S.: Permanent magnet materials. Electr. Engng. Bd. 55 (1936) S. 19—23.

[17] *Piezoelektrizität*. BAXTER, H. W.: Piezoelectricity. Electrician Bd. 113 (1934) S. 121—122. — FALKENHAGEN, H.: Pyro- und Piezoelektrizität. GEIGER-SCHEEL, Handbuch der Physik, Bd. 13, S. 291. Berlin: Julius Springer 1928. — HINZ, H.: Elastische Deformationen am Seignettesalz. Z. Phys. Bd. 111 (1939) S. 617—636. — KLUGE, J. u. H. E. LINCKH: Piezoelektrische Messungen von Druck- und Beschleunigungskräften. Z. VDI Bd. 73 (1929) S. 1311—1314. — Piezoelektrische Messung mechanischer Größen. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 2 (1931) S. 153. — Piezoelektrische Druckmessungen mit der Braunschen Röhre. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 4 (1933) S. 177—181. — LANGEVIN, A.: Utilisation du quartz piézoélectrique pour l'étude des pressions variables et des vibrations à fréquences élevées. Rev. gén. Electr. Bd. 37 (1935) S. 3—10. — MEURER, S.: Beitrag zum Bau piezoelektrischer Indikatoren. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 8 (1937) S. 249—260. — RÖNTGEN, W. C.: Über die Elektrizitätsleitung in einigen Kristallen und über den Einfluß der Bestrahlung darauf. Ann. Phys., Lpz. Bd. 41 (1913) S. 449. — SCHEIBE, A.: Piezoelektrizität des Quarzes. Dresden: Theodor Steinkopff 1938.

[18] *Impulssender*. BRANDENBURGER, L.: Das Impulszeit-Fernmeßverfahren. Arch. techn. Messen V 384—1. — PFLIER, P. M.: Die Fernmeßverfahren. Arch. techn. Messen V 384—2. — Das Impulszahl-Fernmeßverfahren. Arch. techn. Messen V 384—2. — Das Impulsfrequenz-Fernmeßverfahren. Arch. techn. Messen V 384—3. — Impulskompensations-Fernmeßverfahren. Arch. techn. Messen V 384—4. — SCHLEICHER, M.: Die elektrische Fernüberwachung und Fernbedienung für Starkstromanlagen und Kraftbetriebe. Berlin: Julius Springer 1932.

[19] *Widerstandsender*. GEYGER, W.: Fernübertragung von Meßwerten mit Widerstandsgebern. Arch. techn. Messen V 3821—1 u. 3. — KRÖNERT, J.: Meßbrücken. Arch. techn. Messen J 910—1. — Gleichstrombrücken. Arch. techn. Messen J 912—1. — PFLIER, P. M.: Isolationsmessung. Arch. techn. Messen V 35193—1—2.

[20] *Bolometergeber*. MASON, C. C.: The trends of instrument design. J. sci. Instrum. Bd. 15 (1938) S. 328. — MERZ, L.: Theorie der selbstkompensierenden Gleichstromverstärker mit direkt wirkender mechanischer Steuerung. Arch. Elektrotechn. Bd. 31 (1937) S. 1—23. — MERZ, L. u. H. NIEPEL: Messung kleiner Ströme und Spannungen und kleiner Längenänderungen mit dem bolometrischen Kompensator. Wiss. Veröff. Siemens-Werk Bd. 18 (1939) S. 148—160. — PFLIER, P. M.: Bolometer-Anordnung zur Meldung und Messung von Bewegungen. Arch. techn. Messen J 23—1. — REISS, K. H.: Ein neues thermisches Meßprinzip. Z. techn. Phys. Bd. 15 (1934) S. 83—85. — SELL, H.: Demonstration einer Schalldüsenwirkung. Z. techn. Phys. Bd. 5 (1924) S. 573. — Drei Demonstrationsversuche auf dem Gebiet der Schwingungstechnik. Z. techn. Phys. Bd. 8 (1927) S. 222. — Ein mechanisch gesteuertes Bolometer und seine Anwendung für hochempfindliche qualitative Relais und quantitative Verstärker. Z. techn. Phys. Bd. 13 (1932) S. 320. — Über einige Anwendungen des mechanisch gesteuerten Düsenbolometers (Bolometerschreiber). Z. techn. Phys. Bd. 15 (1934) S. 112—116, 129—135.

[21] *Druckabhängige Halbleiterwiderstände*. GLAMANN, W.: Druckmessung mit Halbleitern. Arch. techn. Messen V 132—12. — LOSENHAUSEN: Elastischer Kraftmesser für die Fernanzeige von Walzdrücken. Z. VDI Bd. 79 (1935) S. 1149.

[22] *Lichtelektrische Sender*. BENDA, E. R.: Die Anwendung lichtelektrischer Einrichtungen in der Fertigung. Siemens-Z. Bd. 19 (1939) S. 283—287. — GUDDEN, B.: Lichtelektrische Erscheinungen. Handbuch der Physik, Bd. 13, S. 103. Berlin: Julius Springer 1928. — MICHEL, G.: Alkali-Photozellen. Arch. techn. Messen J 391—3. — OTT, A.: Lichtelektrische Steuerung. Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 887 bis 890. — QUEVRON, M. L.: Emploi des flux de lumière dans les mesures. Rev. gén. Électr. Bd. 44 (1938) S. 265—268. — SCHMID, C.: Die lichtelektrische Messung des Durchmessers feiner Drähte. ETZ Bd. 55 (1934) S. 785—786. — SEWIG, R.: Photozellen, technische Photozellen. Arch. techn. Messen J 391—1 u. 2. — Sperrschicht-Photoelemente. Arch. techn. Messen J 392—1. — Selenzellen. Arch. techn. Messen J 393—1. — *Siemens & Halske AG*: Lichtelektrische Steuereinrichtungen. Siemens-Z. Bd. 19 (1939) S. 233—238.

