ATM

ARCHIV FÜR TECHNISCHES MESSEN

EIN SAMMELWERK FÜR DIE GESAMTE MESSTECHNIK
HERAUSGEGEBEN VON DR.-ING. GEORG KEINATH
UNTER MITWIRKUNG VON WILHELM GEYGER

VERLAG R. OLDENBOURG MÜNCHEN 1 UND BERLIN

LIEFERUNG 84 JUNI 1938

INHALT:

		Blatt
TEXT-BLÄTTER		T
Temperatur-Messung und -Regelung in Härteöfen	V 2172	71
Messungen an Breitband-Übertragungsleitungen .	V 3713	72...74
Geophysikalische Baugrund-Forschung	V 65	75...77
Betriebskontrolle auf Schiffen	V 8292	78, 79
Dynamische Werkstoff-Prüfung	V 9115	80, 81
Toleranz von Rechengrößen	J 021	82, 83
Eisengeschlossene Elektrodynamometer	J 741	84

SIEMENS
MESSTECHNIK

Venturi-Kanalmesser

zur Abwassermessung bei der Kläranlage Nord der Stadt Nürnberg. Der Siemens-Venturi-Kanalmesser ist das gegebene Mengen-Meßgerät für offene Gerinne oder drucklose Leitungen.

Anzeige, Aufzeichnung, Zählung und Fernübertragung der Meßwerte
Keine beweglichen Teile im Meßkanal
Geringer Gefälleverlust · Einwandfreie Messung auch bei starker Verunreinigung.

Fordern Sie Druckschrift SH 5311

SIEMENS & HALSKE AG
WERNERWERK · BERLIN-SIEMENSSTADT

14 233

LAMBRECHT

Geräte für elektrische Fernmessung

von Temperatur-Feuchte, Druck, Wind, Strömungen, Wasserstand

anzeigend - schreibend ·

Dosenmanometer für Uber- und Unterdruck

Baro-Vacuummeter

Anfragen erbeten an:

Wilh. Lambrecht, Göttingen

Gegr. 1859

Temperatur-Messung
und -Regelung in Härteöfen

V
2172–1

Verfasser: Dr. Georg Keinath, Larchmont N. Y.

DK 621.365.4:536.5

Bei der Härtung von Stahl ist zur Erzielung bester Ergebnisse die Innehaltung sehr enger Temperaturgrenzen nötig. Eine Schwankung um $\pm 5^0$ C gegen den besten Wert kann schon unzulässig groß sein, für besondere Zwecke, zum Härten von Uhrfedern aus Spezialstahl strebt man sogar die Innehaltung auf $\pm 1^0$ C an. Wenn nun das Material an sich sehr gleichmäßig ist, so daß man sicher ist, daß auch die Härtetemperatur immer dieselbe ist, kann man versuchen, diese Temperatur absolut so genau zu messen. Es wird sich dann meist um Härteeinrichtungen mit Metall- oder Salzbad handeln und um Gegenstände geringer Abmessungen, innerhalb denen keine erheblichen Temperaturdifferenzen bestehen. Durch Anwendung aller Vorsichtsmaßnahmen, z. B. Verwendung von temperaturgeregelten Behältern für die kalten Verbindungsstellen, kann man diese hohe Genauigkeit schließlich erreichen.

Wenn das Werkstück nicht in einem Flüssigkeitsbad ist, sondern in einer klaren Gasatmosphäre, so wird es oft mit einem **optischen Pyrometer** anvisiert. Die Schwierigkeiten der Strahlungspyrometrie treten zurück, wenn es sich nur um Vergleichs-Messungen handelt und außerdem die Messung an einem zunderfreien Stück in dem angenähert schwarz strahlenden Ofen ausgeführt wird. Gesamtstrahlungs-Pyrometer scheiden praktisch aus, weil ihr Gesichtswinkel für die meist kleinen Objekte zu groß ist, es kommen nur Teilstrahlungspyrometer, Glühfadenpyrometer in Betracht, mit denen man an beliebig kleinen Objekten messen kann.

Beim Härten von Stahl sind schon viele Vorschläge gemacht worden, die bei der **Umwandlungstemperatur** eintretenden physikalischen Änderungen an dem zu härtenden Gegenstand selbst für die Messung der Temperatur zu verwenden. Auf diese Weise ist man von der Genauigkeit der Thermoelemente und Instrumente vollkommen unabhängig. Eine solche Änderung ist beispielsweise das Herabsinken der Permeabilität des Eisens auf den Luftwert. Bei dem nach diesem Prinzip gebauten Härteofen nach Wild-Barfield (E. Schmidt, „Selbsttätig wirkende Härteöfen", Elektrowärme (1933), S. 176...178, DRP. 341794 vom 24. 4. 20) liegt konzentrisch zu der Heizwicklung der Muffel eine Hilfswicklung, die in eine Wechselstrombrücke geschaltet ist. Sie wird so abgeglichen, daß das Galvanometer auf Null ist, wenn kein Eisen in der Muffel ist. Bringt man nun in die geheizte Muffel ein Eisenstück, so schlägt das Instrument aus und geht erst auf Null zurück, wenn die Umwandlungstemperatur erreicht ist. Dann kippt man die Muffel, so daß das Gut in das Abschreckbad fällt. Das Verfahren ist auch bei Salzhärtung anwendbar, aber wie alle diese Verfahren, nur auf Stahl mit geringen Zusätzen an Wolfram, Chrom usw. verwendbar. Ein anderer Vorschlag ist der „pyromagnetische Indikator", ein permanenter Magnet, drehbar gelagert. Mit ihm wird das Härtegut betastet, bis der Magnet nicht mehr angezogen wird.

Das Härten von größeren Stücken, z. B. Schnittplatten, Preßformen bringt die Schwierigkeit mit sich, daß zwischen der Ofenatmosphäre und dem Werkstück, dann aber auch innerhalb des Werkstückes Temperaturdifferenzen bestehen. Die Folge davon ist, daß die Härtetemperatur nicht gleichmäßig richtig eingehalten wird und daß innerhalb des Werkstückes Spannungen entstehen, die zum Reißen führen können.

Hump-Methode. Schon vor nunmehr 25 Jahren kamen in Amerika Härteöfen auf den Markt, bei denen die richtige Härtetemperatur nach dem Umwandlungspunkt eingestellt wurde. Bei gleichbleibender Energiezufuhr wurde mit einem Thermoelement die Temperatur an dem Werkstück gemessen und mit einem Registrier-Apparat mit breitem Streifen (250 mm Nutzbreite) aufgezeichnet. Die Temperatur des eingesetzten Stahles steigt dann zunächst etwa angenähert proportional der Zeit, bis der Haltepunkt erreicht wird. Dann bleibt infolge der jetzt einsetzenden chemischen Reaktion die Temperatur eine Zeitlang konstant, und dann erst nimmt sie wieder angenähert linear zu. Der gerade Temperaturanstieg des Diagrammes hat also einen Buckel (HUMP), und danach wurde diese Methode bekannt. In der letzten Zeit ist die Temperaturmessung und -Regelung in solchen Öfen weitgehend verbessert worden.

Vapocarb-Hump-Methode. Die Wirkungsweise des neuen Verfahrens ist schematisch in Bild 1a, b, c entwickelt. Das erste Bild bezieht sich auf die alte Hump-Methode, es zeigt, wie nach dem Erreichen des Umwandlungspunktes die Temperaturspanne zwischen Werkstück und Ofenatmosphäre größer wird als sie vorher war. In dem nächsten Bild ist der Temperaturverlauf an zwei Stellen eines Werkstückes mit sehr verschiedener Stärke gezeigt. Zuerst erreichen die dünnen Teile die kritische Temperatur, dann erst die dicken. Die Folge davon sind Spannungen innerhalb des Stückes, die sich so weit auswirken, daß Teile abplatzen. Der neue Ofen arbeitet in der Weise, daß die Temperaturdifferenz zwischen Werkstück und Ofenraum angenähert konstant gehalten wird. Zu diesem Zweck sind in dem Ofen zwei Eisen-Konstantan-Thermoelemente eingebaut. Das eine wird mit dem zu härtenden Stahlstück in Berührung gebracht, das andere liegt im Ofenraum. Aus der Erfahrung weiß

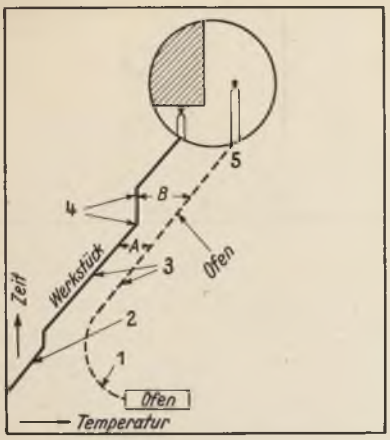


Bild 1 a. Temperaturverlauf im Ofenraum und im Werkstück bei gleichmäßiger Wärmezufuhr.
1. Das Werkstück wird in den heißen Ofen eingesetzt, die Ofentemperatur fällt.
2. Temperatur des Werkstückes steigt.
3. Beide Kurven steigen gleichmäßig mit der Zeit.
4. Werkstück kommt in die kritische Temperaturzone und verläßt sie wieder.
5. Während dieser Zeit bleibt seine Temperatur konstant, die des Ofens steigt aber weiter.
6. Die Temperaturspanne *B* ist wesentlich größer als die bei *A*.

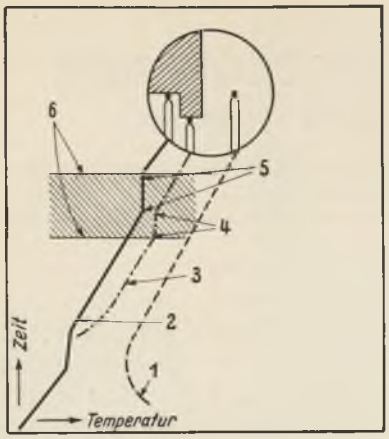


Bild 1 b. In denselben Ofen wird ein Werkzeug mit großen und kleinen Querschnitten eingesetzt.
1. Einsetzen in den Ofen.
2. Temperaturanstieg an dem großen Querschnitt, bleibt weit unter der Ofentemperatur.
3. Temperaturanstieg an dem kleinen Querschnitt, kommt der Ofentemperatur wesentlich näher.
4. Der kleine Querschnitt geht durch die kritische Temperaturzone.
5. Der große Querschnitt geht durch die kritische Temperaturzone.
6. Die verschiedenen Teile des Stückes haben die Umwandlung zu verschiedenen Zeiten durchgemacht. Demzufolge treten sehr große innere Spannungen in dem Stück auf, die zu Verwerfungen und zum vollkommenen Reißen führen.

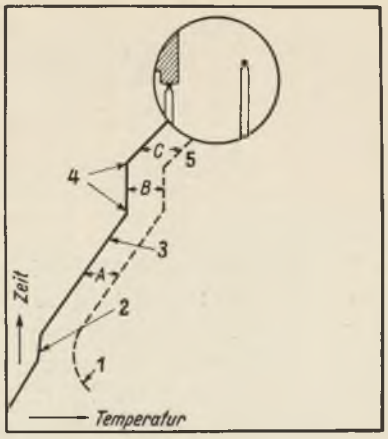


Bild 1 c. Ofen mit Leistungsregelung auf Grund der Temperaturdifferenz zwischen Ofen und Werkstück.
1. Temperatur im Ofen.
2. Temperatur im Werkstück.
3. Gleichmäßiger Temperaturanstieg in Ofen und Werkstück.
4. Werkstück passiert kritische Zone.
5. Die Heizleistung wird automatisch so reguliert, daß die Temperaturdifferenzen *A B C* gleich sind.

man, welche Temperaturdifferenz zwischen Werkstück und Ofenraum normal ist. Auf diese Temperaturdifferenz stellt dann der Härter den elektrischen Leistungsregler für den Ofen ein. Sowie jetzt dann in dem Werkstück die Umwandlungstemperatur erreicht wird, vergrößert sich die Temperaturdifferenz zwischen beiden Punkten, und die Leistungszufuhr wird abgeschaltet. Erst wenn das Werkstück mit der Temperatur nachgekommen und die Differenz kleiner geworden ist, wird weiter geheizt. Auf diese Weise wird eine sehr gleichmäßige Temperatur auch in Werkstücken mit sehr ungleichen Abmessungen erzielt.

Der Leistungsregler zur Konstanthaltung der Temperatur-Differenz ist als Zweifach-Temperaturschreiber ausgebildet. In der einen Stellung registriert er die Temperatur des Werkstückes und schreibt die „Buckelkurve", in der andern Schaltstellung mißt er die Temperaturdifferenz und schaltet die Heizung aus, wenn die Differenz zu groß ist, schaltet sie ein, wenn sie zu klein ist. Einen Ausschnitt aus einem Diagrammstreifen zeigt Bild 2. Das Herausnehmen des Stückes erfolgt eine gewisse Zeit nach dem Überschreiten der Umwandlungstemperatur. Auch hier muß man erst ausprobieren, ob vier, sechs oder mehr Schaltintervalle abgewartet werden müssen nach dem Verlassen der kritischen Temperatur. Von dieser Zeit hängt es ab, wie weit die Härtung in das Innere eindringt und ob sie überhaupt richtig ist.

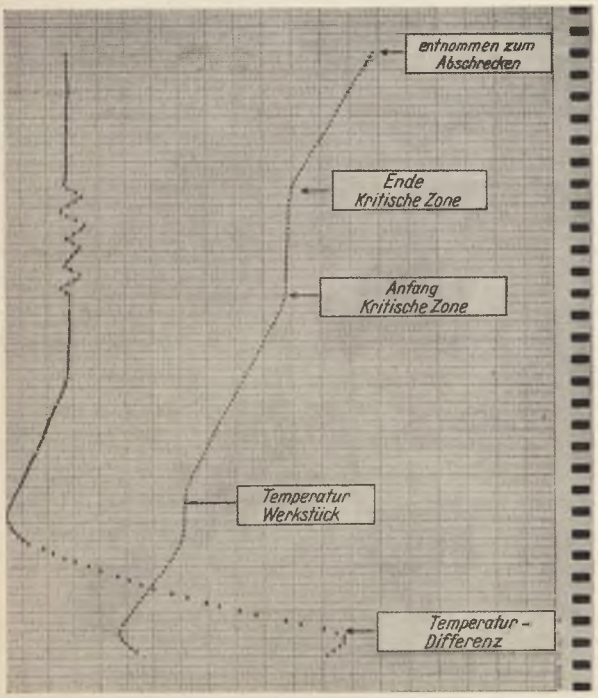


Bild 2. Ausschnitt aus einem Diagrammstreifen in etwa halber natürlicher Größe.

Bemerkungen des Verfassers. Die hier kurz beschriebene Einrichtung ist ein ausgezeichnetes Beispiel einer glücklichen Anwendung der Meß- und Regeltechnik im Betriebe: Temperaturmessung, Temperaturdifferenz-Messung, Leistungsregelung, Verwendung des Registrierstreifens zur laufenden Betriebsüberwachung. Die Einrichtung arbeitet, wie der Name andeutet, mit einem Schutzgas, das in einem besonderen Vergaser, auch mit einem zweiten Regler überwacht, durch Verdampfen einer Flüssigkeit erzeugt wird. Die Verwendung der ganzen Einrichtung bedingt ziemlich hohe Anschaffungskosten und setzt doch noch immer eine gewisse Geschicklichkeit und Intelligenz in der Benutzung voraus. Offenbar ist aber, an den erzielten Qualitätsverbesserungen gemessen, der große Aufwand gerechtfertigt. Hier wird der Registrierapparat nicht mehr als Kontrollinstrument, sondern als Hilfe für den Arbeiter benutzt. Man wird einwenden, daß es viel billiger wäre, an Stelle des Registrierinstrumentes nur einen Temperaturanzeiger zu verwenden, an dem man den Verlauf ebenso genau verfolgen kann und mit dem man die Ausgaben für das Papier spart. Hier gibt aber erst das Diagramm den Überblick, den sich kein beschäftigter Arbeiter gedanklich aus Zeigerablesungen formen kann.

Bild 2 zeigt, daß die Abschreckung bei einer Temperatur vorgenommen wurde, die ziemlich weit über der Umwandlungs-Temperatur liegt. Wenn es darauf ankommt, die Abschreckung sofort nach Überschreiten der Umwandlungs-Temperatur vorzunehmen, so könnte man das sehr gut an einem Diagramm sehen, das die Leistungsaufnahme des dann zweckmäßig kontinuierlich geregelten Ofens als Funktion der Zeit oder der Temperatur gibt. Sie wird zu einem Minimum während des Umwandlungs-Vorganges und steigt dann wieder an, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Ofen und Härtegut zu klein wird.

Messungen an Breitband-Übertragungsleitungen

V
3713–1

Verfasser: Dr. A. Jaumann, Berlin

DK 621.315.212.029.6
621.317.3

In den letzten Jahren wurden Kabel mit weitem, bis in das Hochfrequenzgebiet reichendem Übertragungsbereich entwickelt[1, 2]. Diese Breitbandkabel sind für die Übertragung von Fernsehbildern über größere Entfernungen und für das Vielfachfernsprechen bestimmt. Gegenwärtig wird in Deutschland ein Frequenzband von 90 kHz bis 4 MHz ausgenützt.

Für die Entwicklung eines neuen Zweiges der Technik ist der Stand der Meßtechnik von hervorragendem Einfluß. Aber auch die zuverlässige Betriebsüberwachung erfordert geeignete Meßgeräte. Die Breitbandübertragungstechnik war insofern in einer günstigen Lage, als sie vielfach auf Meßverfahren und bereits fertige Meßgeräte der Funktechnik zurückgreifen konnte.

Die Anwendungsgebiete der Meßgeräte sind im wesentlichen:

1. Messungen an Kabeln,
2. Messungen an Verstärkern (Filtern),
3. Betriebsüberwachung der Anlage,

womit aber keine strenge Einteilung gegeben ist, weil die gleichen Geräte in mehreren Gebieten Anwendung finden.

1. Messungen an Kabeln.

Für die Entwicklung und Fabrikationsüberwachung, also wenn es sich um Längen von wenigen 100 m handelt, sind die Scheinwiderstandsmessungen (aus denen u. a. auch die Dämpfung errechnet wird) am wichtigsten, während beim verlegten Kabel neben dem Scheinwiderstand (Wellenwiderstand) auch die unmittelbare Messung des Dämpfungsverlaufes interessiert.

Weitere Aufgaben sind die Messung des Kopplungswiderstandes und des Nebensprechens zwischen benachbarten koaxialen Kabeln.

Scheinwiderstandsmessung. Zur Trennung der Widerstands- und Ableitungsverluste werden zweckmäßig Scheinwiderstandsmessungen an kurzen Kabellängen vorgenommen, die klein gegen ein Viertel Wellenlänge sind (z. B. 10...20 m). Bei der Messung im Leerlauf erhält man praktisch den Ableitungsverlust als Verlustwinkel einer Kapazität, bei der Messung im Kurzschluß den Widerstandsverlust als Verlustwinkel einer Induktivität.

Zunächst die Leerlaufmessung: Hierfür eignen sich die üblichen Scheinwiderstandsbrücken nicht, da die zu bestimmenden Verlustwinkel sehr klein sind (bis zu $5 \cdot 10^{-5}$). Man wendet zweckmäßig ein Verlustwinkel-Meßgerät an, wobei man im Hochfrequenzgebiet häufig nach einem Resonanzverfahren arbeitet[4, 5]. Ein solches Gerät, das allgemein für die Messungen an Kondensatoren und Spulen bestimmt ist, zeigt Bild 1. Hier wird die Wirkung des angeschalteten Kabelstückes auf die Abstimmung bzw. Dämpfung eines Meßkreises festgestellt. Die Kapazität wird als Differenz zweier Kondensatoreinstellungen, die Ableitung unmittelbar an einem Normalleitwert abgelesen[10].

Das Ergebnis einer Leerlaufmessung an einem Kabelstück von 10 m Länge ist in Bild 2 wiedergegeben. Dabei wurden die an dem Meßgerät unmittelbar abgelesenen Größen aufgetragen: die scheinbare Kapazität, die fast konstant bleibt und nur gegen die „Resonanzfrequenz" des Kabelstückes hin etwas ansteigt, und der Wirkanteil des Leitwertes, der im Meßbereich um 4 Zehnerpotenzen schwankt.

Für die Kurzschluß-Messung am kurzen Kabelstück wird man zweckmäßig eine Scheinwiderstandsbrücke benutzen. Ein sehr allgemein anwendbares, auch für alle übrigen Scheinwiderstandsmessungen geeignetes Gerät ist ein Differentialbrücken-Meßplatz (Bild 3). Er ermöglicht im Frequenzgebiet von 0,1... 4 MHz die Messung unsymmetrischer oder erdsymmetrischer Meßobjekte in einem sehr großen Bereich (reelle Komponente: 0,1 Ω...100 kΩ; imaginäre Komponente: entsprechend $+1$ pF...$+1$ μF bzw. -1 pF... -1 μF). Das grundsätzliche Meßprinzip zeigt Bild 4. Den großen Meßbereich erhält man durch ein Differenzverfahren. Niederohmigen Meßobjekten wird ein geeigneter Widerstand vorgeschaltet und die Brücke zunächst bei eingeschaltetem, dann bei kurzgeschlossenem Meßobjekt abgeglichen. Aus der Differenz der Einstellungen der Normale bei diesen zwei Messungen ergibt sich der Scheinwiderstand des Meßobjektes. Hochohmigen Meßobjekten wird ein geeigneter Widerstand parallel geschaltet und die beiden Messungen werden mit an- und abgeschaltetem Meßobjekt ausgeführt. Die Vorteile des Verfahrens sind: Fortfall einer Reihe

Bild 1. Meßgerät für verlustarme Scheinwiderstände. (Siemens & Halske AG.)

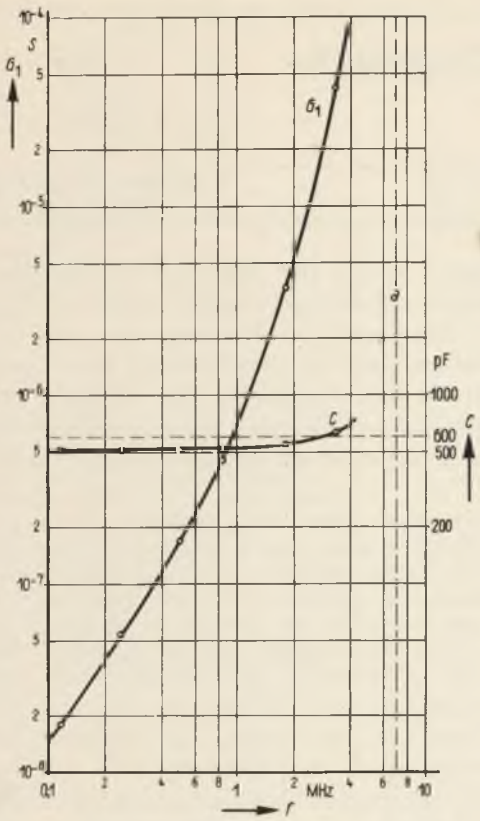


Bild 2. Leerlaufmessung an kurzer Länge ($l = 10$ m) $G_L = G_1 + j\omega C$. *a* Resonanzfrequenz.

von Fehlern bei der Differenzbildung, Beherrschung eines viel größeren Meßbereiches, als es dem unmittelbaren Bereich der Normale entspricht. Als solche dienen ein HF-Widerstand R_N und ein Meßkondensator C_N. Eine induktive Komponente des Meßobjektes wird dabei durch den „Abgleichkondensator" C_A kapazitiv gemacht[6].