[23] *Kapazitive Sender*. FRITSCH, V.: Messung kleiner Kapazitäten. Arch. techn. Messen V 3531—1. — GUSTAFSSON, G.: Ein verbessertes Ultramikrometer nach DOWLING. Ann. Phys., Lpz. Bd. 22 (1935) S. 507—512. — HARDUNG, V.: Mikrometrische Messungen mit elektrischen Wellen. Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 30 (1939) S. 188—191. — JOHANSSON, C. H.: Neue Kondensatordruckkraftmesser. Ann. Phys., Lpz. Bd. 27 (1936) 724—733. — LÖFFLER, K.: Kapazitive Geber mit geradlinigem Kapazitätsverlauf über großen Meßbereich. Meßtechn. Bd. 13 (1937) S. 61—64. — ŌBATA, J.: The ultramicrometer, a new instrument for measuring very small displacement or motion and its various applications. J. opt. Soc. Amer. Bd. 16 (1928) S. 419—432. — Z. Instrumentenkde. Zd. 48 (1928) 614—616. PFANNENMÜLLER, H.: Zur Wirkungsweise schaltgesteuerter Gleichrichter. Wiss. Veröff. Siemens-Werk Bd. 13 (1934) S. 1—6. — REISCH, S.: Über eine neue elektrische Einrichtung zur Messung kleiner Verschiebungen. Z. Hochfrequenztechn. Bd. 38 (1931) S. 101—111. — Elektrisches Mikrometer. ETZ Bd. 57 (1936) S. 532. — SELL, H.: Eine neue kapazitive Methode zur Umwandlung mechanischer Schwingungen in elektrische und umgekehrt. Z. techn. Phys. Bd. 18 (1937) S. 3—10. — THOMA, H.: Aufzeichnung schneller Schwingungen. Z. VDI Bd. 73 (1929) S. 639—642. — TRENDELENBURG, F.: Objektive Klangaufzeichnung



mittels des Kondensatormikrophons. *Wiss. Veröff. Siemens-Werk* Bd. 3 (1924) Heft 2, S. 41—65. — Über eine Methode zur objektiven Lautsprecher-Untersuchung. *Wiss. Veröff. Siemens-Werk* Bd. 4 (1925) Heft 2 S. 200 bis 204. — Über Aufzeichnung und Wiedergabe von Herztönen und Atemgeräuschen. *Wiss. Veröff. Siemens-Werk* Bd. 5 (1927) Heft 3 S. 174—181. — WALTER, C. H.: Über eine neue Gleichrichter-Meßanordnung. *Z. techn. Phys.* Bd. 13 (1932) S. 363—367. WULF, T.: Ein Zylinderkondensator zur Messung kleiner Kapazitäten. *Phys. Z.* Bd. 26 (1925) S. 353—356.

[24] *Induktive Sender*. ABRAHAMS, S. L.: The application of duplex selsyn equipment to steering gear. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 39 (1936) S. 274—279. — COFFMAN, M. C. u. C. H. BORNEMAN: Measuring millionths of an inch in the gage room. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 41 (1938) S. 502. *Ref. ETZ* Bd. 60 (1939) S. 369. — CORBY, R. A.: The versatility of application of selsyn equipment. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 33 (1930) S. 706 bis 711. — GEYGER, W.: Induktive Fernübertragung von Bewegungsvorgängen. *Arch. techn. Messen* V 3822—1/2. — HOLDER, L. F.: Principles of selsyn equipments and their operation. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 33 (1930) S. 500—504. — MERSHON, A. V.: Vibration recorder for electrically measuring and recording small mechanical movements. *J. Amer. Inst. electr. Engr.* Bd. 45 (1926) S. 820—823. — Recent applications of the electric micrometer. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 31 (1928) S. 526 bis 531. — Precision measurements of mechanical dimensions by electrical measuring devices. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 35 (1932) S. 139—144. — NOWACKI, L. M.: Induction motors as selsyn drives. *Electr. Engng.* Bd. 52 (1933) S. 848—853. — PFLIER, P. M.: Fernanzeige von Flüssigkeitshöhen mit induktivem Geber. *Siemens-Z.* Bd. 7 (1927) S. 493—497. — SCHMID, W. u. O. KEHRER: Fühlergesteuerte Werkzeugmaschinen. *AEG-Mitt.* 1939 S. 169—173.

[25] *Stellungsanzeige*. HAZEN, H. L.: Electrical water-level control and recording equipment for model of Cape Cod canal. *Electr. Engng.* Bd. 56 (1937) S. 237 bis 244. — JAEKEL: Ein neuer elektrischer Etagenzeiger für Förderanlagen. *Helios*, Lpz. Bd. 36 (1930) S. 125—128. — LEONHARDT, R.: Elektrische Pegelfernübertragung. *Z. VDI* Bd. 74 (1930) S. 1430—1432. — OSTENDORF, W.: Einrichtung zur Messung elektrischer Winkel, sowie räumlicher Winkel an umlaufenden Maschinen. *ETZ* Bd. 59 (1938) S. 689—693.

[26] *Elektrische Mikrometer*. *Anonym*: Elektrische Feinmeßlehre. *Feinmech. u. Präz.* Bd. 46 (1938) S. 292. — BENDA, E. B.: Die Anwendung lichtelektrischer Einrichtungen in der Fertigung. *Siemens-Z.* Bd. 19 (1939) S. 283—287. — FROBÖSE, E.: Elektrische Meßlehre. *AEG-Mitt.* 1937 S. 405—411. — FROBÖSE, E. u. K. SCHÖNBACHER: Elektrische Messung kleiner Längenunterschiede. *Arch. Elektrotechn.* Bd. 33 (1939) S. 341—346. — HAYNES, J. R.: Measuring displacements of microphone contacts. *Bell. Labor. Rec.* Bd. 13 (1935) S. 337—342. — MERSHON, A. V.: Electric micrometer for measuring small mechanical displacements. *Gen. Electr. Rev.* Bd. 29 (1926) S. 815—817. — Vibration recorder, for electrically measuring and recording small mechanical movements. *J. Amer. Inst. electr. Engr.* Bd. 45 (1926) S. 820—823. — *Physicists Research Co.*: Surface roughness measuring instrument. *Engineering* Bd. 147 (1939) S. 699. — TUTTLE, C. u. W. BORNEMANN: A method of dimensional gaging with photoelectric cells. *Instruments* Bd. 12 (1939) S. 67—69.

[27] *Dickenmesser für Drähte, Bänder, Platten und Rohre*. DAHL, K. u. J. KERN: Ein schreibendes Meßgerät zur Messung der Querschnittschwankungen feiner Drähte. *ETZ* Bd. 57 (1936) S. 1423—1425. — LOEBE, W. W. u. C. SAMSON: Beobachtung und Registrierung von Durchmesserchwankungen dünner Drähte. *Techn. wiss. Abh. Ostram* Bd. 1 (1930) S. 156—164. — *Z. techn. Phys.* Bd. 9 (1928) S. 414 bis 419. — SCHUCK, O. H.: Electrical measurements of silk thread diameter. *Electr.*

Engng. Bd. 55 (1936) S. 991—996. — STEVENSON, A. B.: A magnetic comparator metal thickness tester. J. sci. Instrum. Bd. 15 (1938) S. 156—158. — THORNTON, B. M. u. W. M. THORNTON: An electromagnetic method of measuring the thickness of boiler tubes in situ. Proc. Instn. mech. Engrs., Lond. Bd. 123 (1932) S. 745 bis 760. — Measurement of the thickness of metal walls from one surface only. Engineering Bd. 146 (1938) S. 715—717. Ref. ETZ Bd. 60 (1939) S. 1403. — TROST, A.: Betriebsmäßige Wanddickenmessung mit Röntgendurchstrahlung und Zählrohr. Stahl u. Eisen Bd. 58 (1938) S. 668—670. Ref. ETZ Bd. 59 (1938) S. 1098. WARREN, A. G.: Measurement of the thickness of metal plates from one side. J. Instn. electr. Engrs Bd. 84 (1939) S. 91—95.

[28] *Messung von Auftragsdicken.* Anonym: Electric thickness gage. Instruments Bd. 8 (1935) S. 341 (GEC). — Die Prüfung der Schichtdicke von Korrosions-Schutzüberzügen mit der magnetischen Antenne. Helios, Lpz. Bd. 41 (1935) S. 527. — BRENNER, A.: Magnetic method for measuring the thickness of nonmagnetic coatings on iron and steel. J. Res. Nat. Bur. Stand. Bd. 20 (1938) S. 357—368. — RUSHER, M. A.: Varied applications of thickness gages for thin non magnetic layers. Gen. Electr. Rev. Bd. 42 (1939) S. 486—487. — TAIT, W. H.: An instrument for measuring the thickness of coatings on metals. J. sci. Instrum. Bd. 14 (1937) S. 341—343.

[29] *Dehnungsmessung.* BERG, S.: Dynamische Spannungsmessungen. Z. VDI Bd. 81 (1937) S. 295—298. — CHARD, F. DE LA: Ein schreibender Dehnungsmesser. ETZ Bd. 55 (1934) S. 1276. — EGIDI, C.: Direktanzeigender Dehnungsmesser mit schwingender Saite. Alta Frequ. Bd. 8 (1939) S. 516—536. — HULL, C. H.: Alternating stress measurements by the resistance strip method. Gen. Electr. Rev. Bd. 40 (1937) S. 379—380. — LANGER, B. F.: An instrument for measuring small displacements. Rev. sci. Instrum. Bd. 2 (1931) S. 336—342. — LEHR, E. u. H. GRANACHER: Dehnungsmeßgerät mit sehr kleiner Meßstrecke und Anzeige mittels Sperrschicht-Phototelle. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 7 (1936) S. 66—74. — Ein neuer lichtelektrischer statischer Feindehnungsmesser mit 2 mm Meßstrecke. Die Askania-Warte 1938 Nr. 11 S. 18—20. — LÖFFLER, K.: Messung raschwechselnder Formänderungen. Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 606. — MENEFEE, F. N.: Use of telemeter in finding force of and stresses due to instantaneous loads. J. Franklin Inst. Bd. 219 (1935) S. 167—185. — RATZKE, J.: Ein neuer elektrischer dynamischer Dehnungsmesser. Jb. dtsh. Luftfahrtforsch. 1937, Ausgabe Triebwerk II, S. 278—282. — RUSHER, M. A. u. A. V. MERSHON: The electric strain gage. Electr. Engng. Bd. 57 (1938) S. 645—648. — RUSHER, M. A. u. J. W. MATTHEWS: The electric strain gage. Gen. Electr. Rev. Bd. 42 (1939) S. 176—178. — THUM, A., H. SVENSON u. H. WEISS: Neuzeitliche Dehnungsmeßgeräte. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 9 (1938) S. 229—234.

[30] *Drehmomentmesser.* EILKEN, H.: Piezoelektrische Messungen an einer Freistrahlturbine. Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 833. — KEINATH, Gg.: Ein neuer elektrischer Verdrehungsmesser. Dingers polytechn. J. Bd. 101 (1920) S. 265—268. — MERZ, L. u. H. SCHARWÄCHTER: Verdrehungsmessung. Arch. techn. Messen V 136—2.

[31] *Druckmeßdosen.* EMICKE, O., H. ALLHAUSEN u. W. MAUKSCH: Neuartige Verfahren zur Ermittlung der reinen Walzarbeit. Siemens-Z. Bd. 12 (1932) S. 341 bis 346. — HATHAWAY, C. M. u. M. MOHLER: Tension measurement and control in cold strip mills. Electr. Engng. Bd. 56 (1937) S. 1141—1144. — JANOVSKY, W.: Über die magnetoelastische Messung von Druck-, Zug- und Torsionskräften. Z. techn. Phys. Bd. 14 (1933) S. 466—472. — Magnetoelastische Messung von Druck-, Zug- und Torsionskräften. Arch. techn. Messen V 132—6—8. — KEINATH, Gg.: Druckmessung mit der Kondensator-Meßdose. Arch. techn. Messen V 132—5. — MERZ, L. u. H. SCHARWÄCHTER: Magnetoelastische Druckmessung. Arch. techn. Messen V 132—15. — MÜLLER, O.: Elektrische Druckmessung, Kapazitive Druck-

meßdosen. Arch. techn. Messen V 132—16 (1939). — PFLIER, P. M.: Messung der Schwindkraft von Beton. Zement Bd. 26 (1937) S. 657—659. — SATTLER, H.: Druckmessung durch ein kapazitives Verfahren. Diss. Berlin 1938. — WALLICHS, A. u. H. OPITZ: Neues Verfahren zur Messung schnellwechselnder mechanischer Kräfte. Stahl u. Eisen Bd. 51 (1931) S. 1478—1479. — WIESELSBERGER, C.: Elektrische Anzeige von Kräften durch Änderung einer Induktivität. Jb. dtsh. Luftfahrtforsch. 1937, Ausgabe Flugwerk I, S. 592—594.