Das Ergebnis einer Kurzschlußmessung mit der Differentialbrücke an einem 10 m langen Kabelstück zeigt Bild 5. Auch hier können die dargestellten Meßgrößen nicht unmittelbar den entsprechenden Kabelkonstanten gleichgesetzt werden.

Aus diesen Messungen (Bild 2 und 5) kann man für Frequenzen, die weit genug von der Resonanzfrequenz entfernt sind, sehr einfach Wellenwiderstand und Vierpoldämpfung ermitteln. Man findet z. B. für 0,4 MHz unmittelbar:

$$C = 515 \text{ pF}, \; L = 2{,}56\,\mu\text{H}, \text{ hieraus } Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 70{,}5\,\Omega$$

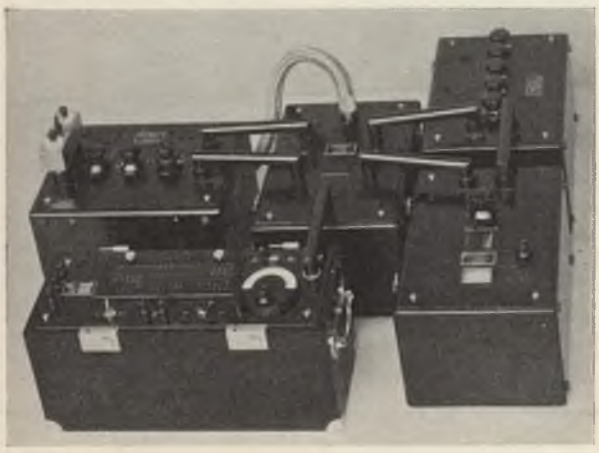


Bild 3. Differentialbrückenmeßplatz. (Siemens & Halske AG.)

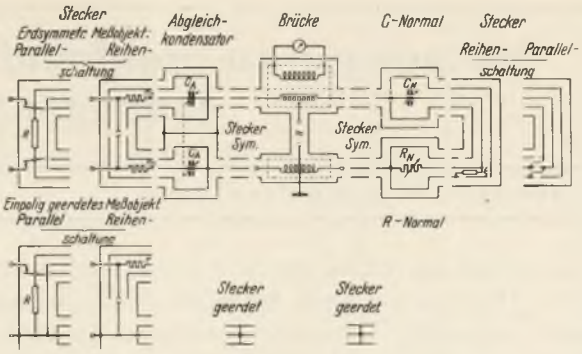


Bild 4. Schaltung und Schirmung des Brückenmeßplatzes.

Auch der gemessene Widerstandswert (Bild 5) stimmt bei dieser Frequenz praktisch noch mit dem wahren Längswiderstand überein:

$$R = 0{,}145\,\Omega.$$

Der gemessene Wirkanteil des Leerlaufsleitwertes (Bild 2)

$$G_1 = 1{,}2 \cdot 10^{-7}\,S$$

wird aber wegen der Kleinheit der wahren Ableitungsverluste schon bei dieser Frequenz durch den Widerstand des Innenleiters wesentlich erhöht. Man erhält für den wahren Ableitungsverlust:

$$G \approx G_1 - \frac{\omega^2 C^2 R}{3} = 1{,}2 \cdot 10^{-7} - 0{,}8 \cdot 10^{-7} = 0{,}4 \cdot 10^{-7}\,S.$$

Die Dämpfungen ergeben sich zu:

$$b_g = \frac{GZ}{2} = 1{,}4 \cdot 10^{-6}\,\text{N} \qquad \beta_g = 0{,}00014\,\text{N/km}$$

$$b_R = \frac{R}{2Z} = 1{,}03 \cdot 10^{-3}\,\text{N} \qquad \beta_R = 0{,}103\,\text{N/km}.$$

Man erkennt, daß die Widerstandsdämpfung weit überwiegt. Bei höheren Frequenzen, die näher an der Resonanzfrequenz des Kabelstückes liegen, muß man etwas verwickeltere Formeln anwenden, um den Widerstands- und den Ableitungsverlust aus Leerlauf- und Kurzschlußmessung richtig zu ermitteln[3].

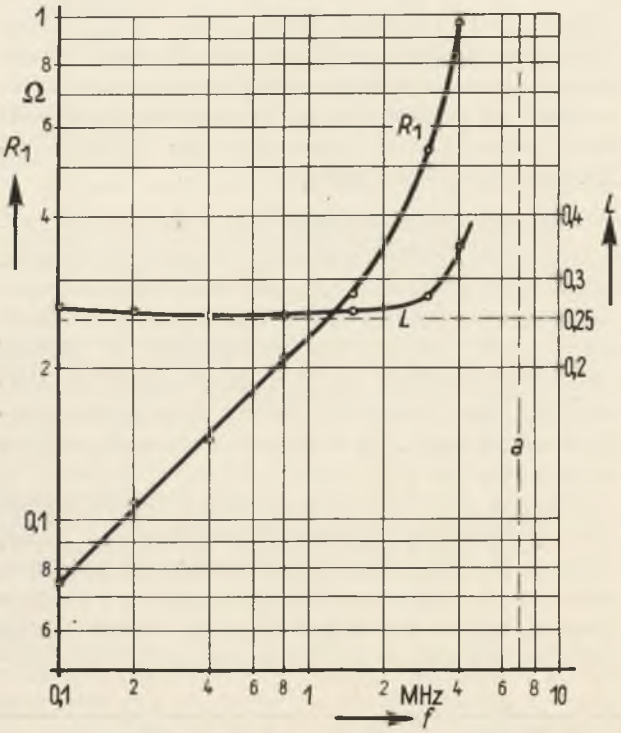


Bild 5. Kurzschlußmessung an kurzer Länge ($l = 10$ m) $\mathfrak{R}_k = R_1 + j\omega L$. *a* Resonanzfrequenz.

Neben der Messung an kurzen Kabelstücken gestattet die Leerlauf- und Kurzschluß-Messung an Fabrikationslängen (200...300 m) eine sehr genaue Ermittlung von Dämpfung und Wellenwiderstand bzw. Induktivität und Kapazität je Längeneinheit des Kabels.

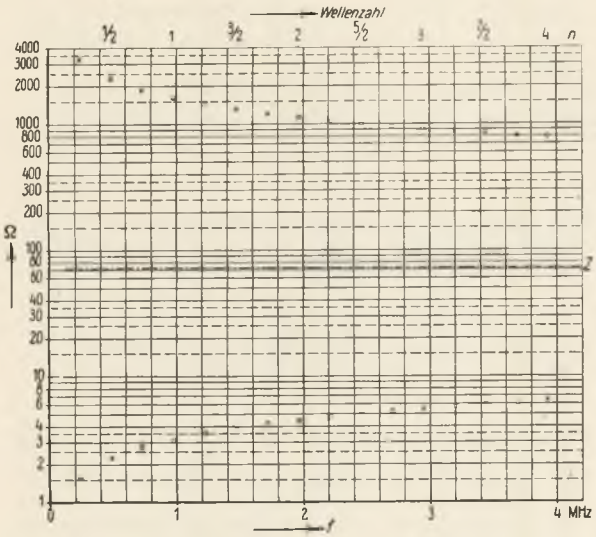


Bild 6. Scheinwiderstand eines Breitbandkabels im Leerlauf und Kurzschluß bei den „Resonanzfrequenzen". Meßlänge: $l = 285{,}3$ m. ○ Leerlauf, × Kurzschluß.

Mit dem Scheinwiderstandsmeßplatz (Bild 3) ist die Messung bei beliebigen Frequenzen möglich. (Die Frequenzeichgenauigkeit eines geeigneten Meßsenders von $\pm 0{,}5\%$ reicht für die meisten Messungen aus, so daß ein Frequenzmesser im allgemeinen entbehrlich ist.)

Für die „Resonanzfrequenzen" des Kabelstückes (d. h. wenn ein ganzzahliges Vielfaches der Viertelwellenlänge gleich der Kabellänge ist) ergeben sich im Leerlauf und Kurzschluß abwechselnd hohe und niedrige reelle Widerstandswerte, aus denen sich die Kabelkonstanten besonders einfach bestimmen lassen[3]. Auch das Meßverfahren vereinfacht sich bei dieser Messung; sie ist deshalb für die Fabrikationsüberwachung sehr geeignet. Es genügen die Brücke und zwei wahlweise anzuschaltende einfache Widerstandsnormale (Bereich: wenige Ohm bzw. einige tausend Ohm), die

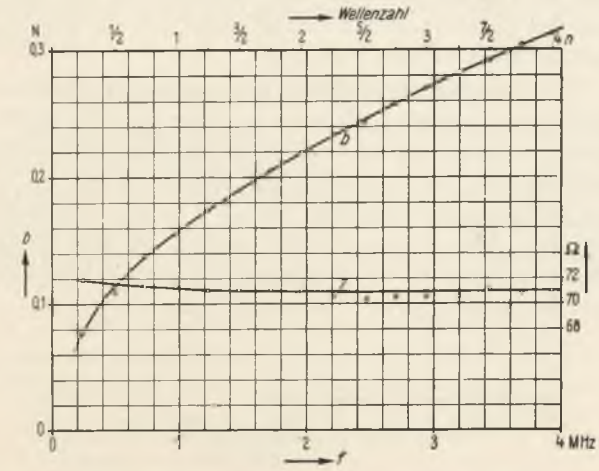


Bild 7. Leitungsdämpfung b und Wellenwiderstand Z eines Breitbandkabels errechnet auf Grund der Kurzschluß- und Leerlaufmessungen (Bild 6). Meßlänge: $l = 285{,}3$ m.

dem besonderen Verwendungszweck gut angepaßt werden können[7]. Bild 6 zeigt das Ergebnis einer Scheinwiderstandsmessung bei den Resonanzfrequenzen eines 285 m langen Kabels. Man erkennt, daß die beiden Widerstandsnormale die Bereiche 1...10 Ω bzw.

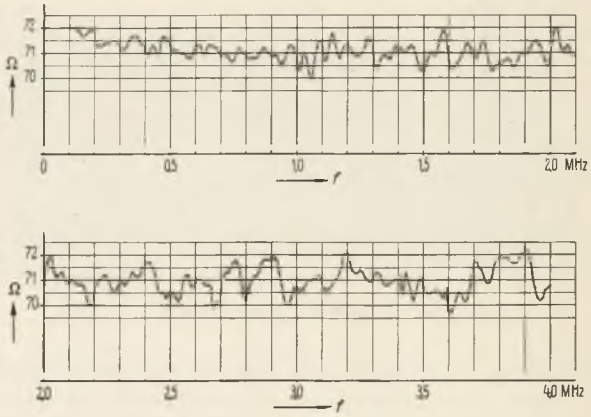


Bild 8. Wellenwiderstand einer Breitbandkabelstrecke (Kombikordel-Sickenbauart) unmittelbar gemessen.

0,5...5 kΩ überstreichen müssen. Die Meßpunkte des Bildes 6 sind in Bild 7 ausgewertet worden[3] und ergeben den Verlauf des Wellenwiderstandes und der Vierpoldämpfung.

Während die Dämpfungskurve glatt verläuft, zeigt der Wellenwiderstandsverlauf Abweichungen vom idealen Verlauf, die man hier noch als Messungenauigkeiten deuten könnte, da der Wellenwiderstand als Mittelwert zweier sehr stark abweichender Widerstandswerte bestimmt wurde. Bild 8 zeigt dagegen die unmittelbare Wellenwiderstandsmessung an einer langen Kabelstrecke (Kombikordel-Sickenkonstruktion), die mit einem Wellenwiderstand von 71 Ω abgeschlossen ist. Bei dieser Messung ist die Genauigkeit weit größer als 1%. Der Maßstab wurde entsprechend der Meßgenauigkeit so groß gewählt, daß die Schwankungen, die im Mittel nur $\pm 0{,}7\%$ betragen, deutlich sichtbar werden. Sie sind durch innere Ungleichmäßigkeiten des Kabels bedingt, die jedoch, wenn sie in so mäßigen Grenzen bleiben, praktisch überhaupt keine Rolle spielen. Doch muß die Fabrikation in dieser Richtung überwacht werden, und hierzu müssen die inneren Ungleichmäßigkeiten des Kabels auch schon an Einzellängen von 200...300 m ermittelt werden können. Dabei geht man entweder von der Feststellung der Frequenzabweichung der zugehörigen Leerlauf- und Kurzschlußresonanzfrequenzen[7] oder von dem Eingangswiderstand eines mit einem beliebigen reellen Widerstand abgeschlossenen Kabels aus[11]. Man kann aber auch den Wellenwiderstand unmittelbar unter Verwendung eines angepaßten Kabelabschlußwiderstandes messen, der für jede Länge in einfacher Weise bestimmt wird[12].

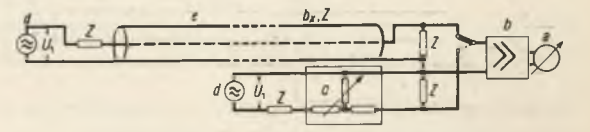


Bild 9. Messung der Betriebsdämpfung. a Pegelzeiger, b Breitbandverstärker, c HF-Eichleitung, d Sender, e HF-Kabel (oder Filter): $b_x Z$.

Dämpfungsmessung. Aus den durch Scheinwiderstandsmessung bestimmten Kabelkonstanten lassen sich Wellenwiderstand und Dämpfung des Kabels berechnen (Bild 7)[3]. Die unmittelbare Dämpfungsmessung an Fabrikationslängen wird im allgemeinen zu ungenau ausfallen. Die kilometrische Dämpfung der

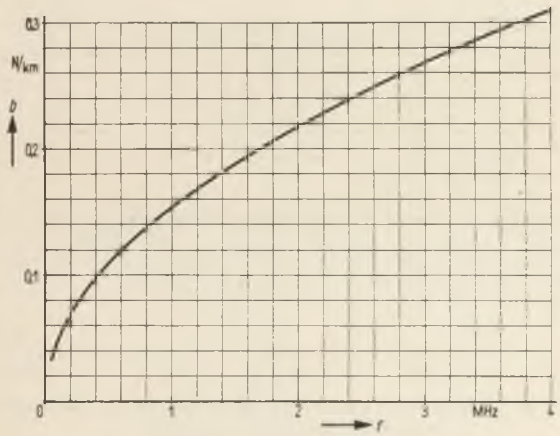


Bild 10. Leitungsdämpfung b unmittelbar gemessen (Meßlänge: 33,898 km) (Messung der DFKG).

Breitbandkabel beträgt zwischen 90 kHz und 4 MHz etwa 0,05...0,3 N/km. Für eine Länge von 200 m würde sich ergeben: 0,01...0,06 N. Die Messung so kleiner Dämpfungen wird schon wegen der unvermeidlichen Anpassungsfehler der Abschluß-Widerstände zu ungenau. Man beschränkt sich also meist darauf, die Dämpfung eines ganzen Verstärker-Abschnittes (von 17,5 km) zu messen und die Übereinstimmung mit den errechneten Sollwerten zu prüfen. Dabei wird dem Eingang des Kabels ein dem Wellenwiderstand gleicher Widerstand vorgeschaltet und an diese Reihenschaltung eine bestimmte Sendespannung U_1 (z. B. Pegel 0 : 0,775 V) gelegt. Man mißt die Ausgangsspannung U_2 des mit dem Wellenwiderstand abgeschlossenen Kabels und erhält hieraus die Betriebsdämpfung nach der bekannten Formel: $b = \frac{U_1}{2U_2}$. Für diese Messung werden am besten in der Schaltung des Bildes 9 die später beschriebenen Betriebsüberwachungsmeßgeräte benutzt: Normalgenerator, Eichleitung sowie Pegelzeiger in Verbindung mit einem Breitbandverstärker). Das Ergebnis einer solchen Streckendämpfungsmessung ist in Bild 10 dargestellt. Es stimmt gut mit den erwarteten Werten überein.

Ganz entsprechend wird auch der Dämpfungsverlauf der Filter gemessen, die zur Trennung der Fernsprech- und Fernsehströme erforderlich sind[1] und deren getrennte Verstärkung ermöglichen. An Stelle des Kabels (Bild 9) wird dann der Vierpol eingeschaltet. Man braucht dabei nur einen Meßsender, da Ein- und Ausgang des Vierpols räumlich nahe beieinander liegen.

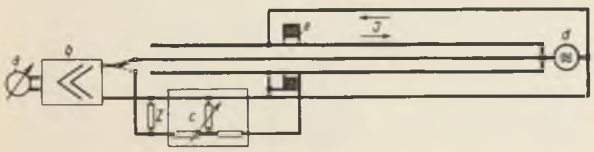


Bild 11. Messung des Kopplungswiderstandes.
a Pegelzeiger, *d* Sender,
b Breitbandverstärker, *e* Strommeßspule.
c HF-Eichleitung,

Messung des Nebensprechens. Wenn es sich um die Prüfung kurzer Kabelstücke handelt, wird man zweckmäßig den „Kopplungswiderstand" messen und hieraus die Nebensprechdämpfung berechnen[8, 9]. Der Kopplungswiderstand eines Kabels ist bekanntlich definiert als Verhältnis der Leerlaufspannung, die zwischen

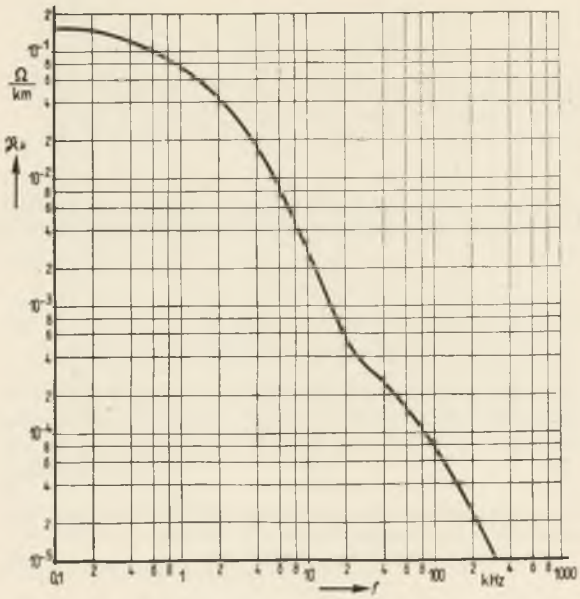


Bild 12. Kopplungswiderstand eines Breitbandkabels (gemessen an kurzem Kabelstück).

Innenleiter und Mantel des am Ende kurzgeschlossenen Kabels auftritt, wenn der Mantel vom Störstrom J durchflossen wird, zu diesem Strom. Er ist ein Maß für die Schirmwirkung des Kabels gegen äußere Störströme.

Die Meßschaltung zeigt Bild 11. Der störende Strom fließt durch ein den Mantel konzentrisch umgebendes Rohr als Hinleitung und den Kabelmantel selbst als Rückleitung. Er wird bei dieser Anordnung mit Hilfe einer Ringspule (e) gemessen. An diese ist unmittelbar ein Spannungsteiler angeschlossen, der die induzierte Spannung bis auf die Größe der Störspannung zu schwächen gestattet. Als Spannungsteiler verwendet man am besten die später beschriebene HF-Eichleitung. Man findet den Kopplungswiderstand aus der Gegeninduktanz von Schirm und Meßspule und der Einstellung der Eichleitung. Bild 12 zeigt ein Beispiel einer solchen Messung.

Für das Nebensprechen, das ja immer zwischen zwei benachbarten Leitungen in einem Kabel auftritt, kann ein resultierender Kopplungswiderstand definiert werden, als Verhältnis der Störspannung U_K in der gestörten Leitung zum Strom I in der störenden Leitung. Den Strom I mißt man z. B. mit einem Thermoumformer, die Spannung U_K durch Vergleich mit einer gleich großen bekannten Spannung.

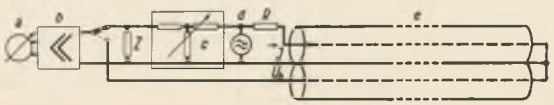


Bild 13. Messung eines resultierenden Kopplungswiderstandes.
a Pegelzeiger, *b* Breitbandverstärker, *c* HF-Eichleitung,
d Sender, *e* HF-Kabel.

Die Strommessung kann vermieden werden, wenn nach Bild 13 das Kabel über einen hohen Widerstand R gespeist wird, so daß der Strom einfach aus der Generatorspannung berechenbar ist, während die Störspannung aus der Eichleitungsdämpfung folgt[8].

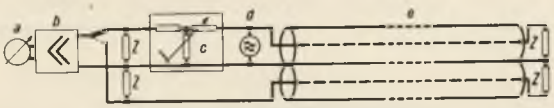


Bild 14. Messung der Nebensprechdämpfung am nahen Ende. *a* Pegelzeiger, *b* Breitbandverstärker, *c* HF-Eichleitung, *d* Sender, *e* HF-Kabel.

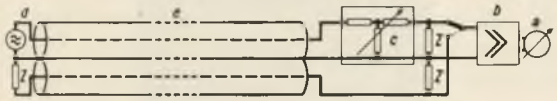


Bild 15. Messung der Nebensprechdämpfung am fernen Ende. *a* Pegelzeiger, *b* Breitbandverstärker, *c* HF-Eichleitung, *d* Sender, *e* HF-Kabel.

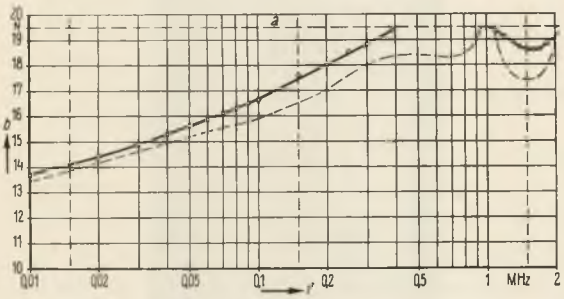


Bild 16. Nebensprechdämpfung zwischen den Kernen eines Doppelkabels. Meßlänge $l = 140$ m.
a Meßgrenze, ———○ Kurve gemessen,
— — — — Kurve aus R_k berechnet.