[32] *Druckindikatoren*. BRANDT, R. u. H. WICHMANN: Der DVL-Glimmlampen-Indikator. ETZ Bd. 55 (1934) S. 376. — Z. Instrumentenkde. Bd. 54 (1934) S. 326. — ERNST, H.: Druckmessungen in der Einspritzleitung von Dieselmotoren. Jb. dtsh. Luftfahrtforsch. 1937, Ausgabe Triebwerk II, S. 273. — FAHRENTHOLZ, S., J. KLUGE u. H. E. LINCKE: Über neue Quarz-Druckmeßkammern für das piezoelektrische Meßverfahren. Phys. Z. Bd. 38 (1937) S. 73—78. — FIEBER, C. W.: Ein neuer elektrischer Indikator für schnelllaufende Verbrennungskraftmaschinen. Autom.-techn. Z. Bd. 37 (1934) S. 523—528. — GLAMANN, W.: Indikatoren und Druckmesser nach dem Prinzip der Druckmessung mit Halbleitern. Arch. techn. Messen J 137—4. — HASSE, A.: Druckmeßgerät mit elektrischer Anzeige. Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 563—564. — HERMANN, P. K.: Piezoelektrische Meßeinrichtungen. AEG-Mitt. 1939 S. 497—502. — JUHASZ, K. J. DE: The engine indicator. Instruments Bd. 6 (1933) S. 4—6 f. — KAUFMANN, W.: Druck in Flüssigkeiten. Arch. techn. Messen V 133—2. — MEURER, S.: Indikatoren für schnelllaufende Verbrennungsmotoren. Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 1447—1454. — Beitrag zum Bau piezoelektrischer Indikatoren. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 3 (1937) S. 249 bis 260. — MÖLLER, A.: Zur Theorie der Druckmeßdose. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 10 (1939) S. 80—87. — NIELSEN, H.: Der piezoelektrische Indikator. Arch. techn. Messen J 137—3. — RATZKE, J.: Ein elektromagnetischer Indikator und Klopfmesser. Jb. dtsh. Luftfahrtforsch. 1938, Ausgabe Triebwerk II, S. 368—372. SAWYER, H. T.: An indicator for high speed engines. Mech. Engng. Bd. 58 (1936) S. 283. — SCHNAUFFER, K.: Aufzeichnung rasch verlaufender Druckvorgänge mittels des Verfahrens der halben Resonanzkurve. Luftf.-Forsch. Bd. 6 (1930) S. 126—136. Indizieren von schnelllaufenden Motoren. Z. VDI Bd. 74 (1930) S. 1066—1067. SIEGMUND, E.: Elektrischer Druckindikator zum Messen rasch veränderter Drücke. Helios, Lpz. Bd. 40 (1934) S. 1280—1281. — SIGRIST, W. u. C. MEYER: Ballistische Untersuchungen mit einem registrierenden Piezoquarz-Druckmesser. Helv. phys. Acta Bd. 9 (1936) S. 646—648. — WATZINGER, A. u. R. SCHNELL LARSEN: Erfahrungen mit elektrischer Druckaufnahme bei Wärmekraftmaschinen. Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 899—901.

[33] *Drehzahlmesser*. AEG: Lichtelektrischer Umdrehungszähler. Helios, Lpz. Bd. 42 (1936) S. 1513—1514. — *Anonym*: Elektrische Drehzahlmessung mit dem lichtelektrischen Drehzahl-Stichzähler. AEG-Mitt. 1936 S. 387—389. — CARLTON, O. E. u. W. D. KETCHUM: Determination of generator speed. J. Amer. Inst. electr. Engr. Bd. 49 (1930) S. 428—431. — ECKEL, F.: Messung kurzzeitiger Drehzahl-schwankungen. Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 381—382. Ref. ETZ Bd. 60 (1939) S. 1237. GEYGER, W.: Messung von Drehgeschwindigkeiten mit ohmmetrischen Anzeige- und Schreibergeräten. Arch. Elektrotechn. Bd. 27 (1933) S. 505. — HOFMANN, W.: Elektrische Ferndrehzahlmesser für Flugzeuge. Luft.-Forschg Bd. 13 (1936) S. 25—31. — HORN, E.: Ferndrehzähler auf Großflugzeugen. Z. Fernmeldetechn. Bd. 13 (1932) S. 138—139. — Fernmessung von Drehzahlen. Z. Fernmeldetechn. Bd. 13 (1932) S. 55—57. — Drehzahlmesser. Z. VDI Bd. 81 (1937) S. 1369—1373. KEINATH, G.: Elektrische Drehzahlmesser. Arch. techn. Messen J 162—1. — KÖRFER: Drehzahlmessung mit Hilfe eines Lichtelements. Meßtechn. Bd. 9 (1933) S. 67—68. — MORRIS, G. u. R. S. SILVER: A method for indicating speeds of rotation. J. sci. Instrum. Bd. 16 (1939) S. 149—150. — NIESIOŁOWSKI-GAWIN: Geschwindigkeitsmessung. Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 282. Berlin: Julius

Springer 1926. — PFLIER, P. M.: Das Impulsfrequenz-Fermeßverfahren. Arch. techn. Messen V 384—3. — UNTERBERGER, R.: Messung der mittleren Geschwindigkeit von ungleichförmig bewegten Systemen mit Tachometerdynamo. Arch. techn. Messen J 162—4. — ZEITZ, E. F.: Eine Schaltung zur Messung tiefer Frequenzen auf lichtelektrischem Wege. Z. Fernmeldetechn. Bd. 20 (1939) S. 62 bis 63.

[34] *Schlupfmessung*. BÖNING, P.: Schlupf- und Belastungsmesser mit stetiger Anzeige. Arch. techn. Messen V 3611—1. — ETZ Bd. 60 (1939) S. 491. — PFLIER, P. M.: Synchronisiergeräte. Arch. techn. Messen J 78—1—3. — REINHARDT, F.: Stroboskopisches Feinmeßgerät für Schlupf und Drehzahl. ETZ Bd. 59 (1938) S. 957—960. — SCHMIEDER, K.: Neue Verfahren zur Schlupfmessung. ETZ Bd. 57 (1936) S. 1201—1204. — Messung von Relativ-, Längs- und Drehbewegungen nach Größe und Richtung mit einem Schlupfmeßmotor. ETZ Bd. 58 (1937) S. 5—9.

[35] CRANZ: Lehrbuch der Ballistik. Berlin: Julius Springer 1936. — TEICHMANN, H.: Verfahren zur Bestimmung von Geschößgeschwindigkeiten. ETZ Bd. 58 (1937) S. 627—628.

[36] *Drehbeschleunigungsmessung*. BÉHAR, M. F.: Speed and acceleration. Instruments Bd. 4 (1931) S. 377—394, 413—444f. — KLUGE, J. u. H. E. LINCKH: Messung des Anlaufmomentes von Asynchronmotoren durch ein neues elektrostatisches Meßverfahren. Phys. Z. Bd. 39 (1938) S. 367—372. — LUND, H.: Messung ungleichförmiger Drehbewegung mit piezoelektrischen Kristallen. AEG-Mitt. 1931 S. 694—697. — YTTBERG, A.: Eine neue Methode zur Bestimmung der Leerlaufverluste einer Maschine. ETZ Bd. 23 (1912) S. 1158.

[37] *Allgemeines Schrifttum über Beschleunigungsmesser*. GÖRNER, J.: Beschleunigungsmessung durch Differentiation der Geschwindigkeit. Luftf.-Forsch. Bd. 16 (1939) S. 54—58. — GREENTREE, C. D.: Vibration measuring instruments. Electr. Engng. Bd. 56 (1937) S. 706—710. — HERRMANN, A.: Grundsätzliche Betrachtungen über piezoelektrische Beschleunigungsmesser. Z. Geophys. Bd. 15 (1939) S. 31—36. — KOCH, H. W. u. W. ZELLER: Schwingungsmeßverfahren und ihre Anwendung in der Praxis. Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 1440—1446. — KÜSSNER, H. G.: Fortschritte der mechanischen Schwingungsforschung. Z. VDI Bd. 83 (1939) S. 149—155. — MEISTER, F. J.: Untersuchungen zur Schaffung geeigneter Kraftfahrzeug- und Flugzeug-Schwingungsmesser. Akust. Z. Bd. 3 (1938) S. 271 bis 283. — SELL, H. u. G. TURETSCHKE: Quantitative Messung von Erschütterungen. Z. techn. Phys. Bd. 15 (1934) S. 644—652. — SILVERMAN, D.: Measurement and analysis of noise and vibration. Instruments Bd. 12 (1939) S. 205—236.

[38] *Beschleunigungsmesser nach dem Widerstandsverfahren*. GERLOFF, G.: Über einen neuen Beschleunigungsmesser und Einschwingungsvorgänge bei Schwingungsmessern. Forsch. Bd. 8 (1937) S. 143—152. — HARM, W.: Die Schwingungsmeßeinrichtung der Lokomotiv-Versuchsabteilung Grunewald. ETZ Bd. 57 (1936) S. 811—812. — KOCH, H. W.: Schwingungsmeßgeräte in Flugzeugen. Z. techn. Phys. Bd. 16 (1935) S. 603—607. — MARTIN, H.: Empfindlichkeit und Frequenzcharakteristiken eines neuen elektrodynamischen Erschütterungsmessers. Phys. Z. Bd. 40 (1939) S. 577—583. — MAYER, F. H.: Dreikomponenten-Beschleunigungsmesser. Meßtechn. Bd. 4 (1928) S. 115—119.

[39] *Piezoelektrischer Beschleunigungsmesser*. FRÖHLICH, H.: Ein piezoelektrischer Beschleunigungsmesser. Meßtechn. Bd. 15 (1939) S. 113—117. — GONDET, H. u. P. BEAUDOUIN: Vibrographe-accélérographe piézoélectrique. Rev. Gen. Electr. Bd. 37 (1935) S. 499—508. — HELLMANN, R. K.: Piezoelektrische Meßgeräte. Amerikanische Schwingungsmesser mit Seignette-Salz. Arch. techn. Messen J 766—1. — ETZ Bd. 60 (1939) S. 198—199. — KLUGE, J. u. H. E. LINCKH: Piezoelektrische Messung mechanischer Größen. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 2 (1931) S. 153. —

MASON, C. A. u. B. B. RAY: Pieco-electric vibration meter. Electrician Bd. 117 (1937) S. 565—567. — TURETSCHKE, G.: Beschleunigungs-Meßgeräte. Arch. techn. Messen J 163—1.

[40] *Kapazitive Beschleunigungsmesser*. SELL, H.: Eine neue kapazitive Methode zur Umwandlung mechanischer Schwingungen in elektrische und umgekehrt. Z. techn. Phys. Bd. 18 (1937) S. 3—10. — THOMA, H.: Aufzeichnung schneller Schwingungen. Z. VDI Bd. 73 (1929) S. 639—642.

[41] *Induktive Beschleunigungsmesser*. Anonym: The Heymann-Reutlinger.: vibrograph. Engineering Bd. 143 (1937) S. 463. — EMICKE, O. u. H. BENAD: Schwingungsuntersuchungen an Walzenschleifmaschinen. Z. VDI Bd. 80 (1936) S. 1159—1162. — MEYER, E. u. W. BÖHM: Ein elektrodynamischer Erschütterungsmesser und seine Anwendung auf die Untersuchung von Gebäudeerschütterungen, Z. techn. Phys. Bd. 16 (1935) S. 567—568. — REUTLINGER, G.: Mechanischer Schwingungsmesser hoher Empfindlichkeit. Z. techn. Phys. Bd. 16 (1935) S. 601—603. — SIEBER, F.: Ein elektromagnetischer Vibrograph, insbesondere für Turbogeneratoren. BBC-Mitt. Bd. 18 (1931) S. 248—251. — Erschütterungsmessung an Maschinen. Arch. techn. Messen V 171—2.

[42] *Synchronuhren*. ADELSBERGER, U.: Zeit- und Frequenzmessung hoher Genauigkeit. Elektr. Nachr.-Techn. Bd. 12 (1935) S. 83—91. — FETTER, C. H.: A new way of splitting seconds. Bell Teleph. Quart. Bd. 11 (1932) S. 293—300. — GIEBE, E. u. A. SCHEIBE: Über Leuchtresonatoren als Hochfrequenznormale. Hochfrequenztechn. Bd. 41 (1933) S. 83—96. — HILD, K. u. W. KEIL: Zeitmessung im Sport. Arch. techn. Messen V 142—3. — LINKE, H.: Kinematographische Zeitmessung. Meßtechn. Bd. 15 (1939) S. 159—161. — SCHEIBE, A. u. U. ADELSBERGER: Eine Quarzuhr für Zeit- und Frequenzmessung sehr hoher Genauigkeit. Phys. Z. Bd. 33 (1932) S. 835—841. — Frequenz und Gang der Quarzuhren der PTR. Ann. Phys., Lpz. Bd. 410 (1933) S. 1—25. — Die technischen Einrichtungen der Quarzuhren der PTR. Hochfrequenztechnik Bd. 43 (1934) S. 37—47. — STARK, G.: Der AEG-Sekundenmesser. AEG-Mitt. 1938 S. 130—132. — TRITSCHLER, E.: Elektrische Kurzzeitmesser hoher Genauigkeit. ETZ Bd. 60 (1939) S. 1133 bis 1134.