Eine unmittelbare Messung der Nebensprechdämpfung ist an größeren Kabellängen (Verstärkerabschnitten) nach den in Bild 14 und 15 dargestellten Schaltungen möglich[8]. Für diese Messung können, wie bei der Dämpfungsmessung, die Betriebsüberwachungsmeßgeräte benutzt werden. Bild 16 zeigt das Ergebnis einer solchen Nebensprechdämpfungsmessung und den Vergleich mit den aus dem Kopplungswiderstand des Breitband-Kernes des Kabels berechneten Werten. Die Meßstrecke ist nicht sehr lang. Die Nebensprechdämpfung an längeren Strecken unterscheidet sich aber nur mehr unwesentlich von dieser Messung. Sie wird bei tieferen Frequenzen um ca. 0,2 N niedriger.

2. Messungen an Verstärkern (Filtern).

Verstärkungsmessung. Für die Entwicklung wie für die Betriebsüberwachung der Verstärker ist die Aufnahme des Verstärkungsgrades in Abhängigkeit von der Frequenz am wichtigsten. Die wesentliche meßtechnische Aufgabe ist dabei die Herstellung einer genau definierten kleinen HF-Spannung, die dem Eingang des Verstärkers zugeführt wird.

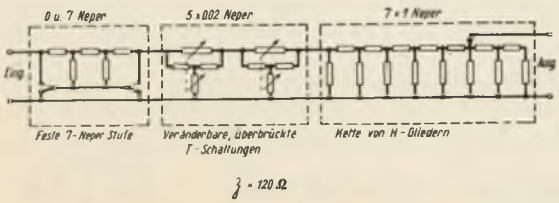


Bild 17. HF-Eichleitung (0...15 N).

Diese Aufgabe wird am besten durch eine HF-Eichleitung gelöst, deren Schaltbild in Bild 17 dargestellt ist. Der Vorteil der Eichleitungen gegenüber

Bild 18. HF-Eichleitung. (Siemens & Halske AG.)

gewöhnlichen Spannungsteilern besteht in der Möglichkeit der Staffelung der Dämpfungswerte in Stufen von z. B. ganzen, zehntel und hundertstel Neper, wodurch man im ganzen Dämpfungsgebiet eine gleichbleibende Genauigkeit und eine bequeme, direkte Ablesung der Dämpfungswerte erhält. Die vorliegende Eichleitung ist aus Karbowid-Widerständen aufgebaut. Ihr Wellenwiderstand (120 Ω) ist so gewählt, daß sich die schädliche Wirkung der Schaltkapazitäten und Induktivitäten gegenseitig kompensiert, so daß man bis 4 MHz für Dämpfungen bis 15 N eine absolute Meßgenauigkeit von ±0,02 N (2%) erhält. Bild 18 zeigt den äußeren Aufbau einer HF-Eichleitung.

Zur Einstellung bzw. Messung der Ausgangsspannung des Verstärkers kann jedes HF-Voltmeter (z. B. ein Diodenvoltmeter) benutzt werden. Man eicht das Voltmeter zweckmäßig nicht in absoluten Spannungswerten, sondern im Spannungspegel (wobei Pegel 0 = 0,775 V ist). Der Pegel −2 (etwa 0,1 V) läßt sich dann eben noch direkt ablesen. Für kleinere Pegel, wie sie etwa bei der Dämpfungsmessung des Kabels auftreten, wird zweckmäßig der Breitband-Verstärker vorgeschaltet.

Zur Verstärkungsmessung regelt man die Eingangsspannung für verschiedene Frequenzen mit der Eichleitung so ein, daß der Verstärker die normale Ausgangsspannung (z. B. Pegel +1) abgibt. Bei geeigneter Wahl der Senderspannung kann dann die Verstärkung unmittelbar in Neper an der HF-Eichleitung abgelesen werden. Bild 19 zeigt als Beispiel eine mit den beschriebenen Geräten durchgeführte Pegelmessung über 4 Verstärkerabschnitte (ca. 70 km).

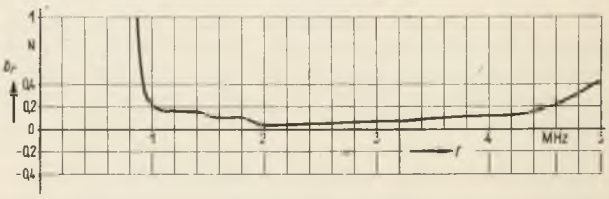


Bild 19. Restdämpfung über eine Versuchsverbindung von 4 Verstärkerfeldern (ca. 70 km).

Laufzeitmessung. Eine weitere für die Entwicklung der Verstärker und besonders der Filter und Weichen wichtige Aufgabe ist die Messung der Lauf-

zeit des Verstärkers, der Filter bzw. des ganzen Verstärkerabschnittes in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei relativ kleinen Laufzeiten, wenn außerdem Ein- und Ausgang des Vierpols räumlich beieinander liegen (z. B. bei Verstärkern und Filtern), ist es zweckmäßig, einfach den Phasenwinkel α zwischen Ein- und Ausgangsspannung des Vierpols für verschiedene Frequenzen ω zu messen und die Laufzeit auf Grund der bekannten Beziehung $\tau = \frac{d\alpha}{d\omega}$ zu berechnen.

Bei Streckenmessungen über größere Entfernungen, wobei man Laufzeiten der Größenordnung 1 ms erhält, ist dieses Verfahren nicht anwendbar, weil die Phase sich zu rasch mit der Frequenz ändert und man zu viele Meßpunkte aufnehmen müßte. Man bestimmt dann besser die Laufzeit unmittelbar gemäß ihrer Definition als Schwebungslaufzeit, indem man eine tonfrequent modulierte veränderbare Hochfrequenz f sendet und die Phasendrehung der Hüllkurve (Schwebungsfrequenz f_m) in Abhängigkeit von der Trägerfrequenz mißt. Die Phasendrehung β der Hüllkurve (also nach Gleichrichtung der Tonfrequenz f_m) ist unmittelbar ein Maß für die Schwebungslaufzeit (-Differenz) $\tau(f) = \frac{\beta(f)}{2\pi f_m}$.

Die Entwicklung derartiger Meßgeräte ist noch nicht abgeschlossen, so daß hierüber noch nichts Näheres gesagt werden kann.

3. Betriebsüberwachung der Anlage.

Die betriebsmäßige Überwachung der Leitungen besteht vor allem in täglichen Pegelmessungen der ganzen Verbindung bzw. einzelner Verstärker-Abschnitte, ferner nötigenfalls aus einer Verstärkungsmessung der Zwischenverstärker und aus Dämpfungsmessungen des Kabels, der Entzerrer und der Filter. Um diese häufigen Messungen möglichst zu erleichtern, wurden hierfür besondere Meßgeräte entwickelt. Als Meßsender dient ein Normalgenerator, der 12 feste Frequenzen (im Gebiet 90 kHz...5 MHz) bei einem Sendepegel +2 N (5,7 V) an 70 Ω (den Wellenwiderstand des Kabels) abgibt. Durch die Beschränkung auf einige feste Frequenzen, was für die Betriebsüberwachung vollständig ausreicht, wird der Aufbau und die Bedienung des Generators einfach. An den Normalgenerator kann wahlweise eine HF-Eichleitung angeschlossen werden, deren Wellenwiderstand durch Zwischenglieder auf ebenfalls 70 Ω gebracht wurde. Sie hat einen Dämpfungsbereich von 2...10 N in Stufen von 0,02 N. Als Pegelzeiger dient ein einfaches Diodenvoltmeter mit 3 Meßbereichen (Pegel: −2...+0,3; −1...+1,3; 0...+2,3 N), dessen Eingangswiderstand groß gegen den Wellenwiderstand der Leitung ist. Es wird bei Pegelmessungen an den Ausgang des Verstärkers angeschlossen. In Bild 20 ist das Meßgestell

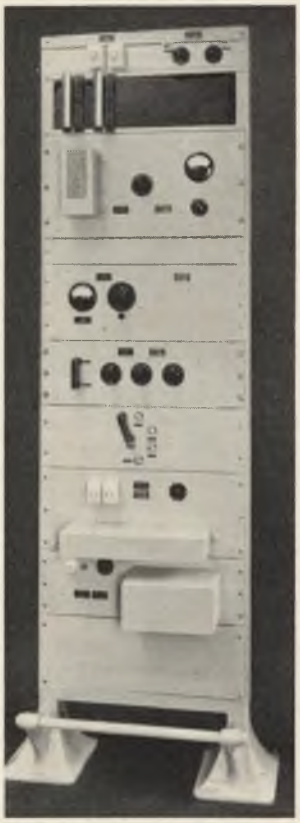


Bild 20. Meßgestell für Breitband-Übertragungsleitungen. (Siemens & Halske AG.)

wiedergegeben, das die Betriebsüberwachungsgeräte enthält. Man erkennt oben den Normalgenerator mit dem Frequenzschalter, dem Spannungsmesser und dem Regler für den Sendepegel, weiter unten den Pegelzeiger und darunter die HF-Eichleitung. Die nötigen Umschaltungen der HF-Leitungen werden mittels kurzer Verbindungsstecker durchgeführt.

Literatur.

1. H. F. Mayer und D. Thierbach, Nachrichtenübermittlung auf Breitbandkabeln VDE-Fachber. 8 (1936), S. 167. — 2. L. Espenshied und M. E. Strieby, System for Wide-Band Transmission over Coaxial Lines, Bell Syst. Techn. J. 13 (1934), S. 654. — 3. H. Kaden, Dämpfung und Laufzeit von Breitbandkabeln, Arch. Elektrotechn. 11 (1936), S. 691. — 4. W. Kieser, Hochfrequenzkabel, Felten und Guilleaume. Carlswerkrundschau 17, 18 (1936), S. 33. — 5. H. Peters, Messungen an Hochfrequenzkabeln, ATM V 376—1, April 1937. — 6. A. Jaumann, Hochfrequenz-Differentialbrücke für Scheinwiderstandsmessungen, Veröff. Nachr.-Techn. (1935), 2. Folge, Teil IX 2. — 7. H. Kaden, Verfahren zur Messung von Breitbandkabeln, Telegr.- u. Fernspr.-Techn. 25 (1936), S. 322. — 8. H. Ochem, Der Kopplungswiderstand koaxialer Leitungen, Zeitschr. f. Hochfrequenztechn. 48 (1936), S. 182. — 9. H. Kaden, Nebensprechen zwischen parallelen koaxialen Leitungen, Elektr. Nachr.-Techn. (1936), S. 389. — 10. A. Jaumann, Hochfreqenzmessungen an Spulen und Kondensatoren, Veröff. Nachr.-Techn. (1936), 2. Folge, Teil VI 3. — 11. M. Didlaukis und H. Kaden, Die inneren Ungleichmäßigkeiten von koaxialen Breitbandkabeln, Elektr. Nachr.-Techn. (1937), S. 13. — 12. H. Lintzel, Über ein Meßverfahren zur Ermittlung der inneren Ungleichmäßigkeiten der Fabrikationslängen von Breitbandkabeln, Telegr.- u. Fernspr.-Techn. (1937), S. 243. — 13. V. Gandtner, Fernsehzwischenverstärker, Telegr.- u. Fernspr.-Techn. 26 (1937), S. 37. — 14. Fr. Vogel und U. Hennecke, Meßgeräte für Breitbandsysteme, Veröff. Nachr.-Techn. (1936), 4. Folge, S. 273. —

Geophysikalische Baugrund-Forschung

V
65 – 7

Verfasser: Bruno Marsch, Berlin

DK 550.83

Die angewandte Geophysik hat zur Erforschung der obersten Schichten der Erdkruste eine Reihe von Verfahren entwickelt, die hauptsächlich in den Dienst des Bergbaues, der Geologie, der reinen Geophysik und der Schatzsuche gestellt sind. Die Möglichkeit der Aufhellung des verborgenen Untergrundes beruht auf den schwankenden physikalischen Eigenschaften der geologischen Körper. Es sind in der Hauptsache die folgenden Parameter, die auch die Einteilung der Methoden in Gruppen bedingen:

1. das spezifische Gewicht (gravimetrische Verfahren),
2. die magnetische Suszeptibilität (magnetische Verfahren),
3. der Emanationsgehalt der Bodenluft (radioaktive Verfahren),
4. der spezifische elektrische Widerstand (geoelektrische Verfahren),
5. die Schallgeschwindigkeit (seismische Verfahren).

Es soll zunächst erörtert werden, ob und wieweit sich diese für die obengenannten Zwecke entwickelten Verfahren auf die Baugrund-Forschung übertragen lassen.

I. Bei den **gravimetrischen Verfahren** werden die Störungen des normalen Schwerefeldes festgestellt, die durch die Unterschiede des spezifischen Gewichtes im Aufbau des Untergrundes verursacht werden. Sie können durch die Messung des Absolutwertes der Schwerkraft, der Abweichungen von ihrem Normalwert oder des Gradienten des Schwerepotentials ermittelt und ausgewertet werden. Die entsprechenden Instrumente sind Pendelapparate, Gravimeter und Drehwaagen.

Die gravimetrischen Messungen ergeben ein abgerundetes Bild der Strukturen des Untergrundes, weil der ermittelte Effekt die Integralwirkung aller Raumteile am jeweiligen Meßpunkt darstellt und weil sich die Schwankungen der spezifischen Gewichte der Gesteine laut beistehender Tabelle 1 in engen Grenzen bewegen.

Tabelle 1.

Moor	1,0
Trockene, lockere Ackerkrume	1,1
Humusdecke	1,4 (1,2 ...1,7)
Ackerboden	1,7 (1,5 ...1,9)
Sandiger Lehm	1,9 (1,6 ...2,1)
Feuchter Kies	2,0 (1,9 ...2,1)
Schotter mit Sand	2,1 (2,0 ...2,2)
Kalkstein	2,73 (2,68...2,84)
Mergelschiefer	2,67 (2,56...2,75)
Tonschiefer	2,65 (2,51...2,72)
Ton	2,46 (2,35...2,64)
Sandstein	2,65 (2,59...2,72)
Geschiebemergel	2,66 (2,66...2,71)
Löß	2,64
Lehm	2,58

Berücksichtigt man noch dazu, daß im bewegten Gelände mühselige topographische Korrekturen an den Meßwerten angebracht werden müssen, so erscheinen die gravimetrischen Methoden für die Baugrund-Forschung, die die Detailerforschung eines begrenzten Gebietes auf schnellem Wege verlangt, nur wenig geeignet.

II. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei den **magnetischen Verfahren,** da die Suszeptibilitätsschwankungen der Gesteine auch zu gering sind, wenigstens sofern man die eisenhaltigen ausnimmt, die als Baugrund nicht in Betracht kommen. Die Eruptivgesteine mit größerer Suszeptibilität, die manchmal als Baugrund von Talsperren u. ä. aufzusuchen sind, lassen sich mit größerer Sicherheit durch seismische oder geoelektrische Verfahren erfassen. Daran ändert nichts der Umstand, daß die zur Untersuchung dienenden Meßgeräte (magnetische Variometer) einfach zu handhaben sind.

III. **Radioaktive Verfahren.** In tiefgehenden Spalten oder Verwerfungen tritt oft eine Anreichung von Emanation auf. Ist der Ausbiß der Spalte an der Erdoberfläche nur von wenigen Metern Erdreich bedeckt, so läßt sich die Emanation und damit die Spalte mittels Elektrometer, dem man die Bodenluft zuführt, nachweisen (Bild 1). Für Untersuchungen an Baugeländen

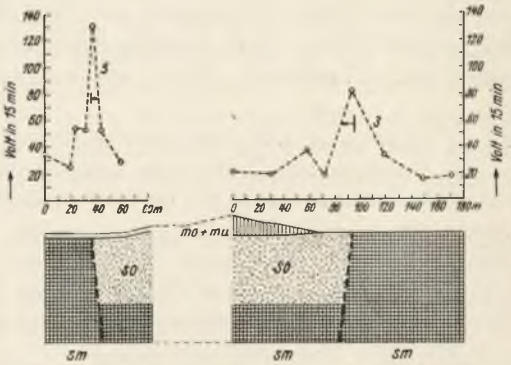


Bild 1. Profile der Radioaktivität der Bodenluft über Verwerfungen in Thüringen. (Nach F. Müller.)

kann dieses Verfahren, das ganz bestimmte tektonische Verhältnisse voraussetzt, naturgemäß nur in Sonderfällen und als Ergänzung anderer Methoden von Nutzen sein.

IV. **Geoelektrische Verfahren.** Von einem Teil der Erze und von Kohle abgesehen, sind trockene Gesteine praktisch Isolatoren. Für ihren elektrischen Widerstand

bleiben also Porenvolumen, Grad der Durchfeuchtung sowie Art und Menge der im Grundwasser gelösten Salze maßgebend. Porenvolumen und Durchfeuchtung stehen in unmittelbarem Zusammenhang, gleichzeitig ist das Porenvolumen aber eine spezifische Eigenschaft des betreffenden Gesteins, während das Grundwasser für die zu untersuchenden verhältnismäßig kleinen Gebiete meist dieselbe chemische Zusammensetzung haben wird. Sundberg untersuchte die Beziehung zwischen Durchfeuchtung und spezifischem Widerstand, wobei er zu dem in Bild 2 dargestellten Resultat gelangte. So ist beispielsweise bei einer Durchfeuchtung von 30% der spezifische Widerstand des Erdreichs etwa fünfmal so groß wie derjenige des Grundwassers allein.

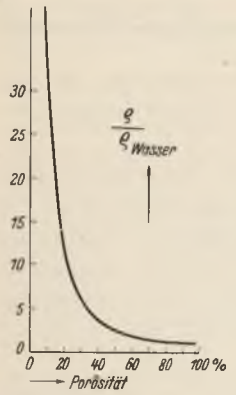


Bild 2. Beziehung zwischen spezifischem Widerstand und Porösität eines mit Grundwasser getränkten Erdreichs. (Nach K. Sundberg.)

Meßtechnisch läßt sich der spezifische Widerstand aber nicht durch Strom- und Spannungsmessung an zwei Elektroden erfassen, da hierbei der Übergangswiderstand an den Elektroden mit in die Messung eingehen würde. Man muß vielmehr einen seiner Intensität nach bekannten Strom durch die Erde schicken und aus dem dadurch entstehenden Potentialfeld an der Oberfläche rückwärts auf den Widerstand schließen. Da der Untergrund nie homogen ist, kann eine solche Messung jeweils nur einen scheinbaren spezifischen Widerstand ergeben, der sich aus den spezifischen Einzelwiderständen zusammensetzt, aus denen der von der Elektrodenanordnung räumlich erfaßte Teil des Untergrundes besteht. Aus einer Anzahl Werte für den scheinbaren spezifischen Widerstand an einer Reihe von Meßpunkten können dann Anhaltspunkte für Einlagerungen unterschiedlichen Widerstandes gewonnen werden.

Aus der großen Anzahl von geoelektrischen Methoden, die meistens zum Aufsuchen von Erzkörpern entwickelt worden und daher für die hier in Betracht gezogenen Untersuchungen nicht geeignet sind, fällt das Wenner-Vierpunktverfahren wegen seiner speziellen Eignung für geschichteten Untergrund, der Möglichkeit der quantitativen Auswertung und seiner einfachen praktischen Durchführung heraus.

Wird dem Erdboden mittels zweier Punktelektroden P_1 und P_2, die sich an der Oberfläche befinden, ein Strom I zugeführt, so ist bei homogenem Erdreich das Potential an einem beliebigen Punkt

$$E = \frac{I\varrho}{2\pi}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right),$$

wobei r_1 und r_2 die Entfernungen dieses Punktes von P_1 bzw. P_2 und ϱ der spezifische Widerstand des Erdreichs bedeuten. Zwischen diesem Punkt und einem andern mit den Abständen s_1 bzw. s_2 von P_1 und P_2 und dem Potential E_1 bildet sich also die Spannungsdifferenz

$$E - E_1 = \frac{I \cdot \varrho}{2\pi}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2}\right),$$

aus der sich

$$\varrho = \frac{E - E_1}{I} 2\pi \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2}}$$

ergibt. Alle Werte der rechten Seite der Gleichung und somit ϱ lassen sich an der Erdoberfläche feststellen. Die Spannungsdifferenz $E - E_1$ muß jedoch ohne Stromentnahme gemessen werden, da sonst Rückwirkungen auf das elektrische Feld im Boden auftreten.

Ordnet man die erforderlichen vier Elektroden auf einer geraden Linie und mit gleichen Abständen a voneinander an, so geht die genannte Formel für ϱ über in

$$\varrho = 2\pi a \frac{E - E_1}{I}$$

und ergibt damit den scheinbaren spezifischen Widerstand des Raumes zwischen den Innenelektroden bis zu einer Tiefe gleich dem ungefähren Elektrodenabstand a.

Liegt in einer bestimmten Tiefe eine Schicht mit anderem spezifischen Widerstand, so macht sie sich durch eine Verzerrung des Potentialfeldes bemerkbar (Bild 3). Hummel hat das Problem des geschichteten Untergrundes mathematisch behandelt und dabei allgemeine Kurven ermittelt, die durch Vergleich mit der durch Feldmessungen gewonnenen eine Auswertung nach dem spezifischen Widerstand der Einzelschichten und deren Tiefe bzw. Mächtigkeit ermöglichen.

Bei der praktischen Anwendung dieses Verfahrens unterscheidet man zwei prinzipiell verschiedene Methoden, das Sondieren und das Kartieren.

Beim Sondieren steht die Meßapparatur fest an dem Punkt, unter dem die Schichtenfolge bestimmt werden soll. Man mißt dann, indem man mit kleinen Elektrodenabständen a beginnt und sie durch gleichzeitiges Umstecken aller vier Elektroden allmählich bis zu dem Wert vergrößert, der zur Erfassung der gewünschten Tiefe erforderlich ist. Man trägt dann ϱ in Abhängigkeit von a auf und wertet die resultierende Kurve, wie bereits gesagt, durch Vergleich mit den Hummel-Normalkurven aus. Ein derartiges Meßresultat ist in Bild 4 dargestellt. Zur Bestimmung der Schichtgrenzen für einen ganzen Baugrund wird man zweckmäßig eine Anzahl solcher Profile ausmessen. Dabei genügt es oft, einige wenige Profile genau und die übrigen nur durch Vergleich der Wendepunkte der Widerstandskurven auszuwerten, die zu a und demnach zur Schichttiefe in Beziehung stehen. Die Auswertung erfolgt dabei immer unter Voraussetzung horizontal gelagerten Untergrundes. Bei kleinen Neigungen,

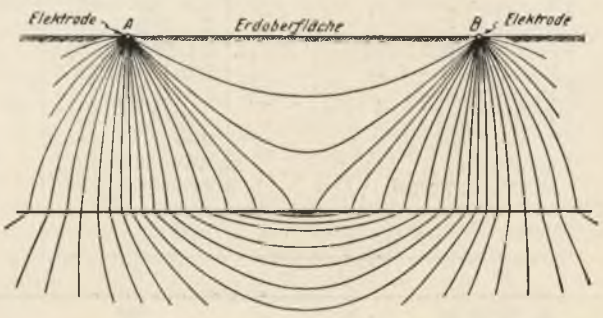


Bild 3. Verlauf der Stromlinien im horizontal geschichteten Untergrunde, falls die untere Schicht fünfmal so gut leitet wie die obere. (Nach J. N. Hummel.)

für die diese Methode noch zulässig ist, erhält man Mittelwerte. Durch Einfügen einer fünften Elektrode in der Mitte der ganzen Anordnung und durch Bestimmung der Potentialdifferenz zwischen dieser und jeder der beiden inneren Elektroden läßt sich auch die Einfalls-Richtung der verdeckten Schichten ermitteln.