[43] *Zeitschreiber*. BÉHAR, M. F.: Timing and scheduling instruments. Instruments Bd. 4 (1931) S. 279f. — DWOREK, O.: Lichtelektrischer Zeitnehmer. AEG-Mitt. 1932 S. 353—354. — GAARZ, W. u. P. E. KLEIN: Der neue Siemens-Elektronenstrahl-Oszillograph. Siemens-Z. Bd. 17 (1937) Heft 4 — GARDENER, G. F. u. H. L. NEWELL: The cycle recorder. Gen. Electr. Rev. Bd. 38 (1935) S. 384—395. — KLEIN, P. E.: Ein neuer tragbarer Siemens-Elektronenstrahl-Oszillograph. Siemens-Z. Bd. 19 (1939) Heft 7. — LEYBOLD, O. G. u. v. ARDENNE: Der Polarkoordinaten-Oszillograph. Helios, Lpz. Bd. 42 (1936) S. 1059. — MARRISON, W. A.: The spark chronograph. Bell. Labor. Rec. Bd. 18 (1939) S. 54—55. — OESINGHAUS, W. u. A. SEEFELD: Aufzeichnung von Schaltvorgängen mit einem Zeitschreiber. AEG-Mitt. 1939 S. 321—323. — PFLIER, P. M.: Anwendung des Oszillographen im Instrumentenbau. Siemens-Z. Bd. 13 (1933) S. 204—207.

[44] *Kurzzeitmesser*. CRANZ: Lehrbuch der Ballistik. Berlin: Julius Springer 1936. — MELZER, K.: Lichtelektrische Messungen von Zeit und Geschwindigkeit. Elektrotechn. u. Masch.-Bau Bd. 55 (1937) S. 173—176. — NIESIOLOWSKI-GAWIN: Methoden der Zeitregistrierung. GEYGER-SCHEEL: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 242. Berlin: Julius Springer 1926. — REICH, J. u. H. TOOMIN: Electronic circuits for the measurement of time and speed. Rev. sci. Instrum. Bd. 8 (1937) S. 502. — SCHARDIN, H.: Messen kurzer Zeiten. Forsch. Ing.-Wes. Bd. 7 (1936) S. 257—264. — SCHMUNDT, W.: Elektrische Methoden zur Messung kleiner Zeitintervalle. GEYGER-SCHEEL: Handbuch der Physik, Bd. 2, S. 235. Berlin: Julius Springer 1926. — STEENBECK, M. u. R. STRIGEL: Elektrische Kurzzeitmessung.

Arch. techn. Messen V 142—2. — Ein Zeittransformator zur automatischen Registrierung kurzer Zeiten. Arch. Elektrotechn. Bd. 26 (1932) S. 831—840. — STRIGEL, R.: Der Zeittransformator als Meßgerät der Hochspannungstechnik. Z. Instrumentenkde. Bd. 57 (1937) S. 65—73.

[45] *Zeitwaagen*. *Anonym*: Un nouveau systeme de réglage rapide. Rev. int. l'Horlogerie et des branches annexes Bd. 37 (1936) S. 248. — BENNET, A. F.: Amplifying watch sounds. Bell Labor. Rec. Bd. 12 (1933/34) S. 89—91. Ref. Die Uhrmacherskunst Bd. 59 (1934) S. 36—37. — HIBBARD, F. H.: A Watch-Rate Recorder. Bell Labor. Rec. 1937 S. 202.—206. — KEINATH, G.: Die Zeitwaage. Arch. techn. Messen J 154—3/5. — LOESKE, M.: Ein neues Schnellregulier-System. Die Uhrmacherwoche Bd. 41 (1934) S. 169—179. — Zeitmikroskop. Die Uhrmacherwoche Bd. 41 (1934) S. 303—304. — Ein neuer Schnellregulier-Apparat. Ref. Die Uhrmacherwoche Bd. 43 (1936) S. 258—260. — Druckschrift: Weco SP 88, Western Electric Watch-Rate Recorder. — LUCKEY, G. P.: Device for Accurately Timing Watches. Rev. sci. Instrum. Bd. 4 (1933) S. 504 bis 506. — PFLIER, P. M.: Zeitwaagen. Arch. techn. Messen J 154—9. — SCHEIBE, A. u. U. ADELSBERGER: Eine Quarzuhr für Zeit- und Frequenzmessung sehr hoher Genauigkeit. Z. techn. Phys. Bd. 13 (1932) S. 591—592. — TAMM, R.: Die Zeitwaage, ein Gerät zum Messen des Gangunterschiedes von Uhren. Z. VDI Bd. 78 (1934) S. 556—558. — YANOUCHEVSKY, V.: Zeit und Frequenz, Televisione Bd. 1 (1937) S. 19—32.