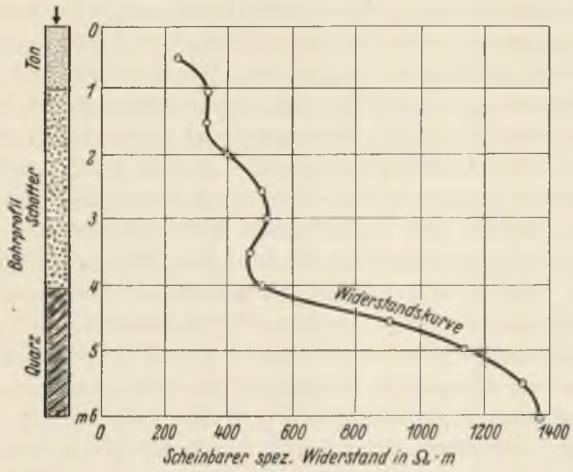


Bild 4. Tiefensondierung zur Bestimmung der Felsbedeckung. (Nach C. Schlumberger.)

Beim Kartieren hingegen behält man für das zu untersuchende Gebiet denselben, einmal durch Sondieren als günstig festgestellten Elektroden-Abstand bei und mißt den scheinbaren spezifischen Widerstand bei konstanter Tiefenwirkung. Bei gleichbleibender Schichtenfolge hängt sein Wert nur von der Mächtigkeit der Deckschicht ab. Die sich beim Kartieren ergebenden Linien gleichen Widerstandes laufen ähnlich wie topographische Höhenlinien des gesuchten Schichtenkontaktes.

Verwendet man zu Widerstandsmessungen Gleichstrom, so muß man, um die durch chemische Vorgänge im Erdboden ausgelösten natürlichen Gleichpotentiale zu eliminieren, jeden Wert zweimal messen, davon einmal bei gleichzeitiger Umpolung von Strom und Spannung, und den Mittelwert bilden. Den für Strom und Spannung gemeinsamen Umpoler kann man auch als Rotationsumschalter ausbilden und durch einen kleinen Motor antreiben. Dadurch fallen die Störspannungen heraus und man kommt mit einer Messung aus. Noch besser ist die Verwendung sinusförmigen Stromes statt dieses in Wechselstrom mit rechteckiger Kurvenform umgewandelten Gleichstromes, weil dadurch die Schaltstöße vermieden werden. Bild 5 zeigt ein solches Wechselstromgerät, bei dem der Elektrodenstrom durch einen kleinen, eingebauten Handgenerator erzeugt wird und über einen Wandler gleichzeitig die für die Potentialmessung an den inneren Elektroden erforderliche Gegenspannung in der richtigen Phasenlage liefert. Hierdurch wird es möglich, das Gerät in Ohm zu eichen, so daß der abgelesene Wert nur mit dem geometrischen Faktor der Elektrodenanordnung multipliziert werden braucht, um den spezifischen Widerstand zu ergeben.

Bild 5. Wechselstrom-Kompensationsgerät mit eingebautem Handgenerator zur Bestimmung des scheinbaren spezifischen Widerstandes im Untergrunde.

V. **Seismische Verfahren.** Wird dem Erdboden in einem Punkte an der Oberfläche durch einen Schlag oder eine Explosion eine Erschütterung erteilt, so pflanzen sich von hier aus nach allen Richtungen Wellen verschiedener Geschwindigkeit und verschiedenen Charakters fort. Für die drei Hauptwellenarten ergeben sich dabei folgende Fortpflanzungsgeschwindigkeiten: für die Longitudinalwelle

$$v_l = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{E}{\sigma}},$$

für die Transversalwelle

$$v_t = \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)} \cdot \frac{E}{\sigma}},$$

für die Oberflächenwelle

$$v = 0{,}9194 \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)} \cdot \frac{E}{\sigma}}.$$

Sie hängen also von dem Elastizitätsmodul E, dem spezifischen Gewicht σ und der Poisson-Zahl ν ab. Da das spezifische Gewicht und die Poisson-Zahl bei den Gesteinen nur wenig schwanken, bleibt in erster Linie der Elastizitätsmodul für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit maßgebend. Die folgende Tabelle 2 zeigt die in der Praxis auftretenden großen Schwankungen in der Geschwindigkeit, die dem seismischen Verfahren seine Sicherheit der Deutung geben:

Tabelle 2.

Gestein	Geschw. d. longit. Welle v = m/s
Lockerer Gehängeschutt	600...800
Sand (alluvial und diluvial)	850...1000
Süßwasser	1435
Diluvialer Ton	1600...1800
Sandsteine	2300...3000
Tonschiefer	4800...5300
Quarzschiefer	5500
Kreidiger Kalk	3500
Feinkörniger Kalk	4600
Kristalline Kalke	4600...5600
Granite	5000...5500

Lose, aufgeschüttete Sande haben Geschwindigkeiten, die noch weit unter denen der Tabelle liegen und von Fall zu Fall verschieden sind.

Beim Durchgang durch die verschiedenen Schichten des Untergrundes werden die Impulse nach den Gesetzen der Akustik und Optik gebrochen, absorbiert

und reflektiert. Im Oszillogramm an einem Meßpunkt erscheinen dementsprechend mehrere Welleneinsätze, deren erster von den schnellen Longitudinalwellen herrührt. Da dieser Einsatz am klarsten herauskommt und die longitudinalen Wellen außerdem weniger absorbiert werden, zieht man hauptsächlich sie zur Auswertung heran.

Grundsätzlich können zwei Methoden zur Anwendung kommen, die Reflexions- oder die Refraktions-Methode.

Das Reflexionsverfahren ist ein Analogon zum Behm-Echolot zur Bestimmung der Meerestiefen. Voraussetzung einer derartigen Messung ist die Reflexionsfähigkeit des gesuchten Schichtenkontaktes im Untergrund. Das Verfahren ist jedoch nur für solche Tiefen anwendbar, die die Baugrund-Forschung nicht mehr interessieren.

Das Refraktionsverfahren dagegen ist für die Gründungstechnik von Wichtigkeit, da es besonders bei geringen Tiefen leicht anwendbar ist. In Bild 6 sind zwei horizontale Schichten dargestellt, eine Deckschicht und darunter eine härtere, deren Schallgeschwindigkeiten sich wie 1:2 verhalten. Im Punkt *A* wird eine Sprengladung zur Explosion gebracht. Der dadurch hervorgerufene Verdichtungsstoß breitet sich zunächst halbkugelförmig durch die Deckschicht aus. Nach einiger Zeit erreicht er die Oberfläche der zweiten Schicht, in der er sich nun mit der doppelten Geschwindigkeit fortpflanzt. Im weiteren Zeitverlauf überholt die Stoßwelle in der tieferen Schicht diejenige, die sich in der Deckschicht ausbreitet, wobei sie auf die obere Schicht zurückwirkt und durch sie wieder an die Oberfläche gelangt. Die in Bild 6 gewählte Darstellungsart des Impulsfeldes ist die nach Ansel. Trägt man die Ankunftszeiten des den Meßpunkt zuerst erreichenden Impulses graphisch auf, so erhält man die Laufzeitkurve, die zur Auswertung benutzt wird. Sie hat zunächst einen Ast, der der Geschwindigkeit in der Deckschicht entspricht, und setzt sich dann nach einem scharfen Knick in einem Ast entsprechend der Geschwindigkeit in der tieferen Schicht fort. Die Laufzeit und die Entfernung vom Schuß bis zum Knickpunkt dienen zur Berechnung der Mächtigkeit der Deckschicht. Ein anderer Weg besteht darin, den Impuls nach Art des Bildes 6 graphisch rückwärts zu verfolgen und daraus die Struktur des Untergrundes zu rekonstruieren.

Der dargestellte Fall ist der einfachste, der möglich ist. Es können mehrere Schichten vorhanden sein, meistens ist aber die gesuchte Kontaktfläche nicht eben und dazu noch horizontal gelagert. Neigungen der Schichtgrenze z. B. ergeben scheinbare höhere oder niedrigere Geschwindigkeiten als die wirkliche der tieferen Schichten. Erst durch Ausmessen der Laufzeitkurve in zwei entgegengesetzten Richtungen erhält man die wirkliche Geschwindigkeit und zugleich die Schichtneigung. Stufen und Verwerfungen ergeben Knicke in der Laufzeitkurve.

Da die Geschwindigkeit, mit der sich der Impuls fortpflanzt, vom Elastizitätsmodul des durchlaufenen Gesteins abhängt, und dieser wiederum ein Maß für die Verfestigung darstellt, entspricht die gemessene Fortpflanzungsgeschwindigkeit direkt der Festigkeit des Untergrundes, dem Parameter also, den man durch die Baugrund-Untersuchung ermitteln will. Die prak-

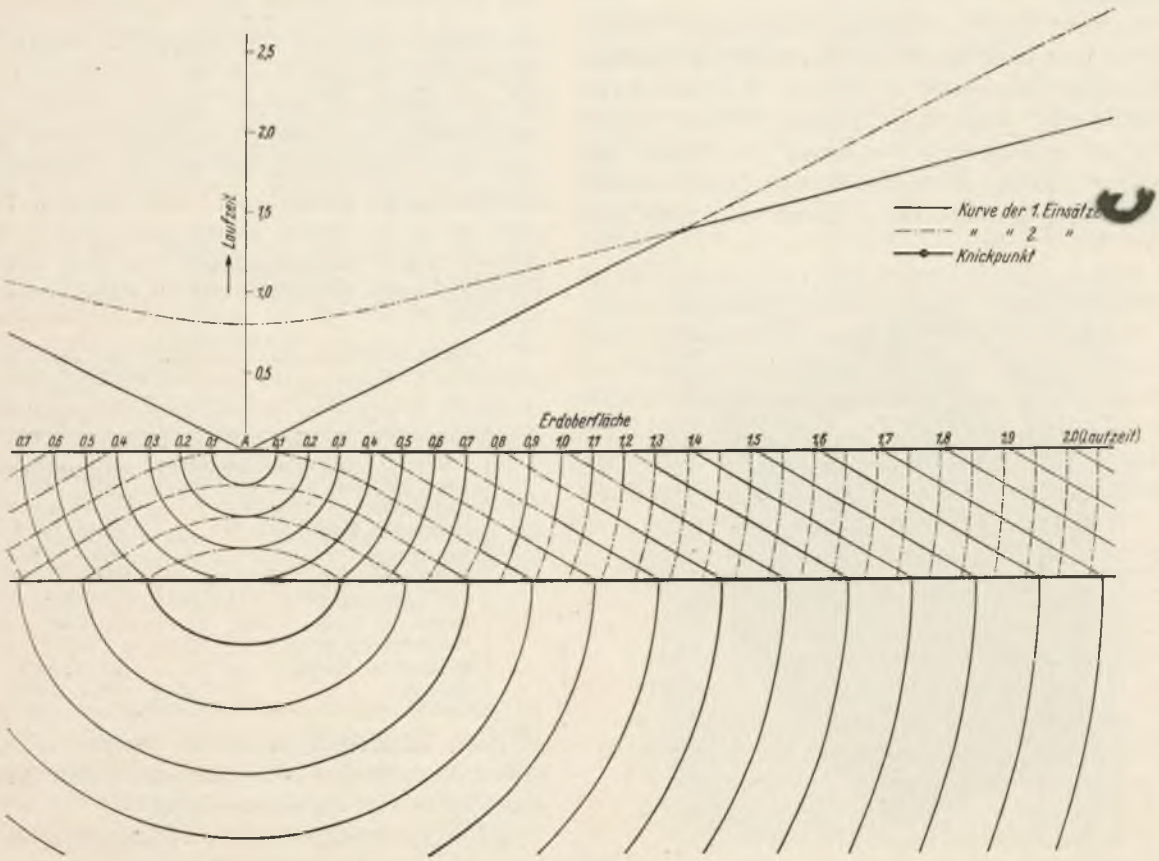


Bild 6. Verlauf der Schallwellen in zwei Schichten, wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der tieferen Schicht doppelt so groß ist wie in der oberen.

tische Anwendung des seismischen Refraktionsverfahrens zu diesem Zweck ist einfach. Die dazu notwendigen Erschütterungen können durch Schläge und bei größeren Tiefen durch kleine Sprengungen erzeugt werden. Die Meßapparatur besteht zweckmäßig aus mehreren Erschütterungsmessern mit einer gemeinsamen Bedienungsschalttafel und einem tragbaren Mehrfach-Oszillographen. Die Erschütterungsmesser müssen die Einsätze ohne jede Verzögerung wiedergeben. Die Dämpfungen und die Eigenfrequenzen der Erschütterungsmesser müssen so liegen, daß die Bodenbewegung in dem in Frage kommenden Bereich (etwa 20...100 Hz) möglichst verzerrungsfrei registriert wird. Die ganze Apparatur muß wegen der während der Untersuchung geforderten Beweglichkeit klein und leicht sein. Alle Erschütterungsmesser arbeiten am besten auf denselben Filmstreifen, der mit einer solchen Geschwindigkeit laufen muß, daß man eine Millisekunde an der Zeitmarkierung noch ablesen kann. Ferner muß der genaue Zeitpunkt des Schlages oder der Sprengung vom Oszillographen mitaufgezeichnet werden. Hierzu dient ein Draht, der durch den Schlag oder die Sprengung zerrissen wird und dadurch einen Stromkreis öffnet, der zum Oszillographen führt. Die Aufnahme einer Sprengung sieht dann etwa folgendermaßen aus (Bild 7):

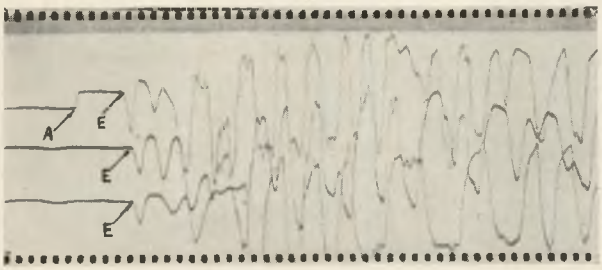


Bild 7. Aufnahme einer Sprengung.
A Augenblick des Schusses, *E* Einsätze der Schallwellen an mehreren Aufnahmeorten.

Als Erregung des zu untersuchenden Baugrundes lassen sich auch zwei exzentrisch gelagerte, gegenläufige Massen gleichen Gewichtes verwenden, die dem Boden eine sinusförmige Vertikalbewegung erteilen, deren Frequenz man in gewissen Grenzen (etwa 10...60 Hz) verändert. Zur Auswertung benutzt man diesmal die Phasensprünge, die Wellenlänge und die Amplituden der Oberflächenwelle. Da man nicht wie bei einer schlagartigen Erschütterung einen einmaligen Impuls hat und die verschiedenen aufgezeichneten Einsätze ihrer Art und ihrem durchlaufenen Weg nach unterscheiden kann, wird die Auswertung etwas komplizierter. Die dazu notwendige Apparatur bleibt grundsätzlich dieselbe wie bei der Vermessung durch schlagartige Erschütterungen.

Bisherige Anwendungen. Entsprechend ihrer besonderen Eignung sind bisher für die zur Erörterung stehenden Untersuchungen besonders die elektrischen Widerstands- und die seismischen Verfahren herangezogen worden. Hier liegen u. a. interessante Ergebnisse von Schlumberger und dem U.S.Bureau of Public Roads vor.

Vor dem Bau des Beauharnois-Kraftwerkes am St.-Lorenz-Strom in Kanada mußte die Oberfläche des von einer durchschnittlich 25 m mächtigen Diluviumschicht bedeckten Felsuntergrundes sehr genau bestimmt werden. Das Gelände (Bild 8) war 40 ha groß und mußte aus bestimmten Gründen innerhalb eines Monats untersucht werden. Hierfür wurden zwei Meßtrupps, bestehend aus je einem Meßtechniker und zwei

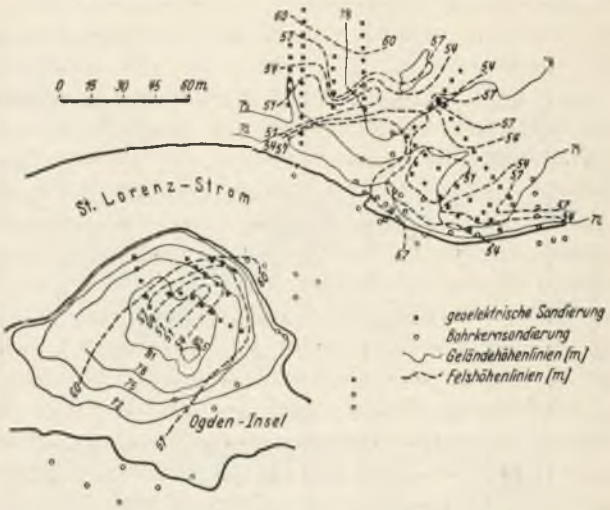


Bild 8. Geoelektrische Bestimmung der Felsbedeckung bei der St.-Lorenz-Talsperre. (Nach C. Schlumberger.)

Gehilfen, angesetzt, die insgesamt 180 Tiefensondierungen durchführten, also je drei pro Tag. Zur Kontrolle der Ergebnisse wurden vier Bohrungen angesetzt, die in folgender Tabelle 3 den Meßergebnissen gegenübergestellt werden.

Tabelle 3.

Bohrloch Nr.	Höhe über N.N. der Felsoberfläche		Fehler der elektrischen Messung
	erbohrt m	gemessen m	%
1	56,8	58,6	— 8
2	60,7	62,2	— 9
3	51,5	51,8	— 2,5
4	59,2	60,2	— 6,8

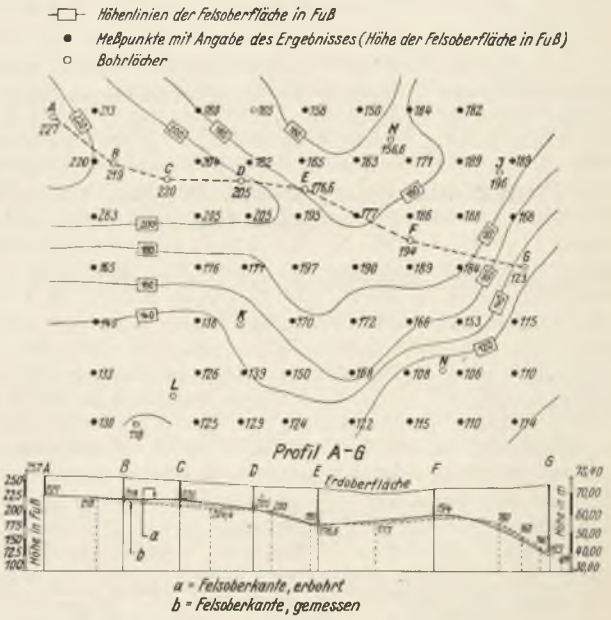


Bild 9. Geoelektrische Untersuchung und ihre Ergebnisse an der Ariel-Staumauer in USA. (Nach C. Schlumberger.)

Der gesamte Kostenaufwand der geschilderten Untersuchung belief sich auf nur 40000 Mark.

Ein weiteres gutes Beispiel ist das der Untersuchung an der Staumauer von Ariel in USA., von dem ein Teil in Bild 9 dargestellt ist. Auf Grund der Resultate wurde eine Reihe von Kontrollbohrungen *A* bis *G*

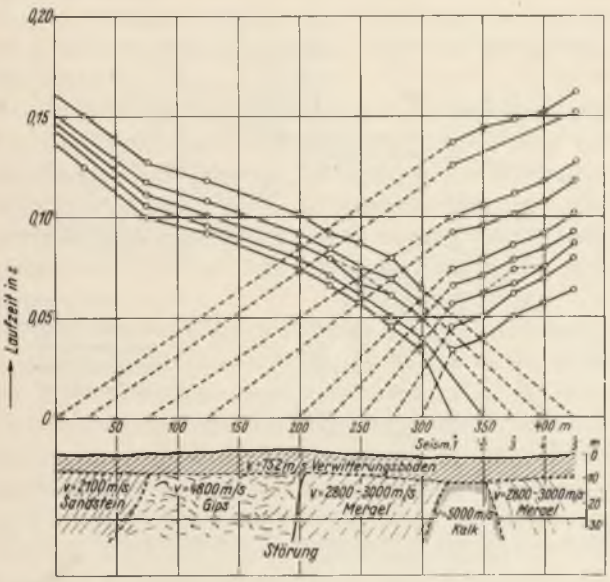


Bild 10. Beispiel einer seismischen Untersuchung. (Nach einem Prospekt der „Prospektion" in Göttingen.)

durchgeführt, die auf der Linie liegen, auf der später, entgegen dem ursprünglichen Plan, die Staumauer gebaut wurde. Durch die Änderung des Bauplanes auf Grund der geophysikalischen Meßergebnisse wurde eine Verbilligung von 1½ Mill. RM. erzielt, während die Kosten aller Schürfarbeiten einschließlich Bohrungen ½ Mill. RM. betrugen. Über die Anwendung der seismischen Methode mit schlagartigen Erschütterungen in der Bautechnik liegen hauptsächlich amerikanische Veröffentlichungen vor. Bild 10 und 11 geben zwei bekannte, mit diesem Verfahren gewonnene geologische Profile wieder, die deutschen Arbeiten entnommen sind. Für den Bautechniker dürften diese Verfahren besonders interessant sein, da sie ihm in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit elastischer Wellen ein Maß für die Festigkeit des Untergrundes geben. Die Einführung dieser Methode in die Gründungstechnik dürfte hauptsächlich die Frage der Schaffung einer geeigneten Schießeinrichtung sein, die ein schnelles Arbeiten und

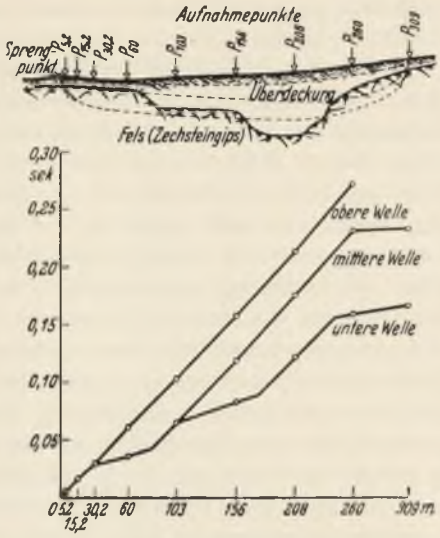


Bild 11. Seismische Untersuchung bei Sperenberg. (Nach Schweydar und Reich.)

vor allem die genaueste Ermittlung der Laufzeiten gewährleistet.

Das seismische Verfahren mittels sinusförmiger Bodenerschütterungen stellt ein Spezialverfahren für Baugrund-Untersuchungen dar, da seine Tiefenwirkung etwa 25 m nicht übersteigt. Es ist, da es noch nicht vollständig geklärt ist, ein besonderes Studiengebiet der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo) und des Geophysikalischen Instituts der Universität Göttingen.

Der Hauptvorteil der geophysikalischen Schürfung gegenüber der mechanischen liegt in der weitaus größeren Billigkeit, Freizügigkeit und Schnelligkeit. Die Sicherheit der Deutung wird besonders groß, wenn die geophysikalische Untersuchung durch einige wenige Kontrollbohrungen unterstützt wird.

Literatur.

1. Für den allgemeinen Überblick: H. Haalck, Angewandte Geophysik. Berlin, Gebr. Bornträger, 1934. H. Reich, Angewandte Geophysik für Bergleute und Geologen. Leipzig, Akademischer Verlag. Handbuch der Experimentalphysik, Bd. 25, Teil 3. Angewandte Geophysik. Bearbeitet von H. Haalck, W. Heine, J. N. Hummel, K. Jung, H. Martin, O. Meisser, H. Reich. Leipzig, Akademischer Verlag. — 2. Die Anwendung dynamischer Baugrunduntersuchungen. Berlin, Julius Springer, 1936. — 3. C. u. E. Schlumberger, G. Léonardon, Application de la prospection électrique à l'étude des projets de tunnels et de barrages. Ann. Ponts et Chauss. 102 (1932), S. 271...289. — 4. A. T. Parsons, Geophysical foundation study by explosionswave method. Eng. News Rec. 102 (1929), S. 273...275. — 5. W. Schweydar u. H. Reich, Gerlands Beiträge zur Geophysik 17 (1927), S. 121. — 6. M. Lugeon u. C. Schlumberger, Application des méthodes de prospection électrique à l'étude des fondation des hauts barrages. Génie civ. 101 (1932), S. 134...137. — 7. F. Wenner, A method of measuring earth resistivity. U.S.Bur. of Stand. Bull. 12 (1916), Nr. 4. — 8. F. Wenner, Scientific papers of the Bur. of Stand. 258, S. 468...477 (Washington 1917). — 9. Irving B. Crosby u. Sherwin F. Kelly, Electrical subsoil exploration and the civil engineer. Eng. News Rec. 102 (1929), S. 270...273. — 10. J. N. Hummel, Der scheinbare spezifische Widerstand. Z. f. Geophysik 5 (1929), S. 89...104. — 11. J. N. Hummel, Der scheinbare spezifische Widerstand bei vier planparallelen Schichten. Z. f. Geophysik 5 (1929), S. 228...238. — 12. Ansel, Das Impulsfeld der Seismik in graphischer Behandlung. Gerlands Beiträge zur Geophysik 17 (1927). — 13. E. R. Shephard (U.S. Bur. of Public Roads), Subsurface exploration by earth resistivity and seismic methods. Public Roads, Bd. 16, Nr. 4 (1935). — 14. K. S. Kurtenacher, Some practical applications of resistivity measurements to highway problems. Transactions of the American Institute of Mining and Meteorological Engineering, Bd. 110, Nr. 49 (1934). — 15. K. S. Kurtenacher, Use of resistivity methods for locating and exploring deposits of stone and gravel. Rock Products, Juli 1934, S. 32. — 16. R. C. Schappler u. F. C. Farnham, The earth resistivity method applied to the prediction of materials in excavation. Bericht zur 25. Missisippi Valley Conference of State Highway Departments, Februar 1933, Chicago. — 17. G. F. Tagg, Interpretation of resistivity measurements. American Institute of Mining and Meteorological Engineering, Technical Publication 477 (1932). — 18. St. W. Wilcox, Prospecting for road material by geophysics. Eng. News Rec., Februar 1935, S. 271. — 19. F. Müller, Z. f. Geophysik 3, S. 333 (1927). — 20. K. Sundberg, Principles of the Swedish geoelectrical methods. Beitr. z. ang. Geophysik 1, S. 298...361 (1931). — 21. A. Graf, ATM V 65/1...5.

Betriebskontrolle auf Schiffen

Einige Anregungen für eine moderne Ausrüstung

Verfasser: Dr. Georg Keinath, Larchmont N. Y.

V
8292—1
DK 629.123.004.15

Vorbemerkung. Der Verfasser hatte vielfach Gelegenheit, sowohl die Bedürfnisse der Schiffahrt als die gegenwärtige Technik der Instrumentierung von Schiffen kennen zu lernen. Im nachstehenden sollen Ideen zusammengefaßt werden, auf die man vielleicht bei künftigen Schiffsbauten oder auch bei fertigen Schiffen zurückkommen wird. Die Anregungen beziehen sich in erster Linie auf große und mittlere Passagierdampfer, sie werden aber zum Teil auch für kleinere Frachtschiffe und für Kriegsschiffe anwendbar sein. Der erste Teil der Ausführungen bezieht sich auf die Instrumente selbst und ihre zweckmäßige Gestaltung, der zweite auf die wesentlichsten meßtechnischen Aufgaben und gibt Anregungen für ihre Lösung.

I. Mechanische Festigkeit der Instrumente.

In den Kreisen der Schiffsingenieure besteht eine Abneigung gegen die Betriebsüberwachung mit elektrischen Meßgeräten. Ein Haupteinwand, und dazu ein berechtigter, ist der, daß die Instrumente nicht zuverlässig genug sind, daß namentlich die elektrisch empfindlichen Instrumente für die Wärmekontrolle, sowohl Anzeige- als Registrierinstrumente auch mechanisch sehr empfindlich sind und dauernd Reparaturen notwendig machen. Modelle, die sich an Land ausgezeichnet bewähren, versagen auf Schiffen. Die Ursache liegt darin, daß die Instrumente durch viel höhere Temperatur, die häufig bis 70° C geht und durch schwere Vibrationen schneller ruiniert werden als an Land. Reparaturen solcher Instrumente sind an Bord schwerer durchzuführen als an Land und die Liegezeiten der Schiffe im Hafen sind auch so kurz, daß sie für größere Überholungen nicht ausreichen.

Um mit normalen, bisher gebräuchlichen Instrumenttypen auszukommen, sind zwei Maßnahmen notwendig; von seite des Instrumentfabrikanten und von seite des Bestellers, der Werft. Diese sollte für die Abnahme der Betriebsinstrumente wesentlich weitere Toleranzen zulassen, als es bisher üblich ist. Es hat keinen Sinn, dort, wo man jetzt „nach Gefühl" arbeitet, mit Toleranzen von 10% und mehr, für die Instrumente 1% und weniger zu verlangen. Je enger man die Toleranz ansetzt, um so mehr läuft man Gefahr, mechanisch überempfindliche Instrumente zu erhalten, je weiter man sie ansetzt, um so robuster kann der Hersteller die Instrumente machen, er kann sie mit stark gerundeten Spitzen liefern, so daß sie im neuen Zustand vielleicht 1% Reibung haben, die sie aber behalten und nicht vergrößern, während Instrumente mit den schärfsten Spitzen zwar im neuen Zustand keine Reibung zeigen, dafür aber nach einiger Betriebszeit unter dem Einfluß der Vibrationen versagen. Je nach der Meßgröße sollte die Toleranz für die tatsächlichen Betriebsinstrumente nicht enger sein als 2...3% vom Hw. Für Abnahmen, wo es wirklich auf Genauigkeit ankommt, mag man andere Instrumente benutzen mit hoher Genauigkeit, die nur für die wenigen Stunden der Abnahme oder vielleicht äußerstenfalls für eine Reise eingebaut werden. Diese Instrumente können auch teurer sein, als es für Betriebsinstrumente zulässig ist. Es müßte zugestanden werden, daß die Instrumente ohne Erschütterung 1% Reibung haben dürfen, die sowieso beim praktischen Betrieb nicht zu merken ist. Der Hersteller kann dann die Instrumente robuster bauen. Er muß mit ihnen scharfe Vibrationsversuche machen, aber nur als Typenprüfung, nicht als Stückprüfung. Die Instrumente müssen ferner bei einer Temperatur von 100° C im fertigen Zustand gealtert werden, wenn sie stabil sein sollen. Solche Prüfungen werden auch heute schon durchgeführt.

Bei solchem gegenseitigen Verständnis von Hersteller und Werft wird man bereits auf eine wesentlich bessere Betriebsfestigkeit der Instrumente rechnen können als es bei dem bisherigen Verfahren der Fall ist.

II. Elektrische oder mechanische Instrumente?

Diese Frage kann sich natürlich nur auf Druckmesser, Temperaturmesser usw. beziehen, wo beide Ausführungen zur Wahl stehen. Heute sind die mechanischen Instrumente auf Schiffen weitaus in der Mehrzahl. Der Schiffsbau ist viel älter als die Elektrotechnik und sehr konservativ, mit ihm die Schiffsführung. Es kann aber kein Zweifel sein, daß die elektrische Meßtechnik die mechanische verdrängen wird, genau so wie es beim Flugzeug gewesen ist, weil sie vor ihr die Vorteile der Fernablesung und der Möglichkeit der Zentralisierung hat. Die Entwicklung für den Flugzeugbau hat uns billige, genaue und betriebssichere Ausführungen elektrischer Meßgeräte für alle mechanischen und thermischen Größen gegeben, und diese Konstruktionen können mit geringen Änderungen auch für Schiffe Verwendung finden.

III. Aufstellung der Instrumente, Anordnung und Ausführung.

In dieser Hinsicht scheinen dem Verfasser erhebliche Änderungen und Verbesserungen gegen die bisherige Technik möglich. Die Verwendung der gewöhnlichen Ausdehnungs-Thermometer und mechanischer Manometer hat es mit sich gebracht, daß man die Instrumente in den großen Maschinenräumen der Riesenschiffe einfach immer dorthin setzte, wo gemessen

wurde, mit dem Ergebnis, daß die Instrumente weit auseinanderlagen und keine Übersicht geben. Es erscheint zweckmäßig, Schiffe in ähnlicher Weise zentral mit Instrumenten auszurüsten, wie es bei Verkehrs-Flugzeugen der Fall ist. Die amerikanische Maschine Douglas DC-3s, die in großer Zahl im Luftverkehr eingesetzt ist, hat nicht weniger als 145 Meß- und Anzeigeeinrichtungen, von denen der Pilot im Fluge 130 benutzt und die übrigen 15 nur im Notfalle. Was für ein Flugzeug für nur 21 Passagiere zweckmäßig und erprobt ist, kann für einen Ozeandampfer mit 1000...3000 Menschen an Bord nicht überflüssig und unsinnig sein, wobei natürlich für das Schiff andere Einrichtungen zu verwenden sind als für das Flugzeug. Gewiß ist der Betrieb eines Schiffes ganz anders als der eines Flugzeuges, es erscheint aber doch im Prinzip wünschenswert, daß neben der Anzeige an den Unter-Kommandostellen auch eine Zentrale besteht, die es ermöglicht, mit einem Blick den ganzen Betrieb zu übersehen, nicht etwa nur die Schrauben-Drehzahl.

Die Ausführung der Instrumente ist eine besonders zu studierende Frage. Der Schiffsingenieur ist an die kreisrunden Skalen seiner alten Manometer gewohnt, er behauptet, daß er trotz weit auseinanderliegender Instrumente sofort einen ausgezeichneten Überblick habe, ob eine Meßgröße einen anormalen Wert zeige. Das ist natürlich nicht möglich, wenn die Normalstellungen der Zeiger sehr verschiedene Winkel gegen Horizontale oder Vertikale bilden. Die Kreisskala hat aber den großen Vorteil vor der Viertelkreis- oder Profilskala, daß sie bei gegebener Einbaufläche die größte Skalenlänge gibt. Es scheint auch, daß es für Flugzeuge praktisch nicht möglich ist, mit dem Profilinstrument bei gleicher Skalenlänge dieselbe Betriebsfestigkeit zu erreichen wie mit dem Kreisskaleninstrument.

Für das Schiff liegen die Verhältnisse anders, viel mehr zugunsten der Profiltype. Zunächst ist der Platz bei weitem nicht so beschränkt wie beim Flugzeug, dann aber sind es doch auch bei üppiger Instrumentierung wesentlich weniger Meßstellen, vor allem weniger verschiedenartige Messungen. Viele Größen werden gleichartig für verschiedene Meßstellen vorkommen und hier gibt gerade das Profilinstrument die Möglichkeit des schnellsten Vergleiches.

Hier wäre es wünschenswert, einen neuen Weg einzuschlagen unter Verwendung von Lichtzeiger-Profilinstrumenten, wie sie bisher nur in verhältnismäßig wenigen Ausführungen vorliegen für Spezialzwecke. Mit dem Lichtzeiger-Instrument würde sich gerade für Schiffe die notwendige hohe mechanische Festigkeit erreichen lassen bei hoher elektrischer Empfindlichkeit. Das Systemgewicht wird sehr viel geringer, damit die Spitzenbelastung und die Empfindlichkeit gegen Erschütterungen. Das Lichtzeiger-Instrument gibt weiter die Möglichkeit, mit Farbeffekten anormale Betriebszustände, Über- oder Unterschreiten normaler Werte schnell zu erkennen.

Bei 50 mm Breite und 200 mm Rahmenhöhe könnte man auf einer Fläche von einem halben qm nicht weniger als 50 Instrumente unterbringen, sicher mehr als genug. Gerade in diesen Betriebsräumen, die nie Tageslicht erhalten, wären Lichtmarken-Instrumente günstiger als gewöhnliche Typen. Die Skalenlänge wäre mit etwa 140 mm einzusetzen, so daß 1% einer Länge von 1,4 mm entsprechen würde.

IV. Meßtechnische Aufgaben im Schiffsbetriebe.

1. Abgasanalyse. Die Erfahrungen und Informationen des Verfassers gehen dahin, daß auf den Großschiffen aller Nationen, die Wärmekontrolle sehr zu wünschen übrig läßt, mit dem Ergebnis, daß eine Verschwendung des teuren Öles stattfindet und außerdem eine schwere Belästigung der Passagiere durch Ruß, der in manchen Schiffen durch die „Belüftung" in die Innen-Kabinen gesaugt wird. Die Verluste durch unvollkommene Verbrennung gehen bei jeder Reise für die größten Schiffe in die Größenordnung von 5000... 10000 Mark, Verluste, die auch bei kleinen Landanlagen nie vorkommen. Als wichtigste Aufgabe erscheint demnach die Überwachung der Wärmewirtschaft. Die unvollkommene Verbrennung ist allerdings oft nicht allein durch schlechte Feuerführung als auch durch eine unvollkommene Kesselanlage bedingt. Das Vorhandensein vieler Einzelkessel und komplizierter Abgasleitungen machen es oft schwer, geradezu unmöglich, eine dem Durchschnitt entsprechende Entnahme der Abgase zu finden. Dafür hat man aber auf Schiffen gegen Landanlagen wieder den Vorteil, daß auf dem größten Teil der Reise die Maschinenleistung konstant bleibt und deshalb Meßergebnisse viel besser ausgewertet werden können. Der Einbau der Entnahmestellen scheint das wichtigste zu sein, man wird sie zum Teil erst während der Probefahrt auswählen können. Als Ergänzung der Messung des Kohlensäuregehaltes und Bestimmung unverbrannter Gase könnte eine Rauchdichte-Messung dienen, obgleich auch hier die Wahl der Meßstelle sehr schwierig ist, weil die Mischung der Abgase aus den einzelnen Kesseln erst im obersten Teil des Schornsteines stattfindet, die Rauchbildung unter Umständen sogar erst nach dem Austritt aus dem Schornstein. Es besteht die Möglichkeit, meßtechnisch zwischen weißem und schwarzem Rauch zu unterscheiden, wobei für den weißen die Reflexion zur Erregung einer Photozelle verwendet wird, die neben der Strahlungsquelle aufgestellt ist, während die für schwarzen Rauch ihr gegenüber liegt. Für die Instrumente gilt das im 1. Abschnitt Gesagte.

2. Schiffsleistung bzw. Maschinenleistung. Sie bestimmt sich aus Drehmoment der betreffenden Welle und Drehzahl. Die Maschinenleistung wird heute üblicherweise nur bei der Abnahme des Schiffes gemessen, während des Betriebes nur gelegentlich. Zu diesem Zwecke ist auf der Welle ein Verdrehungsmesser eingebaut, an dem mit einer optischen Ablesung die Verdrehung bestimmt wird. Unter Zugrundelegung der Eichkonstante, ermittelt aus den Abmessungen der Welle und dem Material, oder aus einem Versuch, berechnet man dann das Drehmoment, zuletzt die Leistung.

Dauernd arbeitende, vor allem schreibende elektrische Verdrehungs- und Leistungsmesser sind bisher nach Wissen des Verfassers an keinem deutschen Schiff betriebsmäßig eingebaut worden, obwohl nach dem heutigen Stand der Technik gar keine Schwierigkeiten

bestehen. Man benutzt dazu wieder die Welle als Meßkörper und mißt die Verdrehung am besten induktiv nach einer Luftspalt-Methode[1] unter Verwendung des Bord-Wechselstromes und eines Konstant-Transformators. In einer der bekannten Brückenschaltungen erhält man dann unter Verwendung eines Gleichrichters einen Gleichstrom, der der Verdrehung genau proportional ist. Speist man damit die Drehspule eines Wattmeters, dessen feste Spule an einer Gleichstrom-Tourendynamo liegt, so ist der Ausschlag proportional der Maschinenleistung. Eine andere Lösung, gleichfalls schon lange bekannt, ist die, daß man die Meßdrosseln aus einer Wechselstrom-Tourendynamo speist, und man hat damit ohne weiteres in dem Brücken-Diagonalen-Strom die gesuchte Maschinenleistung. Die Genauigkeit solcher Messungen kann man auf 1...2% veranschlagen unter Berücksichtigung der Unsicherheit der elastischen Konstanten der Schiffswelle.

Diese Messung ist für jede der Wellen durchzuführen, zweckmäßig sind die Leistungen der Wellen auf einem einzigen Streifen zu registrieren. Sind es nur zwei, wie bei den meisten Schiffen, so kann man noch Tintenschreiber verwenden, die von der einen zur andern Größe umgeschaltet werden, ein Schraffur-Diagramm schreibend. Sind es vier, wie bei einigen der allergrößten Schiffe (das allerletzte „Queen Elizabeth" erhält wieder nur zwei), so wird man besser einen Punktschreiber verwenden. Der Vorschub ist nicht größer als 20 mm in der Stunde zu wählen, damit die ganze Reise nicht ein allzulanges Diagramm ergibt. Allenfalls genügen auch 10 oder 5 mm. Diese Registrierung sollte unbedingt ergänzt werden durch einen PS-Stunden-Zähler, auch wieder entweder ein dynamometrischer Zähler, gespeist mit Gleichstrom, oder ein Gleichstrom-Zähler, gespeist aus der Brückendiagonale in Serie mit dem Registrierapparat. Die Zählung während der Reise gibt die Unterlagen für die Wirkungsgrad-Berechnung für die ganze Reise. Die Registrierung wäre noch durch Anzeigeinstrumente auf der Kommandobrücke und bei dem leitenden Ingenieur zu ergänzen.

3. Messung des Schubs. Diese Messung ist bisher, solange nur mechanische Meßgeräte verwendet wurden, überhaupt nur als Versuch unter Verwendung von Öldruckdosen ausgeführt worden. Neuerdings ist es aber möglich geworden, unter Verwendung magnetoelastischer Druckdosen[2] eine Fernmessung und -Registrierung durchzuführen, die sich auch, von Kinderkrankheiten abgesehen, im praktischen Betriebe vollkommen bewährt hat[3].

Die magnetoelastischen Druckdosen sind zudem ein Konstruktions-Element, das zufolge seiner hohen mechanischen Festigkeit kein Mißtrauen aufkommen läßt. Als Registrierinstrumente sind wieder Tintenschreiber vorzusehen, die über Bolometer-Verstärker an die Brückenschaltung angeschlossen werden.

Die Schubmessung spiegelt die Leistung der Schraube für die Fortbewegung des Schiffes. Nach längerem Betriebe kann die eine der Schrauben nachlassen in ihrer Wirkungsweise, die Folge ist dann, daß das Schiff aus dem Kurs zu gehen versucht und zuletzt eine Vergeudung an Maschinenleistung. Wenn der Schub der beiden Schrauben ungleich ist, so wird man ihn durch ungleiche Einstellung der Drehzahl einregeln.

4. Messung der Fahrgeschwindigkeit. Hierfür gibt es eine Reihe von Verfahren, die im wesentlichen auf die Messung des Staudruckes hinauslaufen. Die Messung ist schon an sich schwierig, wird aber weiter erschwert, wenn man elektrische Fernübertragung wünscht. Die Teilung des Anzeigeinstruments ist von Natur quadratisch, es ist wünschenswert, die Anzeige zu radizieren, um einen Strom zu erhalten, der genau proportional der Fahrgeschwindigkeit ist. Eine praktische Lösung liegt noch nicht vor, sie erscheint aber ohne weiteres möglich, wenn ein ernsthaftes Interesse an der Einrichtung die Entwicklungsarbeit rechtfertigt, die damit verbunden sein wird.

5. Messung des Propulsions-Wirkungsgrades. Wenn das ganze Schiff als Kraftmaschine betrachtet wird, so ist sein Wirkungsgrad gegeben durch das Verhältnis

$$\eta = \frac{\text{Schraubenschub} \times \text{Fahrgeschwindigkeit} = \text{Fahrtleistung}}{\text{Drehmoment} \times \text{Wellendrehzahl} = \text{Maschinenleistung}}$$

Die Größe des Nenners haben wir bereits als einen Brückenstrom erhalten, dasselbe muß für den Zähler geschehen. Man wird dazu die radizierte Fahrgeschwindigkeit als Wechselstrom der Brücke mit den magnetoelastischen Meßdosen zuführen und hat dann den Zähler. Ein Quotientenmesser üblicher Bauweise gibt uns dann direkt den Propulsions-Wirkungsgrad des Schiffes. Damit haben wir eine für den Betrieb außerordentlich wichtige Größe, man kann sagen, die wichtigste. Sie zeigt an, ob die Schrauben voll wirken oder ob der Schiffswiderstand unzulässig gesteigert ist, etwa durch Bewachsung des Schiffskörpers.