## Namen- und Sachverzeichnis.

- Absorption von Röntgenstrahlen 96.  
Addition 26, 28.  
ADELSBERGER 161.  
Akustische Zeitwaagen 196.  
Anzeigetoleranz 2.  
Askania 108, 166.  
Auflösungsvermögen 23.  
— Schrifttum 209.  
Auftragsdicke 99.  
Auftragsdickenmessung, Schrifttum 213.
- Ballistik, Schrifttum 215.  
Ballistisches Galvanometer 147, 191.  
Bell Telephone Mfg. Co. 197, 199.  
BENSBERG-Gitter 147.  
BERG, S. 107.  
BERTHOLD 38.  
Beschleunigungsmesser, Schrifttum 215.  
Beschleunigungsmessung 148.  
Blechdickenmesser 89.  
BÖNING 145.  
Bohrlochprüfgerät 81.  
Bolometer 49.  
Bolometergeber, Schrifttum 211.  
Bolometerlehre 83.  
Breitenmessung 79.  
Brücken-Kreuzspul-Instrument 18.  
Brückenschaltungen 3, 31.  
BÜGE 193.  
Bureau of Standards 101.
- Cambridge 50.  
Chronograph 169.
- Dämpfung 4.  
Dauermagnete 41.  
Dehnungsmesser 106.  
Dehnungsmessung, Schrifttum 213.  
Dickenmesser 39, 87.  
— Schrifttum 212.  
Differenzbildung 26.  
Differenzierung 31.  
Division 27, 28.  
Doppelspul-Instrument 19.
- Drahtdickenmesser 88.  
Drehbeschleunigungsmesser 148.  
Drehbeschleunigungsmessung, Schrifttum 215.  
Dreheisen-Quotientenmesser 21.  
— — Schrifttum 209.  
Drehfeldsystem 66.  
Drehmomentmesser 112.  
— Schrifttum 213.  
Drehzahlgeber 40, 139.  
Drehzahlmesser, Schrifttum 214.  
Drehzahlmessung 136.  
— mit Druckdose 133.  
Drehzahl-Summierung 137.  
Druckabhängiger Widerstand 50.  
Druckbehälter 72.  
Druckindikatoren 124.  
— Schrifttum 214.  
Druckmeßdosen 36, 115.  
— Schrifttum 213.  
Druck-Weg-Diagramm 134.  
Düsenbolometer 49.  
Durchlaufkondensator 57.  
DVL 111, 133.  
Dynamischer Dehnungsmesser 111.
- Einflußgrößen 7.  
Elastischer Spannungszustand 35.  
— — Schrifttum 209.  
Elektrodynamische Druckdose 127.  
Elektrodynamischer Schwingungsmesser 156.  
Elektrolytische Widerstandssender 51.  
Elektrolytischer Dehnungsmesser 107.  
Elektromagnetischer Druckindikator 127.  
— Schwingungsmesser 158.  
Empfindlichkeit 2.  
ERICSSON 178.  
Erschütterungsmessung 148.
- Fadendickenmesser 87.  
Fadenspannungsmesser 123.  
FAHRENTHOLZ 132.

- Fahrzeuggeschwindigkeitsmesser 146,  
 194.  
 Fehlergrenzen 6.  
 Feinmeßlehre 76.  
 Flügellagenzeiger 69.  
 Flüssigkeitsstandmessung 70.  
 Fluggeschwindigkeitsmessung 165.  
 Fremdfeldeinfluß 7.  
 Frequenzeinfluß 7, 22.  
 Frequenzgeber 42.
- Gasflaschenprüfer** 97.  
 Genauigkeit 2.  
 GERLOFF 152.  
 Geschloßgeschwindigkeitsmessung 147,  
 195.  
 Geschwindigkeitsmessung 136.  
 GEYGER 22, 142.  
 GIBBS 202.  
 Gleichlauf von Wellen 70.  
 Glimmlampen-Indikator 133.  
 — -Konstanthalter, Schrifttum 208.  
 Glimmspannungsteiler 11.  
 Glühlampen-Brücke 13.  
 GOCKEL 12.  
 GRAAF DE 97.  
 Gummidickenmesser 103.  
 Gummiwaage 104.
- Halbleiterwiderstände, Schrifttum** 211.  
 Halbleiterwiderstand 50.  
 Haspelzugmesser 122.  
 Hitzdrahtmikrometer 50.  
 HORN 146.  
 Hülsen-Indikator 131.  
 Huth-Kühn-Schaltung 61.
- Idometer 104.  
 Impuls-Drehzahlmesser 136.  
 Impulsfrequenz-Drehzahlmesser 137.  
 Impulsfrequenzverfahren 45.  
 Impulskompensationsverfahren 45.  
 Impulssender 44.  
 — Schrifttum 210.  
 Impulsverhältnisverfahren 46.  
 Impulszahlverfahren 45.  
 Impulszeitverfahren 46.  
 Induktions-Dynamometer 21.  
 Induktionsgesetz 40.  
 Induktive Druckdose 119.  
 — Sender, Schrifttum 212.
- Induktiver Beschleunigungsmesser 155.  
 — — Schrifttum 216.  
 — Blechdickenmesser 91.  
 — Dehnungsmesser 110.  
 — Druckindikator 127.  
 — Schichtdickenmesser 99.  
 — Schnittkraftmesser 120.  
 — Sender 62.  
 — Verdrehungsmesser 112.  
 — Wasserstandgeber 70.  
 Induktives Mikrometer 76.  
 Induktivitätsmessung 64.  
 Integration 31.  
 Internationale Regeln für Meßgeräte 2.  
 JOENS 22.  
 Ionisationskammer 39, 97.
- Kapazitätsmessung** 59.  
 Kapazitive Druckdose 117.  
 — Flüssigkeitsstandmessung 73.  
 — Sender 56.  
 — — Schrifttum 211.  
 Kapazitiver Beschleunigungsmesser 154.  
 — — Schrifttum 216.  
 — Druckindikator 124.  
 — Gasdruckmesser 125.  
 — Schnittkraftmesser 121.  
 — Verdrehungsmesser 114.  
 Kapazitives Mikrometer 58, 78.  
 Kathodenstrahl-Oszillograph 187.  
 Kinematographische Geschwindigkeits-  
 messung 166.  
 Klappbrücke 68.  
 Klasseneinteilung 4.  
 KLUGE 121, 132, 150, 154.  
 Kohledehnungsmesser 108.  
 Kohledehnbeschleunigungsmesser 151.  
 Kohledehndosen 119, 129.  
 Kohledehndregler 15.  
 — Schrifttum 208.  
 Kondensatormeßdose 117.  
 Konstanthalter 9.  
 Kraftmessung 106.  
 Kraftverlaufmesser 61.  
 Kreuzfeld-Instrument 19.  
 Kreuzspul-Instrument 16.  
 — -Meßgeräte, Schrifttum 208.  
 Kreuzspulschreiber 74.  
 Kriechgalvanometer 192.  
 Kurzzeitmesser 191.  
 — Schrifttum 216.



- Lagefehler 8.  
 LARSEN 132.  
 LEHR 108.  
 Lehre 75.  
 Leistungsfaktoreinfluß 8.  
 Leistungsfaktormesser 69.  
 Lichtelektrische Differenzschaltung 82.  
 — Konstanthalter 14.  
 — Sender 54.  
 — — Schrifttum 211.  
 Lichtelektrischer Dehnungsmesser 108.  
 Lichtelektrisches Mikrometer 79.  
 LINCKH 121, 132, 150, 154.  
 LINDECK 128.  
 LISELL 128.  
 LUND 150.  
  