6. Messung des Wirkungsgrades der Krafterzeugung. Hier sind verschiedene Messungen möglich. Zunächst hat man den Ölverbrauch der Kessel an einer einzigen Stelle zu erfassen. Das wird bei älteren Bauten oft schwer sein, aber es wäre bei Neubauten leicht möglich, die Leitungen so zu legen, daß diese Messung erfolgen kann. Weiterhin hat man die Dampfmenge zu erfassen, und zwar die gesamte Menge unter Einschluß der Nebenbetriebe, die oft ganz erheblich sind. Aus diesen beiden Größen bildet man den Quotienten und hat damit den Kessel-Wirkungsgrad. Zweckmäßig führt man diese Quotientenmessung nicht kontinuierlich aus, sondern als Mengenmessung in größeren Zeiträumen, so daß bei Vollast beispielsweise alle Viertelstunden eine Messung stattfindet, bei halber Last alle halbe Stunden usw.[1]. Bei Schiffsbetrieb könnte man sogar auf Stundenintervalle gehen oder schließlich als letztes den Wirkungsgrad durch Einzelablesung der Ölzähler und Dampfzähler nur alle 24 Stunden vornehmen. Das gleiche gilt von dem Turbinenwirkungsgrad der aus dem Quotienten PS-Stunden: Dampfverbrauch zu bilden ist. Auch hier genügen größere Zeitintervalle und ist Registrierung schließlich überflüssig, während der Propulsions-Wirkungsgrad durch den Seegang und sonstige kurzzeitige Einflüsse verändert werden kann.

7. Wert der Wirkungsgrad-Überwachung. Der Verfasser ist sich klar darüber, daß seine Vorschläge von seiten des Schiffsbaues und der Schiffsführung keine

allzu günstige Aufnahme finden werden. Der eine Einwand wird der sein, daß solche Messungen überflüssig sind, der andere der, daß die notwendigen Meßgeräte noch gar nicht auf dem Markt sind. Zu dem ersten Einwand sei nur gesagt, daß der Ölverbrauch eines modernen Groß-Schiffes jährlich etwa vier Millionen Mark kostet, die in Devisen bezahlt werden müssen. Gelingt es, durch sauberste Betriebsführung nur 3% zu sparen, so bedeutet das an einem solchen Schiff nicht weniger als 120000 Mark jährliche Devisenersparnis. Die Anlagekosten bleiben weit unter dieser Summe und bedingen keinen nennenswerten Devisen-Aufwand, ebenso nicht Änderungen und Reparaturen. Niemand wird bestreiten können, daß solche Ersparnisse erzielt werden können, allerdings nicht durch den Einbau selber, sondern durch Auswertung der Ergebnisse und entsprechende Maßnahmen. Es ist eine bekannte Tatsache, daß bei gleichen Schiffen der Ölverbrauch auf gleicher Fahrt bis zu 10% verschieden ist. Zweck verfeinerter Meßtechnik ist, solchen Unterschieden bis zur Quelle nachzugehen und sie zu beseitigen.

Am bedeutsamsten sind solche Messungen für Kriegsschiffe. Hier steht die Schnelligkeit als oberstes und nicht das schnellste Schiff, sondern das langsamste bestimmt die Geschwader-Geschwindigkeit und das langsamste Schiff wird die eingehendste meßtechnische Durchprüfung erfahren. Vergeudung von Brennstoff auch bei höchster Fahrtleistung bedeutet nicht nur Devisenvergeudung, sondern auch Verminderung des Aktionsradius.

Was die praktische Ausführbarkeit dieser Vorschläge betrifft, so ist zu sagen, daß sie außer allem Zweifel steht und daß solche Geräte auch zu einem Preis hergestellt werden können, der zu dem Gesamtobjekt in einem gesunden Verhältnis steht. Einer der Apparate, der elektrische Verdrehungsmesser unter Verwendung einer Doppeldrossel, war vom Verfasser schon im Jahre 1917 vorgeschlagen worden, er wurde auch Anfang 1918 auf einer Werft ausprobiert, kam dann aber in Vergessenheit. In England wurde dann 1925 von Ford der gleiche Vorschlag gemacht und der von Siemens Bros. daraufhin entwickelte Verdrehungsmesser ist ein listenmäßig hergestelltes Gerät geworden, das vielfach Anwendung gefunden hat. Die Schubmessung mit magnetoelastischen Meßdosen wurde von Siemens & Halske auf einem deutschen Schiff (Potsdam) erstmalig angewandt[3]. Die Ausgestaltung zur direkten Wirkungsgradanzeige liegt unbedingt im Bereich der Leistungsfähigkeit der heutigen Technik und es kann auch damit gerechnet werden, daß diese Instrumente gegen die eingangs erwähnten Anforderungen hinsichtlich Erschütterung und Temperatur fest sein werden.

V. Weitere Anregung, als Hilfe zur späteren Schiffsprojektierung.

Messung der mechanischen Beanspruchung im schweren Seegang. Für kleinere Schiffe, bis zu 10 oder 12000 Tonnen ist die Beanspruchung im Seegang kein großes Problem, weil diese Schiffe so kurz sind, daß sie nie über zwei Wellenberge kommen. Erst bei längeren Schiffen wird die Berechnung schwierig, weil man nicht genügend meßtechnische Erfahrungen hat über den Wellengang. Neuere Untersuchungen machte Schnadel an besonderen Meßschiffen, die zu mutmaßlichen Zeiten schweren Seeganges Fahrten unternahmen, begleitet von einer Anzahl von Ingenieuren. So wertvoll die Ergebnisse an sich sind, so können sie als Einzelversuch doch nicht einem größeren Erfahrungsmaterial gleichkommen. Um Schiff, Ladung und Passagiere keiner Gefahr auszusetzen, muß man deshalb beim Entwurf großer Schiffe mit großen Sicherheitskoeffizienten rechnen. Man kann annehmen, daß auf diese Weise bei einem Schiff mit 25000 t, bei dem der tragende Anteil an Stahl zu vielleicht 10000 t geschätzt werden kann, sicher um 10% Eisen zuviel eingebaut wird, also 1000 t. Dieses Gewicht muß auf jeder Reise unnütz mitgetragen werden, vermindert die Nutzladung und kostet dauernd Geld zu den erstmaligen Kosten. Würde man die Sicherheit der Berechnung auf Grund langer Erfahrung vermehren können, so wäre es möglich, mit weniger Stahl auszukommen.

Den Konstrukteuren sind die höchst beanspruchten Stellen eines Schiffes bekannt. An ihnen müßten Dehnungsmesser eingebaut werden, die aber dauernd im Betrieb sein müßten. Für ein Schiff würden zehn Meßstellen genügen, die aber zum Unterschied zu den mit Ritzschreibern ausgeführten Versuchen auf einen einzigen Registrierstreifen mit 250 oder 500 mm Breite elektrisch übertragen werden müßten, so daß die für die Berechnung unbedingt notwendige zeitliche Zuordnung der Spannungen gegeben ist. Die Apparate würden gewöhnlich mit einem sehr kleinen Papiervorschub arbeiten, vielleicht 2 mm/h und erst bei Eintreten von schwerem Seegang vom leitenden Ingenieur auf großen Vorschub geschaltet werden. Heute weiß die Schiffsleitung aus Erfahrung, wann die zulässige Grenze der Beanspruchung des Schiffskörpers erreicht ist und das Schiff beigedreht werden muß. Mit solchen Meßgeräten könnte in späterer Zeit dieser Erfahrung eine meßtechnische Unterlage gegeben werden. Derartige Diagramme, an zwei oder drei Schiffen auf ein oder zwei Jahre gesammelt, vor allem im Nordatlantik, würden der Berechnung für künftig zu bauende Schiffe sehr wertvolle Unterlagen geben.

Meßtechnisch liegen die Dinge einfach, weil man mit der Meßlänge nicht beengt ist, sie ohne weiteres zu 100 oder 200 mm wählen und mit der robusten, einfachen Luftspaltmethode[1] arbeiten kann. Bei 250 mm Papierbreite bleibt für das Einzeldiagramm etwa 20 mm, die man auf etwa 2% genau wird ablesen können, was praktisch genügen dürfte. Welche Aufzeichnung man wählt, ist schwer zu sagen, zweckmäßig scheint Wachspapier und ein Fallbügel, der auf alle zehn Meßorgane drückt. Da die Wellen eine Halbperiode von kaum weniger als 10 s haben, erscheint ein Registrierintervall von 2 s bei schwerer See ausreichend, während bei ruhiger Fahrt 1 min gewählt werden kann.

Literatur.

1. G. Keinath, Elektrische Druckmessung. ATM V 132—4, Okt. 1932. — 2. L. Merz u. H. Scharwächter, ATM V 132—15, Nov. 1937. — 3. F. Mey, Der turbo-elektrische Antrieb des Schnelldampfers „Potsdam". Siemens-Z. 17 (1937), S. 218...222. — 4. G. Keinath, Wirkungsgrad-Messung. ATM V 3440—1, April 1933; vgl. auch DRP. 605179.

Dynamische Werkstoff-Prüfung

Elektromechanische Analogien

Verfasser: Dr.-Ing. Otto Müller, Berlin

V
9115 – 4
DK 620.17

Ersatzschemata und deren elektrische Analogien. Bei der Behandlung einzelner Aufgaben der dynamischen Werkstoffprüfung bedient man sich mit Vorteil mechanischer Ersatzschemata, indem man die schwingungsfähigen Gebilde in eine Schaltung von Massen, Federungen und Dämpfungen auflöst. Das Ersatzschema kann dann weiter in eine elektrische Analogieschaltung überführt werden[1]. Den zu untersuchenden Prüfling stellt man meist als masselose Federung (reine Kapazität) in Verbindung mit einer Dämpfung dar (Ohmscher Widerstand). Um das Verhalten des betreffenden Prüflings im Ersatzschema möglichst naturgetreu wiederzugeben, muß man die vorgesehenen Dämpfungs- und Federungselemente den durch den Werkstoff vorgegebenen Eigenschaften bestmöglich anpassen und auch die Schaltung der beiden entsprechend einrichten. Je nach der Wahl der Schaltung, ob parallel oder in Serie, weisen die Ersatzschemata grundsätzliche Unterschiede auf, und es ist oft nicht einfach, hier den richtigen Weg zu finden. Auch in der rein elektrischen Materialprüfung ergeben sich begriffliche Schwierigkeiten, wenn man z. B. einen Kondensator mit dielektrischen Verlusten durch eine Ersatzschaltung aus reiner Kapazität und ohmschem Widerstand wiedergeben will. Man hilft sich hier meist dadurch, daß rein rechnerisch bei festgehaltener Frequenz die eine Schaltung in die andere überführt werden kann[2]. Es ist somit möglich, Berechnungen mit formalen Werten durchzuführen.

Eigenschaften des Dämpfungswiderstandes von Werkstoffen. Im allgemeinen wird im Analogieschema eines mechanischen Prüflings die Dämpfung durch einen einfachen ohmschen Widerstand, der mit der Kapazität in Reihe geschaltet ist, angedeutet. Dieser ohmsche Widerstand entspricht in der Mechanik einem reinen Zähigkeitswiderstand; sie sind in beiden Fällen vollkommen unabhängig von der Frequenz. Gibt man an Stelle des Dämpfungswiderstandes k die Dämpfung D bzw. das logarithmische Dekrement $\mathfrak{d}$ an, so gilt bei nicht allzu großer Dämpfung die Beziehung[3]

$$\mathfrak{d} = 2\pi D = \frac{k}{2 m \omega_0},$$

wobei ω_0 die Eigenfrequenz und m die Masse des Schwingungssystems darstellen. Das Dekrement gibt also nicht das Verhalten des Baustoffes allein, sondern das des ganzen Schwingungssystems wieder, der Dämpfungswiderstand ist somit ein besseres Kennzeichen für die Baustoffdämpfung. Da man bei der Frequenzverstellung in den Dauerprüfmaschinen meist die Masse bzw. das Trägheitsmoment der Schwingungsanordnung bei gleicher Federkonstante c ändert, eliminiert man vorteilhafterweise die Masse aus obigem Ausdruck, um die Frequenzabhängigkeit des Dekrements zu erfassen.

$$\omega_0^2 = \frac{c}{m}; \quad m = \frac{c}{\omega^2}; \quad \mathfrak{d} = 2\pi D = \frac{k\,\omega_0}{2\,c}$$

Für den Verlustwinkel δ gilt die Beziehung:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\text{Dämpfungswiderstand}}{\text{Federwiderstand}} = \frac{k}{c/\omega} = \frac{k\,\omega}{c}$$

ω ist hier eine beliebige Frequenz, der Verlustwinkel kann auf den Prüfling allein, ohne Berücksichtigung des Gesamtsystems, bezogen werden.

Das Dekrement und der Verlustwinkel nehmen, sofern man k als frequenzunabhängig ansieht, direkt proportional mit der Frequenz zu.

Die Dämpfungsmessungen, insbesondere an metallischen Werkstoffen, führen jedoch meist zu ganz anderen Ergebnissen. Es muß allerdings vorausgeschickt werden, daß hier ziemlich schwierige Verhältnisse vorliegen, die durchaus noch nicht restlos geklärt sind. Die Frequenzabhängigkeit der Baustoffdämpfung dürfte nämlich auch noch vom Verformungszustand des Werkstoffes abhängen. Doch soll dieser Umstand im folgenden nicht weiter berücksichtigt werden.

Die Versuche zeigen in den meisten Fällen, daß das Dekrement bei gleich großer Verformung des Prüflings unabhängig von der Verformungsgeschwindigkeit ist[4, 5]. Aus obigen Formeln muß daher geschlossen werden, daß der Dämpfungswiderstand der Werkstoffe nicht frequenzunabhängig, sondern der Frequenz umgekehrt proportional ist. Auch bei vielen nicht metallischen Materialien, z. B. bei Dämmstoffen, konnte diese Feststellung gemacht werden. Bild 1 gibt Ergebnisse wieder, die Costadoni[6] mit einer besonderen Apparatur zur unmittelbaren Bestimmung der Wirk- und Blindkomponente der Widerstände erhalten hat. Es sind hier die Wirkwiderstände einer geschichteten Unterlage aus Kork-Gummi-Kork in Abhängigkeit von der Frequenz doppel-logarithmisch aufgetragen. Es ergeben sich im Diagramm bis auf geringe Abweichungen Geraden, die unter 45° verlaufen. Das bedeutet bei der gewählten Auftragung: die Dämpfungswiderstände sind $1/\omega$ proportional.

Die physikalische Ursache für dieses Verhalten der Baustoffdämpfung ist darin zu suchen, daß die Dämpfungsarbeit, d. h. der Inhalt der Hysteresisschleife des Werkstoffes bei dynamischer Belastung unabhängig von der Geschwindigkeit ist, mit der sie durchlaufen wird. Die Dämpfungskraft ist also — im Gegensatz zu den geschwindigkeits-proportionalen Dämpfungen — frequenzunabhängig und somit der Dämpfungswiderstand, der durch den Ausdruck Kraft/Geschwindigkeit definiert ist, proportional $1/\omega$. Als Analogon können hier die magnetischen Hysteresisverluste herangezogen werden,

da die Ummagnetisierungsarbeit ebenfalls unabhängig von der Frequenz ist. Eine elektrische Analogie, auf einem einfachen stromdurchflossenen Widerstand beruhend, läßt sich kaum angeben. Man hilft sich in diesem Falle einfach dadurch, daß man dem Widerstandsmaterial die erforderlichen Eigenschaften zuschreibt bzw. rechnet sich für die betreffende Versuchsfrequenz einen äquivalenten ohmschen Widerstand aus. Zur Wahrung der einfachen Übertragbarkeit soll in folgendem auch die geschwindigkeitsproportionale Dämpfung im mechanischen Ersatzschema beibehalten werden.

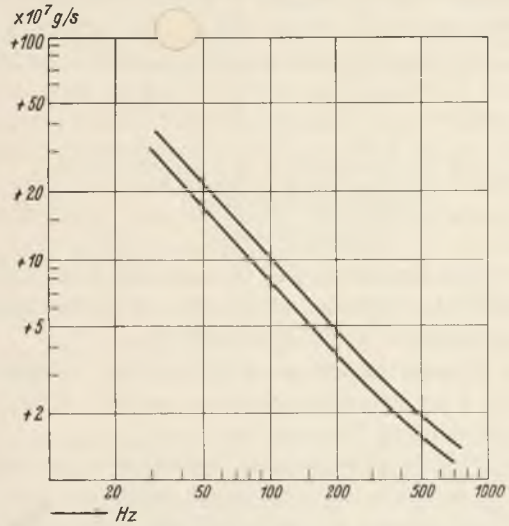


Bild 1. Wirkwiderstände eines Dämmstoffes (Kork — Gummi — Kork) in Abhängigkeit von der Frequenz
a) Belastung 3,4 kg/cm², b) Belastung 7 kg/cm².

Mathematisch läßt sich die Frequenzabhängigkeit des Widerstandes berücksichtigen, indem die Differentialgleichung der Schwingung mit Baustoffdämpfung folgendermaßen geschrieben wird[7, 8]

$$m \frac{d^2 x}{d t^2} + \frac{k'}{\omega} \frac{d x}{d t} + c x = K \sin \omega t$$

k' ist eine neue, durch obige Gleichung definierte Konstante von der Dimension kg/cm, also ein auf den Weg bezogener Widerstandsbeiwert.

Neben der Frequenz ist noch die Größe der Beanspruchung des Prüflings von ausschlaggebender Bedeutung für die Baustoffdämpfung. Die Abhängigkeit kann nicht einheitlich dargestellt werden, da sie sich bei verschiedenen Belastungsstufen wesentlich ändert. Im allgemeinen ist die Dämpfung (Dekrement bzw. Verlustwinkel) anfänglich fast unabhängig von der Belastung, steigt dann aber von einer bestimmten Belastung an sehr erheblich. Es würde zu weit führen, hierauf noch näher einzugehen, um so mehr, als diese Erscheinung im Ersatz- bzw. Analogieschema auch nicht mit den einfachen Mitteln zum Ausdruck gebracht werden kann.

Bei der Aufstellung von Ersatz- und Analogieschemata muß unter Umständen noch beachtet werden, daß die elastischen Konstanten des untersuchten Werkstoffes nicht den bekannten einfachen Gesetzmäßigkeiten folgen. So gibt es z. B. Körper, die keine lineare Federcharakteristik haben (Gummi bei starker Verformung) und andere Körper, deren Elastizitätsmodul sich bei dynamischer Belastung gegenüber statischer ändert (dynamischer Elastizitätsmodul). Des weiteren können die Federungen aus mehreren Anteilen zusammengesetzt werden, wie etwa beim Schwammgummi, bei dem neben der Federkraft des Gummis selbst noch die Elastizität der in den Poren eingeschlossenen Luft berücksichtigt werden muß. Hierauf soll später noch eingegangen werden.

Die physikalischen Eigenschaften der Dämpfungs- und Federwiderstände bzw. der entsprechenden Größen an sich sind aber nicht allein maßgebend für das Verhalten eines Werkstoffes bei der dynamischen Prüfung. Sehr wesentlich ist hier noch die Art des Zusammenwirkens von Dämpfung und Elastizität, d. h. die gegenseitige Schaltung der beiden Elemente im Ersatzschema. Gerade auf diesem Gebiete lassen sich besonders lehrreiche Analogiebetrachtungen anstellen.

Schaltungen bei statischer Belastung des Prüflings. Nichtfließende Werkstoffe. Die statische Belastung eines Prüflings, der durch ein entsprechendes Ersatzschema dargestellt ist bzw. die Spannungsprobe eines Kondensators mit Gleichstrom leitet die Vorgänge bei der dynamischen Prüfung besonders anschaulich ein. Wird die Elastizität (Federung) des Probestabes im Schema mit der geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung parallel geschaltet (Bild 2a), so ist bei der statischen Belastung die Dämpfung praktisch wirkungslos. Lediglich die Zeit, in der der Stab die durch die Last P bedingte elastische Verlängerung $\frac{1}{c} \cdot P$ erfährt, wird dadurch beeinflußt. Die Zeitkonstante des Einstellvorganges ist $\frac{1}{c} \cdot k$. Wird die Last entfernt, so geht der Stab in der entsprechenden Zeit wieder in seine Ausgangslage zurück. Bei der statischen Spannungsprobe eines Kondensators mit einem in Reihe geschalteten Widerstand liegen die Verhältnisse ähnlich (Bild 2b). Die Zeitkonstante für die Aufladung ist hier bekanntlich $R \cdot C$. Wird im elektrischen Fall der Stromkreis kurz geschlossen, so entlädt sich der Kondensator, wobei er genau dieselbe Ladung, die er ursprünglich erhalten hat, wieder abgibt.

Da die elastische Verlängerung des Probestabes der vom Kondensator bei der angelegten Spannung aufgenommenen Ladung entspricht, muß auch die Kondensatorgleichung, die die Abhängigkeit zwischen der Ladung Q, der Kapazität C und der Spannung U wiedergibt:

$$Q = C \cdot U$$

dem Hookschen Gesetz analog aufgebaut sein. Die Umformung ins Mechanische lautet:

$$\text{Verlängerung (Ausschlag) } \Delta l = \frac{1}{c} \cdot P.$$

Das Hooksche Gesetz kann in die übliche Form gebracht werden, wenn für die Federkonstante des Stabes der gleichbedeutende Ausdruck $c = \frac{E \cdot q}{l}$ eingesetzt wird. Hierbei bedeuten: E der Elastizitätsmodul des Materials, q der Querschnitt und l die Länge des Stabes. Es ergibt sich dann:

$$\Delta l = \frac{l}{E q} \cdot P = \frac{l}{E} \cdot \sigma$$

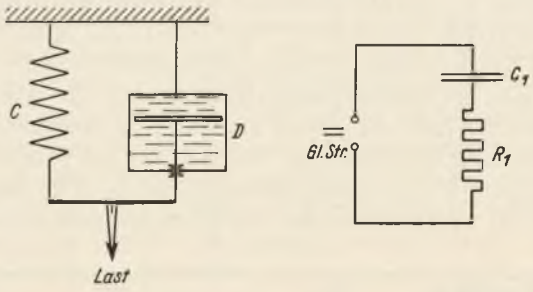


Bild 2. Mechanisches Ersatzschema und elektrisches Analogon für nichtfließenden Werkstoff.