 Magnete, Schrifttum 210.  
 Magnetische Konstanthalter, Schrift-  
 tum 208.  
 Magnetischer Blechdickenmesser 95.  
 — Nebenschluß 33.  
 — Spannungsgleichhalter 10.  
 Magnetisierungsschleife 35.  
 Magnetoelastische Druckmeßdosen 36.  
 116.  
 — Kraftmessung 36.  
 Magnetoelastizität 35.  
 — Schrifttum 210.  
 Magnetstähle 41.  
 MARTIN 157.  
 Maßstabeigenschaften elektrischer Meß-  
 geräte 2.  
 MAUKSCH 121.  
 Maxwell-Wien-Brücke 36.  
 MELZER 194.  
 Membranegebläse 49.  
 MEURER 132.  
 Mikrometer 50, 58, 75.  
 — Schrifttum 212.  
 Mikrotaster 84.  
 Modellgerinne 73.  
 Morse-Schreiber 168.  
 MPA, Darmstadt 110.  
 Multiplikation 27, 29.  
  
 NERNST 129.  
 Neufeldt & Kuhnke 15.  
 Nullmotor-Drehzahlmesser 142.  
 Nullpunktunterdrückung 3.  
  
 Oberflächenprüfung 85.  
 OPITZ 121.  
 Oszillograph 182.  
  
 Papierdickenmessung 101.  
 Pegelanzeige 71.  
 Permalloy 35.  
 Permeabilität 35.  
 Photoelektrische Konstanthalter,  
 Schrifttum 208.  
 Photoelemente 54.  
 PIERCE 160.  
 Piezoelektrische Beschleunigungsmesser,  
 Schrifttum 215.  
 — Druckdose 131.  
 Piezoelektrischer Beschleunigungs-  
 messer 153.  
 Piezoelektrizität 42.  
 — Schrifttum 210.  
 Plattendickenmesser 91.  
 Plattenkondensator 57.  
 Polarkoordinaten-Oszillograph 189.  
 Pratt & Whitney 89.  
 Printing Watch Timer 202.  
 Produktbildung 27.  
 Propellerlage 69.  
 PTR 153, 159.  
  
 Quarz-Druckmeßkammer 44.  
 Quarzuhr 159.  
 Quecksilber-Druckmeßdose 49.  
 Querschnittbestimmung 33.  
 Quotientenbildung 27.  
 Quotientenmesser 16.  
  
 RAMSAUER 192.  
 RATZKE 127.  
 Rechenoperationen 26.  
 — Schrifttum 209.  
 Regeln für Meßgeräte 2.  
 — für Wandler 8.  
 REUTLINGER 158.  
 Ringeisen-Quotientenmesser 21.  
 Ringrohrfernsender 48.  
 Röhrenregler 9.  
 — Schrifttum 208.  
 Röntgendickenmesser 96.  
 Röntgendurchstrahlung 37.  
 Röntgenverfahren, Schrifttum 210.  
 Rohrdickenmesser 92.  
 RUMPF 119, 129.  
  
 SCHALLBROCH 120.  
 Schallplattenprüfer 85.  
 Schaltungsempfindlichkeit 2.  
 SCHEIBE 161.

- Schichtdicke 99.  
*Schieß-Defries* 121.  
 Schleifen-Oszillograph 182.  
 Schleusenanzeiger 69.  
 Schlupfmessung 143.  
 — Schrifttum 215.  
 SCHNAUFFER 125.  
 SCHNELL 132.  
 Schnittgeschwindigkeitsmesser 146.  
 Schnittkraftmesser 119.  
 Schraubenlagenzeiger 69.  
 Schreibende Zeitwaagen 200.  
 Schrifttum 208.  
 Schwimmer-Wasserstandmessung 72.  
 Schwingungsgeber 40.  
 Schwingungsmesser 150.  
 Schwingungsmessung 148.  
 Seewarte Hamburg 72.  
 Seilrutschmessung 74.  
 Selenwiderstände 54.  
 Selsyn-System 67.  
 SIEBER 155.  
 Siemens-Zeitwaage 205.  
 Spannungseinfluß 7.  
 Spannungsgeber 40.  
 Spannungsgleichhalter 9.  
 Spannungsprüfung 5.  
 Spannungsunabhängige Dynamometer,  
 Schrifttum 209.  
 — Meßgeräte 16.  
 Stabilovolt-Röhre 11.  
 Statischer Dehnungsmesser 108.  
 Stauchzylinder-Druckdose 59, 117.  
 Stellungsanzeige 67.  
 — Schrifttum 212.  
 Stich-Drehzähler 136.  
 Stimmgabelgenerator 164.  
 Stroboskopische Zeitwaagen 198.  
 Stückzeit-Schreiber 180.  
 Subtraktion 27, 30.  
 Summenbildung 26, 28.  
 Synchronoskop 69.  
 Synchronuhr 159.  
 — Schrifttum 216.
- TAMM 199.  
 TEMME 158.  
 Temperatureinfluß 7, 22.  
 Thermische Konstanthalter, Schrifttum  
 208.
- Thermische Spannungsgleichhalter 13.  
 Thermischer Widerstandsender 49.  
 Thoma-Regler 15.  
 TROST, A. 98.  
 TUUK VAN DER 97.
- Übertragungsentfernung 24.  
 — Schrifttum 209.  
 Ungleichförmigkeitsgradmesser 141.  
 Universaloszillograph 183.
- Vibrationsgalvanometer zur Drehzahl-  
 messung 142.  
 Vibrograph 155.  
 Vorteile elektrischer Meßgeräte 1.
- Wachsfunkenschrift 176.  
 Wachspapieraufzeichnung 174.  
 Walzenzugmesser 122.  
 Wanddickenmesser 92, 97.  
 Wasserstandgeber 70.  
 Watch Rate Recorder 200.  
 WATZINGER 132.  
 Wegmessung 67.  
 WETZER 170.  
 Widerstandsbeschleunigungsmesser,  
 Schrifttum 215.  
 Widerstandsmanometer 128.  
 Widerstandsmessung 32, 52.  
 Widerstandsender 46, 49.  
 — Schrifttum 211.  
 Wirbelstrom-Drehzahlmesser 138.
- YTTERBERG 149.
- Zählrohr 39, 97.  
 Zeigerrückstellung 17.  
 Zeitmessung 159.  
 Zeitmikroskop 198.  
 Zeitregistriergeräte 167.  
 Zeitschreiber 167, 176.  
 — Schrifttum 216.  
 Zeittransformator 195.  
 Zeitwaage, Schrifttum 216.  
 Zeitwaagen 196.  
 Zentralograph 178.  
 Zugkraftmesser 122.  
 Zylinderkondensator 56.