Fließende Werkstoffe. Anders ist es bei einem Ersatzschema, bei dem Federung und Dämpfung in Reihe geschaltet sind (Bild 3a). Die Dämpfung muß man sich äußerst zäh vorstellen. Greift hier die Kraft P an der Kombination an, so wird zwar die Feder um dieselbe Größe $\frac{1}{c} \cdot P$ verlängert, doch der gesamte Weg des Angriffspunktes der Kraft ist größer, denn die Dämpfung hat sich unter dem Einfluß der Kraft ebenfalls verschoben. Das Bemerkenswerte an dem ganzen Vorgang ist, daß die gesamte Längenänderung nicht durch die äußere Kraft und Materialkonstanten des Prüflings allein bestimmt wird, sondern auch durch die Zeitdauer der Belastung, da sich die Dämpfung so lange weiter bewegt, als die Kraft einwirkt. Diese Erscheinung deckt sich weitgehend mit dem sogenannten „Fließen" bzw. „Kriechen" der Werkstoffe oberhalb einer gewissen Belastungsgrenze. In diesem Zustand findet bekanntlich ja auch eine zeitabhängige Verformung des Materials statt. Nimmt man plötzlich die Kraft fort, so kehrt jetzt die Anordnung Bild 3a nicht mehr ganz in die Ruhelage zurück, sondern nur die elastische Feder; der von der Verschiebung des Dämpfungskolbens herrührende Anteil bleibt zurück und ergibt die sogenannte „bleibende Formänderung".

Ein Kondensator mit parallel geschaltetem Widerstand (Bild 3b) verhält sich, wie ohne weiteres ersichtlich, entsprechend. Er verliert dauernd Ladung über dem Nebenschluß. Bei Kurzschließen des Stromkreises gleicht sich eine geringere Ladung aus, als dem Kondensator zugeführt wurde.

Legt man einem Baustoff ein Schema gemäß Bild 3 mit einer geschwindigkeitsproportionalen (linearen) Dämpfung zugrunde, so ist folgendes Verhalten zu erwarten:

1. Solange die Belastung auf den Prüfling einwirkt, wird er deformiert, hält sie also lange genug an, so muß die Verformung schließlich so groß werden, daß der Bruch einsetzt.

2. Auch bei der kleinsten Belastung wird sich eine bleibende Formänderung einstellen.

Einige Stoffe, zum Beispiel Asphalt, zeigen tatsächlich ein derartiges Verhalten. Bekanntlich genügen schon die geringsten Belastungen, um im Laufe der Zeit bleibende Verformungen hervorzurufen.

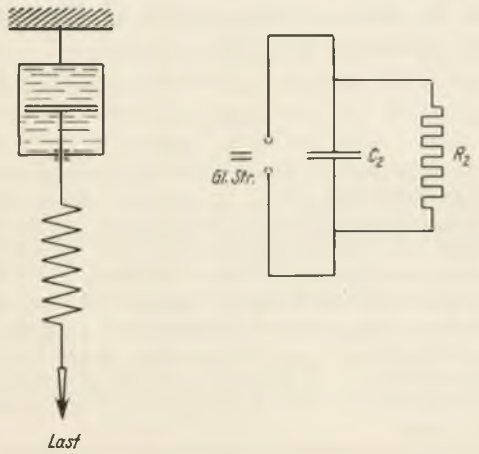


Bild 3. Mechanisches Ersatzschema und elektrisches Analogon für fließenden Werkstoff.

Die technischen Metalle, auf die es hier besonders ankommt, verhalten sich jedoch anders, da bleibende Formänderungen praktisch erst von bestimmten Belastungen an auftreten. Bei kristallinen Stoffen, also auch bei Metallen, wird die bleibende Formänderung durch Verschiebungen in den Gleitebenen der Kristalle hervorgerufen (Fließfiguren). Diese Gleitebenen sind nun meist durch einzelne Teilchen, Verunreinigungen oder Beimengungen, die sich zwischen die Gleitebenen gelagert haben, „blockiert". Es muß erst eine gewisse Kraft aufgebracht werden, um diese Verriegelung zu sprengen. Die Grenze der plastischen Verformbarkeit liegt daher auch im allgemeinen um so niedriger, je reiner das Material ist. So verschieben sich z. B. die Gleitebenen bei Einkristallen aus ganz reinen Metallen oft schon bei erstaunlich geringen Belastungen.

Damit ist aber der Verlauf der Verformung noch nicht restlos gekennzeichnet. Nachdem die Verschiebung begonnen hat, geraten nämlich die Gleitflächen infolge innerer Reibung in Unordnung und blockieren sich wiederum, so daß das Kriechen nach einiger Zeit zum Stillstand kommt. Erst bei höheren Temperaturen, wenn eine dauernde Rekristallisation einsetzt, wobei sich die Gleitebenen neu bilden können, fließt der Werkstoff weiter bis zum endgültigen Bruch. Eine Berücksichtigung dieser Erscheinungen ist näherungsweise durch Annahme einer Dämpfungsanordnung mit plastischem und verfestigungsfähigem Dämpfungsstoff an Stelle der zähen Flüssigkeit möglich[9].

Von einer elektrischen Ersatzschaltung kann natürlich nicht erwartet werden, daß sie diese verwickelten Vorgänge mit zum Teil sprunghaften Zustandsänderungen einwandfrei wiedergibt. Da man aber Analogiebetrachtungen meist nur anwendet, um Aufschluß über Fragen zu erhalten, die auszuführende Versuche bzw. die dazu erforderliche Versuchsanordnung betreffen, ist die Unvollkommenheit des Analogons nicht weiter störend. Man muß sie sich jedoch stets vor Augen halten und die Erfassung von Einzelheiten im Verhalten der Werkstoffe dem Versuch selbst überlassen. Dieselben Überlegungen gelten natürlich für die Prüfung bei Wechselbeanspruchung. Solange man bei metallischen Werkstoffen im Beanspruchungsgebiet arbeitet, in dem noch keine bleibenden Formänderungen auftreten, kommt man meist mit einem elektrischen Analogon des Prüflings, bestehend aus einem Kondensator mit einem in Serie geschalteten Widerstand aus. Erst wenn der Werkstoff anfängt zu fließen, muß ein zusätzlicher Parallelwiderstand vorgesehen werden.

Schaltungen bei dynamischer Beanspruchung des Prüflings. Nun sollen dieselben Schaltungen bei Wechselbelastung bzw. Betrieb mit Wechselstrom betrachtet werden. Um das Verhalten von Elastizität und Dämpfung bzw. Kapazität und Widerstand bei veränderlicher Frequenz im einzelnen festzustellen, muß die eingeprägte, äußere Wechselkraft (Wechselspannung) in eine Blind- und Wirkkomponente zerlegt werden. Die unmittelbare Zerlegung ist nur bei der Parallelschaltung von Federung und Dämpfung und der entsprechenden Serienschaltung von Kapazität und Widerstand möglich (Bild 2). Bei den Schaltungen Bild 3 sind die Kräfte bzw. Spannungen an den beiden Elementen der Schaltung dieselben, man kann die Gesamtkraft erst zerlegen, wenn man die Schaltungen durch Umformung in Anordnungen gemäß Bild 2 überführt. Die Dämpfung durch Parallelwiderstand wird oft mit „Abklingung" bezeichnet[10]. Der Parallelwiderstand R_2 läßt sich durch einen gleichwertigen Serienwiderstand R_1 nach der Formel

$$R_1 = \frac{R_2}{R_2^2\,\omega^2\,C_2^2 + 1}$$

ersetzen[2]. Über die Natur des Parallelwiderstandes R_2 ist wenig bekannt, er soll hier als ohmscher, frequenzunabhängiger Widerstand angenommen werden; es ist

aber sogar möglich, daß er mit der Frequenz zunimmt. Der Ersatzwiderstand wird also gemäß obiger Formel mit der Frequenz stark abnehmen, im Grenzfall bei sehr hoher Frequenz wird er praktisch zu null. Die Abnahme erfolgt hier quadratisch, während der Serienwiderstand, wie früher dargelegt, umgekehrt proportional mit der Frequenz abnimmt. Bei einem Material,

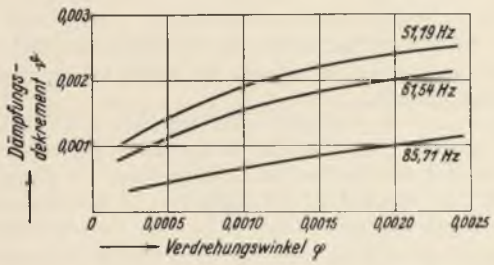


Bild 4. Dämpfungsdekremente bei verschiedener Frequenz für Elektron nach Kortum.

dessen Verhalten sich mit den Schaltungen Bild 2 deckt, werden also Dämpfungsdekrement und Verlustwinkel unabhängig von der Frequenz sein, dagegen mit der Frequenz fallen bei einem Werkstoff, dessen Ersatzschaltungen durch Bild 3 dargestellt sind. Unter den vielen bekannten Materialien, deren Dekrement mit der Frequenz abnimmt, sind sogar Metalle vertreten, z. B. Elektron, wie aus Bild 4 deutlich hervorgeht. Man erkennt bei dieser Darstellung auch die starke Abhängigkeit der Dämpfung von der Verformung des Prüflings.

Die Schaltart beeinflußt in gleicher Weise die elastischen Eigenschaften (Zusammendrückbarkeit) des Werkstoffes. Es muß auch hier wie im Falle der Dämpfung für den Parallelkondensator C_2 der gleichwertige Serienkondensator C_1 eingeführt werden. Die entsprechende Formel lautet:

$$C_1 = C_2\left(1 + \frac{1}{R_2^2\,\omega^2\,C_2^2}\right)$$

Der Ersatzkondensator enthält also einen zusätzlichen, stark frequenzabhängigen Anteil, um den er größer ist als der entsprechende Serienkondensator. Bei höherer Frequenz sind beide Kapazitäten praktisch gleich. Ins Mechanische übersetzen bedeutet das: Die Federkonstante (Elastizitätsmodul) wird bei derartigen Materialien um so größer, je höher die Prüffrequenz ist. Im übrigen läßt sich diese Erscheinung auch ohne weiteres aus dem mechanischen Ersatzschema (Bild 2a u. 3a) ersehen, wenn man berücksichtigt, daß der Elastizitätsmodul definiert ist durch den Ausdruck „Federkraft/Weg des Angriffspunktes der Kraft". Bei der Parallelschaltung von Federung und Dämpfung entspricht der Weg der gesamten Anordnung auch der Zusammendrückung der Feder, die Frequenz übt hier keinen Einfluß aus. Bei der Hintereinanderschaltung kommt zum Weg der Federung noch ein zeitabhängiger Anteil infolge der zusätzlichen Bewegungen des Dämpfungskolbens hinzu, so daß sich eine Erniedrigung des E-Moduls ergibt. Je höher die Frequenz ist, um so weniger Zeit hat die Dämpfung, um sich zu verschieben, und um so kleiner werden daher auch die zusätzlichen Wege sein, d. h. der E-Modul nimmt mit der Frequenz zu. In Bild 5 ist der E-Modul von Funda,

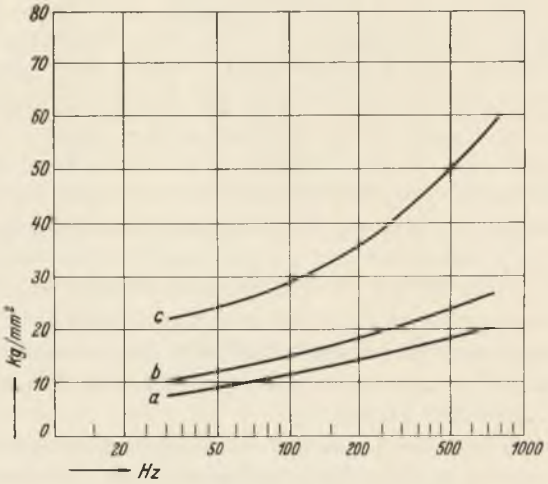


Bild 5. Elektrizitätsmodul von Funda in Abhängigkeit von der Frequenz nach Costadoni
a) Belastung 1,1 kg/cm², b) Belastung 2,2 kg/cm², c) Belastung 4,8 kg/cm²

einem Material, das in der Hauptsache aus Gelatine und Glyzerin besteht, nach Costadoni[6] wiedergegeben. Wie man sieht, ergibt sich eine stärkere Zunahme des Elastizitätsmoduls mit der Frequenz. Es liegt hier allerdings noch ein weiterer Einfluß vor, der zur Erhöhung des E-Moduls mit der Frequenz beiträgt. Bei der dynamischen Bestimmung des E-Moduls im Gebiet höherer Frequenzen handelt es sich nämlich um einen adiabatischen bzw. angenähert adiabatischen Vorgang, während die statische und niederfrequente Messung praktisch isotherm verläuft[11].

Literatur.

1. O. Müller, Dynamische Werkstoffprüfung, ATM V 9115—3. — 2. K. Küpfmüller, Einführung in die theoretische Elektrotechnik, J. Springer, Berlin 1932, S. 122. — 3. E. Lehr, Schwingungstechnik, Bd. 1, J. Springer, Berlin 1930. — 4. E. Becker und O. Föppl, Dauerversuche zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften. Beziehungen zwischen Baustoffdämpfung und Verformungsgeschwindigkeit, Forschungsarb. a. d. Gebiet des Ingenieurwesens, Heft 304. — 5. H. Kortum, Über Materialdämpfung bei Dauerbeanspruchung durch Torsionsschwingungen, Techn. Mechanik und Thermodynamik 1 (1930), S. 297—307. — 6. Costadoni, Ein elektrodynamisches Gerät zur Messung mechanischer Scheinwiderstände von Körperdämmstoffen, insbesondere bei Belastung. — 7. v. Schlippe, Ing. Arch. 6 (1935) S. 127. — 8. H. Neubert, Über Fundamentschwingungen mit geschwindigkeitsunabhängiger Dämpfung. — 9. H. Fromm, Nachwirkung und Hysteresis, Handb. d. Techn. Mech. Bd. 4, T. 1 (1931). — 10. A. Cramwinkel, C. J. Dippel u. G. Heller, Die Dämpfung mechanischer Schwingungen, Philips Techn. Rundschau 1 (1936) S. 376/377. — 11. E. Grüneisen, Der dynamisch und statisch gemessene Elastizitätsmodul, Ann. d. Physik. 22 (1907), S. 842.

Toleranz von Rechengrößen

J
021 – 3

Verfasser: Dr.-Ing. Hans Prinz, Nürnberg

DK 621.317.088

I. Definition. Zunächst sei vorausgeschickt, daß entsprechend einem Vorschlage von G. Keinath[1] für die folgenden Betrachtungen an Stelle des bisher üblichen Ausdruckes „Genauigkeit" das Wort „Toleranz" gebraucht werden soll. Das Wort Genauigkeit ist, wie Keinath richtig feststellt, unglücklich gewählt, weil einer größeren Genauigkeit stets eine kleinere Zahl entspricht, während, wenn man von Toleranz spricht, einer größeren Toleranz folgerichtig auch eine größere Zahl entspricht.

Unter Toleranz wird die größtmögliche prozentuale Abweichung einer Größe von ihrem tatsächlichen Wert verstanden. Im folgenden soll der Einfachheit halber nur mit Plustoleranzen gerechnet werden, das heißt, ist eine Größe a mit einer Toleranz von $x\%$ gegeben, dann liegt ihr tatsächlicher Wert zwischen den Grenzen a und $a\,(1 + x/100)$.

II. Aufgabenstellung. In der Praxis liegt häufig die Aufgabe vor, die Genauigkeit, oder nun besser gesagt die Toleranz einer Rechengröße zu suchen, die durch Anwendung gegebener Rechenoperationen aus zwei oder mehreren durch Messung bestimmte Größen oder Konstanten ermittelt werden soll, deren Toleranz gegeben oder durch Versuch bekannt ist. Dabei kann es sich einerseits um Meßgrößen und Konstanten handeln, die aus einem einzigen Versuchsaufbau ermittelt wurden; in diesem ersten Falle wird es sich also darum handeln, aus den Toleranzen der einzelnen meßbaren Größen die Meßtoleranz der gesamten Versuchsanordnung zu errechnen. Oder aber es handelt sich um Meßgrößen, die aus mehreren Versuchsaufbauten ermittelt und dann formelmäßig ausgewertet werden. In diesem zweiten Fall wird aus den Toleranzen der einzelnen Meßgrößen die Toleranz einer neuen daraus abgeleiteten Rechengröße zu bestimmen sein.

Einige Beispiele sollen das Gesagte klarer veranschaulichen:

Mit Hilfe der bekannten Stromspannungsmessung soll der Ohmsche Widerstand einer Spule bestimmt werden. Die Meßtoleranzen des verwendeten Strom- und Spannungsmessers seien bekannt. Die Frage lautet nun, mit welcher Toleranz sich der Widerstand aus Strom und Spannung ermitteln läßt. Oder mathematisch gesprochen: Wie groß ist die Toleranz einer dritten Größe (Widerstand), wenn zwei Meßgrößen (Spannung und Strom), deren Toleranzen bekannt sind, durcheinander dividiert werden.

In einem zweiten Beispiel werde mittels einer Brücke der Ohmsche Widerstand R einer Spule mit einer bestimmten gegebenen Meßtoleranz ermittelt. Mit einer zweiten Brückenanordnung werde der Selbstinduktionskoeffizient L der gleichen Spule mit einer bestimmten anderen Meßtoleranz gemessen. Gesucht sei nun die Toleranz des aus diesen beiden Meßgrößen sich errechnenden Scheinwiderstandes $\overline{G} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ für eine gegebene Kreisfrequenz ω.

Oder in einem dritten Beispiel soll die Temperaturzunahme einer Spule aus ihrer experimentell ermittelten Widerstandszunahme errechnet werden. Die beiden Widerstände bei den gegebenen Temperaturen seien mittels einer Brücke von gegebener Meßtoleranz bestimmt worden. Gesucht werde die Toleranz, mit der sich die Temperaturzunahme durch eine solche Widerstandsmessung ermitteln läßt.

Bei dieser Art von Aufgaben handelt es sich also stets darum, bei Anwendung einer bestimmten Rechenvorschrift aus zwei oder mehreren gegebenen Meßgrößen, deren Toleranzen bekannt sind, die Toleranz einer daraus sich ableitenden neuen Größe rechnerisch zu ermitteln.

Zur Lösung dieser Aufgabe muß man sich zunächst darüber klar werden, in welcher Weise sich die Toleranz einer Größe bei Anwendung einer bestimmten Rechenoperation, beispielsweise durch Addition, Subtraktion usw. ändert. Kennt man diese Gesetze, dann läßt sich die gestellte Aufgabe auch ganz allgemein lösen.

III. Grundgleichungen. Im folgenden sollen die wichtigsten Grundgleichungen hierfür abgeleitet und kurz erläutert werden.

Gegeben seien die Absolutbeträge zweier Meßgrößen a und b, deren Toleranz x und $y\%$ betragen. Gesucht sei die Toleranz z in % einer Größe c, die durch folgende Rechenoperation aus den gegebenen Größen a und b abgeleitet werde: 1. Addition $(a + b)$, 2. Subtraktion $(a - b)$, 3. Multiplikation $(a \cdot b)$, 4. Division (a/b), 5. Potenz (a^n), 6. Wurzel $\left(\sqrt[n]{a}\right)$, 7. Exponentialfunktion (e^a) und 8. Logarithmus (ln = Logarithmus a).

1. Addition. Bei Summation der beiden Größen a und b ergibt sich für die Toleranz z der Summe $(a + b)$ in %

$$z = \frac{a\,(1 + x/100) + b\,(1 + y/100) - (a + b)}{a + b}\,100,$$

oder

$$z = \alpha\, x,$$

wenn

$$\alpha = \frac{\dfrac{a}{b} + \dfrac{y}{x}}{\dfrac{a}{b} + 1} \qquad (1)$$

ist. Die Toleranz z in % ergibt sich demnach durch Multiplikation der Toleranz x in % mit dem dimensions-

losen Faktor α, der seinerseits nur von den Verhältnissen a/b und y/x abhängig ist.

Für den Sonderfall, daß zu der gegebenen Größe a eine konstante Zahl b addiert werde, ist $y = 0$ und damit

$$\alpha = \frac{\frac{a}{b}}{\frac{a}{b} + 1}.$$

Sind die Toleranzen der beiden Größen a und b einander gleich, was immer dann der Fall sein wird, wenn die Meßgrößen mit derselben Versuchsanordnung bestimmt wurden, dann gilt

$$\alpha = 1,$$

oder

$$z = x = y,$$

das heißt, die Toleranz der Summe zweier Größen gleicher Meßtoleranz ist gleich der Toleranz der einzelnen Summanden.

Zur leichteren Berechnung ist in Bild 1 der Faktor α für verschiedene Verhältnisse a/b mit dem Verhältnis y/x als Parameter dargestellt. Die gesuchte Größe z ergibt sich dann durch Multiplikation des Faktors α mit der Toleranz x.

Aus Bild 1 geht anschaulich hervor, daß alle Kurven mit größer werdendem Verhältnis a/b dem Werte $\alpha = 1$ zustreben. Nachdem die Toleranz z der Summe nur wenig verschieden sein soll von der kleineren Meßtoleranz der beiden Summanden a und b, so muß nach Möglichkeit ein Faktor $\alpha \approx 1$ angestrebt werden, was sich für den allgemeinen Fall $y/x \neq 1$ immer dadurch erreichen läßt, daß das Verhältnis von a/b möglichst groß gewählt ist ($a/b > 10$). Für kleine Verhältnisse von a/b dagegen ist dies nur dadurch erreichbar, daß $y/x \approx 1$ gewählt wird.

Aus Bild 1 geht weiter hervor, daß es vom Toleranzstandpunkt keinen Sinn hat, Meßgrößen miteinander zu addieren, deren Toleranzen sehr voneinander abweichen, und zwar ist dies um so mehr zu verurteilen, je kleiner das Verhältnis von a/b, also je größer b bei konstantem a wird. So würde beispielsweise bei einem Verhältnis $a/b = 2$ und $y/x = 5$ die Summe $(a + b)$ eine etwa 2,3-mal größere Toleranz besitzen als die Größe a.

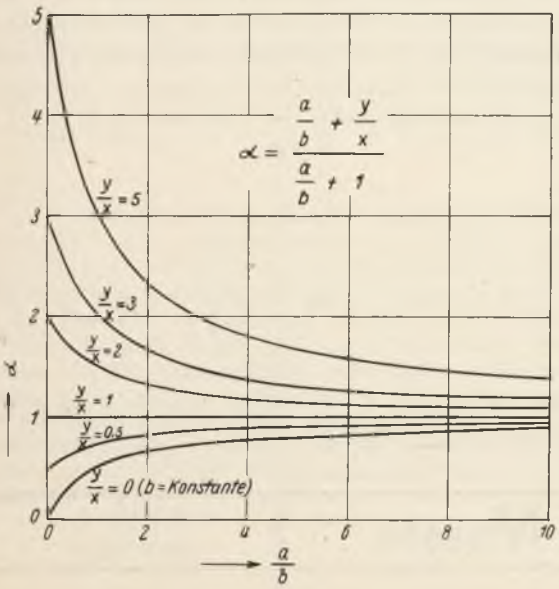


Bild 1. Faktor α in Abhängigkeit vom Verhältnis a/b für verschiedene Verhältnisse y/x.

Es ergibt sich hieraus die wichtige Erkenntnis, daß nach Möglichkeit Größen annähernd gleicher Toleranz zu addieren sind. Für Fälle, wo dies nicht erreichbar ist, soll das Verhältnis der beiden Meßgrößen groß gewählt werden, wobei die Zahl mit der größeren Toleranz möglichst klein sein soll.

Gegen dieses Grundgesetz wird in der Praxis noch häufig verstoßen, indem auf der einen Seite für einen Meßwert eine übertrieben kleine Meßtoleranz angestrebt, auf der anderen Seite aber nicht bedacht wird, daß diese kleine Toleranz wertlos ist, wenn nicht auch die mit dieser Größe zu kombinierenden anderen Meßgrößen mit annähernd derselben Toleranz bestimmt werden.

2. Subtraktion. Werden die beiden Größen a und b voneinander abgezogen, wobei $a > b$ sein soll, dann ergibt sich in ähnlicher Weise für die Toleranz z der Differenz $(a - b)$

$$z = \beta x,$$

wenn

$$\beta = \frac{\frac{a}{b} + \frac{y}{x}}{\frac{a}{b} - \left(1 + \frac{y}{100}\right)} \qquad (2)$$

ist. Der Ausdruck für β ist ähnlich aufgebaut, wie der Faktor α für die Summenbildung, nur mit dem Unterschied, daß β auch von der Toleranz y abhängig ist. Für $y/100 \ll 1$ ist jedoch der Einfluß von y verschwindend klein.

Wird von a eine konstante Zahl b abgezogen, dann wird $y = 0$ und damit

$$\beta = \frac{\frac{a}{b}}{\frac{a}{b} - 1}.$$

Für gleiche Toleranzen x und y wird

$$\beta = \frac{\frac{a}{b} + 1}{\frac{a}{b} - \left(1 + \frac{y}{100}\right)},$$

das heißt, β wird nur dann gleich 1, wenn a/b möglichst groß gewählt wird.

In Bild 2 sind die Faktoren β in Abhängigkeit vom Verhältnis a/b für verschiedene Verhältnisse von y/x dargestellt, wenn die Toleranz y zwischen 1...10% schwankt. Der Kurvenverlauf ist ähnlich jenem des Faktors α. Auch hier gilt wieder, daß für $\beta \approx 1$ das Verhältnis a/b möglichst groß sein soll. Für kleine Werte von a/b läßt sich jedoch, im Gegensatz zur Addition, kein Wert von $\beta \approx 1$ für den Fall erreichen, daß die beiden Meßgrößen mit gleicher Toleranz bestimmt wurden.

3. Multiplikation. Werden die beiden Größen miteinander multipliziert, dann ergibt sich für die Toleranz des Produktes in %

$$z = x + y + \frac{x\,y}{100}, \qquad (3)$$

wenn die Toleranzen x und y in % eingesetzt werden. In diesem Falle ist z von dem Verhältnis a/b unabhängig. Die Beziehung besagt weiter, daß die Toleranz eines Produktes zweier Meßgrößen stets größer ist als die Summe der Toleranzen der einzelnen Meßgrößen, und zwar ist das um so mehr der Fall, je größer die beiden Toleranzen x und y sind. Wurden beispielsweise zwei

Meßgrößen mit einer Toleranz von 5 und 10% ermittelt, dann ergibt sich für das Produkt der beiden Größen eine Toleranz von 15,5%.

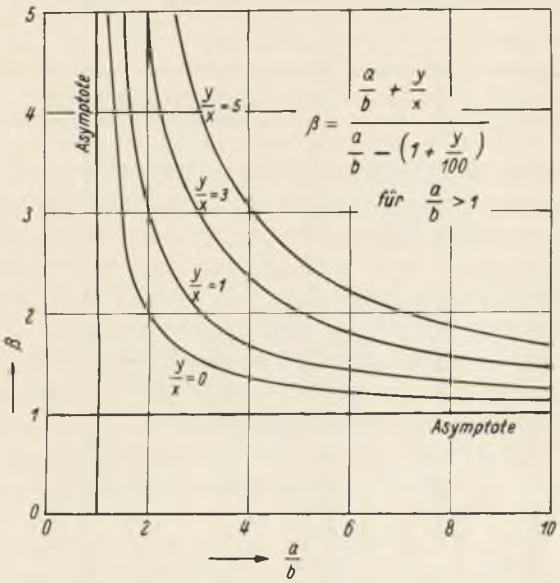


Bild 2. Faktor β n Abhängigkeit vom Verhältnis a/b für verschiedene Verhältnisse y/x und einem Toleranzbereich $y = 1...10\%$.

Für den Sonderfall $y = 0$ wird $z = x$, was auch der Fall sein muß. Für $y = x$ wird

$$z = 2x + \frac{x^2}{100}.$$

4. Division. In Analogie folgt für die Toleranz z des Quotienten a/b

$$z = x + y + \frac{x\,y}{100}, \tag{4}$$

also die gleiche Beziehung, wie für die Toleranz des Produktes. Werden demnach zwei Zahlen durcheinander dividiert, dann ist die Toleranz des Quotienten stets größer als die Summe der Toleranzen von Dividend und Divisor.

5. Potenz. Die Meßgröße a mit der Toleranz x soll in die n-te Potenz erhoben werden. Die Toleranz der Potenz a^n ist dann

$$z = \left[\left(1 + \frac{x}{100}\right)^n - 1\right] 100, \tag{5}$$

oder für $n = 2$ (Quadrieren)

$$z = 2x + \frac{x^2}{100}$$

entsprechend dem Sonderfall $y = x$ von Gl. (3), und für $n = 3$ (dritte Potenz)

$$z = 3x + 3\frac{x^2}{100} + \frac{x^3}{100^2},$$

und für $n = 4$

$$z = 4 + 6\frac{x^2}{100} + 4\frac{x^3}{100^2} + \frac{x^4}{100^3}.$$

6. Wurzel. Für die Toleranz $\sqrt[n]{a}$ wird analog

$$z = \left(\sqrt[n]{1 + \frac{x}{100}} - 1\right) 100, \tag{6}$$

oder für $n = 2$ (Quadratwurzel)

$$z = \frac{x}{2} - \frac{1}{8}\frac{x^2}{100},$$

und für $n = 3$ (Kubikwurzel)

$$z = \frac{x}{3} - \frac{1}{9}\frac{x^2}{100}.$$

7. Exponentialfunktion. Für die Toleranz der Funktion e^a ergibt sich

$$z = \left(e^{a\frac{x}{100}} - 1\right) 100. \tag{7}$$

8. Logarithmus. In ähnlicher Weise wird für den Logarithmus der Größe a

$$z = \left(\frac{\ln\left(1 + \frac{x}{100}\right)}{\ln a}\right) 100. \tag{8}$$

IV. Rechnungsgang. Bei Auswertung der Toleranzen von komplizierteren Ausdrücken empfiehlt es sich, die abgeleiteten Grundgleichungen schrittweise auf die gegebene Rechenoperation anzuwenden. Zur leichteren Auswertung sind in nachstehender Übersichtstafel die abgeleiteten 8 Grundformeln zusammengestellt.

V. Beispiel. Zur Erläuterung des angegebenen Verfahrens sollen nachstehende drei Beispiele durchgerechnet werden:

a) Gegeben seien 3 Meßgrößen A, B und C, die mit einer Toleranz von $u = 1\%$, $v = 2\%$ und $w = 5\%$ ermittelt wurden. Gesucht ist die Toleranz der Rechengröße D, die durch die Beziehung

$$D = \sqrt{\frac{A\,C}{B}}$$

bestimmt sei.

Nach Gl. (3) wird für die Toleranz des Zählers:

$$z_1 = u + w + \frac{u\,w}{100} = 6{,}05\,\%,$$

und nach Gl. (4) für den Quotienten

$$z_2 = z_1 + v + \frac{z_1\,v}{100} = 8{,}17\,\%,$$

und nach Gl. (6) für die Toleranz der Wurzel

$$z_3 = \frac{z_2}{2} - \frac{1}{8}\frac{z_2}{100} = 4\,\%,$$

das heißt für die errechnete Größe D ergibt sich eine Toleranz von 4%.

b) Zur Berechnung der Temperaturzunahme einer Kupferspule wurde der Widerstand der Spule kalt (R_1) und warm (R_2) mit einer Toleranz von 1% gemessen, wobei $R_2/R_1 = 1{,}4$ sei. Gesucht ist die Toleranz der Temperaturzunahme $\Delta\vartheta$, für die folgende Beziehung gilt:

$$\Delta\vartheta = K\frac{R_2 - R_1}{R_1},$$

wenn K eine Konstante bedeutet.

Nach Gl.(2) wird für die Differenz

$$z_1 = \left(\frac{R_2/R_1 + 1}{R_2/R_1 - \left(1 + \frac{u}{100}\right)}\right) u = 6\,\%,$$

und für den Quotienten nach Gl. (4)

$$z_2 = z_1 + u + \frac{z_1\,u}{100} = 7{,}06\,\%.$$

Obgleich der Widerstand mit einer Toleranz von 1% gemessen wurde, läßt sich die Temperaturzunahme nach dieser Differenzmethode nur mit einer Meßtoleranz von etwa 7% ermitteln. Nachdem eine 40-prozentige Widerstandszunahme bei Kupfer einer Temperaturzunahme von etwa 100% entspricht, würde das bedeuten, daß die Temperaturzunahme nur mit einer Meßtoleranz von etwa 7° bestimmbar wäre. Bei einer Verminderung

Übersichtstafel.

Gegeben sind die Absolutbeträge zweier Meßgrößen a und b, die mit einer Genauigkeit von x und y% ermittelt wurden.
Gesucht ist die Genauigkeit z in % einer dritten Größe c bei Anwendung folgender Rechenoperationen:

Nr.	Rechenoperation:	c:	Sonderfall:	z in %:
1	Addition	$a+b$	—	$z=\left(\frac{\frac{a}{b}+\frac{y}{x}}{\frac{a}{b}+1}\right)x=\alpha x$
			$b=$ konstante Zahl	$z=\left(\frac{\frac{a}{b}}{\frac{a}{b}+1}\right)x$
			$y=x$	$z=x=y$
2	Subtraktion	$a-b$	—	$z=\left(\frac{\frac{a}{b}+\frac{y}{x}}{\frac{a}{b}-\left(1+\frac{y}{100}\right)}\right)x=\beta x$
			$b=$ konstante Zahl	$z=\left(\frac{\frac{a}{b}}{\frac{a}{b}-1}\right)x$
			$y=x$	$z=\left(\frac{\frac{a}{b}+1}{\frac{a}{b}-\left(1+\frac{x}{100}\right)}\right)x$
3	Multiplikation	$a\cdot b$	—	$z=x+y+\frac{xy}{100}$
			$b=$ konstante Zahl	$z=x$
			$y=x$	$z=2x+\frac{x^2}{100}$
4	Division	$\frac{a}{b}$	—	wie bei Multiplikation
5	Potenz	a^n	—	$z=\left[\left(1+\frac{x}{100}\right)^n-1\right]100$
			$n=2$	$z=2x+\frac{x^2}{100}$
			$n=3$	$z=3x+3\frac{x^2}{100}+\frac{x^3}{100^2}$
6	Wurzel	$\sqrt[n]{a}$	—	$z=\left(\sqrt[n]{1+\frac{x}{100}}-1\right)100$
			$n=2$	$z=\frac{x}{2}-\frac{1}{8}\frac{x^2}{100}$
			$n=3$	$z=\frac{x}{3}-\frac{1}{9}\frac{x^2}{100}$
7	Exponentialfunktion . .	e^a	—	$z=\left(e^{a\frac{x}{100}}-1\right)100$
8	Logarithmus	$\ln a$	—	$z=\left(\frac{\ln\left(1+\frac{x}{100}\right)}{\ln a}\right)100$

der Widerstandstoleranz auf 0,5% ließe sich die Toleranz der Temperaturzunahme auf etwa 2,9° verbessern.

c) Auf einer Meßbrücke werde die Kapazität C bzw. der Verlustfaktor $\tan\delta$ eines Kondensators mit einer Toleranz von $u=0{,}5\%$ bzw. $v=1\%$ gemessen. Gesucht ist die Toleranz, mit der sich hieraus die Verluste N bei der Meßspannung U ($w=0{,}5\%$) und einer bestimmten Frequenz nach der Formel

$$N=\omega C\tan\delta\, U^2$$

ermitteln lassen.

Für das Produkt $\omega C\tan\delta$ wird

$$z_1=u+v+\frac{uv}{100}=1{,}5\,\%,$$

und für das Spannungsquadrat ergibt sich

$$z_2=2w+\frac{w^2}{100}=1{,}0\,\%,$$

und damit für die gesuchte Toleranz

$$z_3=z_1+z_2+\frac{z_1 z_2}{100}=2{,}5\,\%.$$

Bei komplizierteren Ausdrücken ist in derselben Weise zu verfahren.

Literatur.

1. G. Keinath, Genauigkeit von Meßgeräten, ATM J 021—1 (April 1935).

Eisengeschlossene Elektrodynamometer

J 741—9

Verfasser: Dr.-Ing. P. M. Pflier VDE, Berlin

DK 621.317.712

Das eisengeschlossene Elektrodynamometer ist ein Drehspul-Meßwerk, bei dem der Dauermagnet durch einen Elektromagnet und der massive Eisenkern durch einen Blechkern ersetzt wurde[1]. Bild 1 zeigt gebräuchliche Blechschnitte und Drehspul-Anordnungen, Bild 2 ein ausgeführtes Meßwerk mit Luftdämpfung. Bezeichnet d den Durchmesser, l die wirksame Höhe der Drehspule, δ die einfache Länge des Luftweges in cm, ferner AW_1, AW_2 die Amperewindungszahlen der festen und der beweglichen Spule, so ergibt sich für das Drehmoment D bei Phasengleichheit der Felder

$$D = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{981} \cdot \frac{l \cdot d}{2\delta} \cdot AW_1 \cdot AW_2 \text{ cmg}$$

Dabei ist der magnetische Widerstand des Eisenkörpers gegenüber dem des Luftspalts vernachlässigt, was bei fast allen ausgeführten Meßgeräten als zutreffend angesehen werden kann. Diese Gleichung läßt sich aus der bekannten Drehmomenten-Gleichung des Drehspul-Instruments

$$D = \frac{1}{10} \cdot \frac{1}{981} \cdot l \cdot d \cdot AW_1 \cdot \mathfrak{H} \text{ cmg}$$

herleiten, wenn man die Feldstärke im Luftspalt $\mathfrak{H}$ durch die Feld-AW ausdrückt.

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi}{10} \cdot \frac{AW_2}{2\delta}$$

Außer auf die Erzielung eines hinreichenden Drehmoments ist beim Entwurf eines eisengeschlossenen Meßwerks auf kleine Einflußgrößen[2] zu achten, worüber in ATM J 741—2 eingehend berichtet wurde. Mit dem eisengeschlossenen Meßwerk läßt sich eine Anzeige-Toleranz $\pm 0{,}5 \ldots \pm 1{,}5\%$ erreichen. In dieser Anzeige-Toleranz sind die Meßwerk-Fehler enthalten, d. s.:

1. Die Eichfehler.
2. Der Krümmungsfehler, d. i. der Unterschied der Anzeige bei Belastung mit 100% Strom und 50% Spannung bzw. 50% Strom und 100% Spannung mit 0,2...0,5%.
3. Der Unsymmetriefehler, d. i. die Anzeige, die bei abgeschalteter Stromspule und normal erregter Spannungsspule durch unsymmetrischen Aufbau entsteht, mit 0,1...0,2%.
4. Der Winkelfehler, d. i. der durch den Fehlwinkel hervorgerufene Fehler. Der Fehlwinkel ist durch die Verluste des Eisenkörpers bedingt und verursacht einen Fehler von 0,5...1%, der meist durch besondere Maßnahmen kompensiert ist.

Im Anzeigefehler nicht enthalten sind die Einflußgrößen, d. s.:

5. Der Temperatureinfluß in Höhe von 0,2...0,3%/10° C.
6. Der Frequenzeinfluß für Frequenzänderungen von $\pm$ 10% in Höhe von weniger als 0,1%. Für Frequenzänderungen zwischen 50 und 100 Hz beträgt der Frequenzfehler etwa 0,5...1%.

Bei Gleichstrom kommen dazu noch folgende weitere Fehler:

7. Der Hysterese-Fehler, d. i. der Unterschied der Anzeige bei steigendem und fallendem Strom mit etwa 1...2%.
8. Der Remanenzfehler, d. i. die Anzeige, die bei abgeschalteter Stromspule und normal erregter Spannungsspule durch den Restmagnetismus des Eisenkörpers hervorgerufen wird, in Höhe von etwa 0,7%.

Die genannten Fehler sind in % vom Meßbereichendwert angegeben und aus der Untersuchung verschiedener Fabrikate ermittelt.

Die Instrumente sind demnach für Gleichstrom viel weniger geeignet als für Wechselstrom, weshalb man für Gleichstrom-Messungen Sonderausführungen verwendet, deren Eisenkörper aus besonderen Nickel-Eisen-Legierungen aufgebaut ist, oder bei denen die Feldspule an der weniger stark schwankenden Spannung, die Drehspule dagegen im Stromkreis liegt.

Bild 2. Eisengeschlossenes Dreheisen-Meßwerk mit elliptischem Eisenkern, außenliegender Stromspule und Luftdämpfung.
1 Feldkörper, *2* Stromspule, *3* Drehspule, *4* Kupplungsrolle, *5* Drehmomentfedern, *6* Dämpfungskammer.

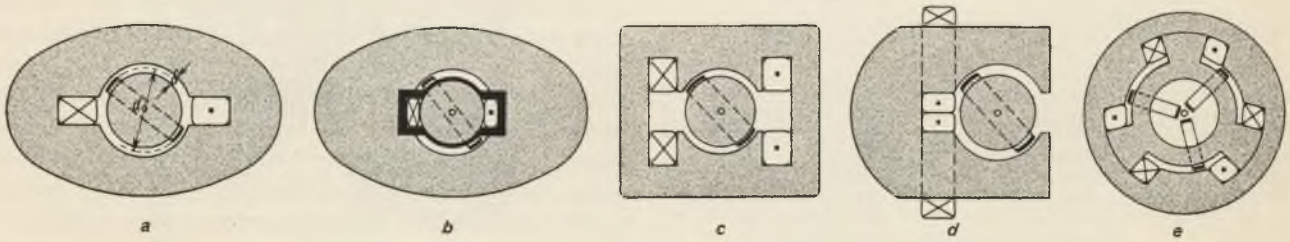


Bild 1. Blechschnitte und Spulenanordnung eisengeschlossener Meßwerke
a elliptische Ausführung mit außenliegender Feldspule
b elliptische Ausführung mit innenliegender Feldspule
c quadratische Form
d Hufeisenform
e Kreisform mit 3 Systemen.

Im folgenden werden zwei Beispiele tragbarer Leistungsmesser näher beschrieben:

1. Leistungsmesser für Dreileiter-Drehstrom beliebiger Belastung mit Zusatzgerät für Wirk- und Blindleistungsmessung und mehrfacher Konstanten-Umschaltung (Bild 3): Das Meßgerät enthält zwei Meß-

Bild 3. Tragbarer Leistungsmesser für Drehstrom beliebiger Belastung mit Zusatzgerät für Blindle.stungsmessung, Meßbereiche 5 A; 125, 250, 500 V, $C = 0{,}5$ und 1, *1* Spannungsklemmen *RST*, *2* Stromklemmen *RT*, *3* Anschlußklemmen für das Zusatzgerät, *4* Spannungsklemmen des Zusatzgerätes, *5* Umschalter für die Meßbereichkonstanten 0,5 und 1, *6* Umschalter für Wirk- und Blindleistung, *7* Nullstellung.

werke mit Bandkupplung und ist für Wirkleistungsmessung bei 5 A, 125 V, geeignet, wobei eine Konstanten-Umschaltung im Spannungskreis nach Bild 4 eine Änderung des Meßbereichs im Verhältnis 1:2 gestattet. Außer den notwendigen Anschlußklemmen für Strom und Spannung hat das Gerät vier weitere Spannungsklemmen, mit denen es mit einem Blindleistungs-Meßzusatz verbunden werden kann, und von denen zwei normalerweise kurzgeschlossen sind. Die Blindleistungsmessung erfolgt nach dem Widerstandsverfahren[3]. In dieser Schaltung arbeiten bei Wirkleistungsmessung und Blindleistungsmessung verschiedene Ströme und Spannungen auf ein Meßwerk, nämlich

Meßwerk	Wirkleistung		Blindleistnng	
	Strom	Spannung	Strom	Spannung
1	*R*	*RS*	*R*	*TO*
2	*T*	*TS*	*T*	*RO*

Die notwendige Phasenverschiebung um 90° wird also nicht durch eine Kunstschaltung, sondern durch

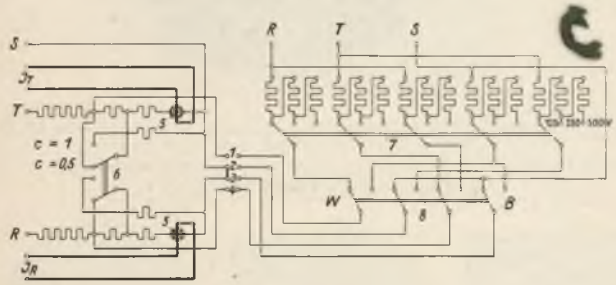


Bild 4. Schaltung des Wirk- und Blindleistungsmessers für Drehstrom beliebiger Belastung, 5 A, 125 V, und Konstanten-Umschaltung $C = 1$ und 0,5, mit Zusatzgerät für Wirk- und Blindleistungsmessung bei den Spannungen 125, 250, 500 V.
J_R und J_T Stromklemmen, *RST* Spannungsklemmen, *1...4* Verbindungsklemmen mit dem Zusatzkasten, *5* Meßwerk, *6* Konstanten-Umschalter $C = 1$, $C = 0{,}5$, *7* Meßbereich-Umschalter 125, 250, 500 V, *8* Wirk- und Blindleistungs-Umschalter.

Phasenvertauschung gewonnen. Da bei der Wirkleistungsmessung die verketteten Spannungen, bei der Blindleistungsmessung die Erdspannungen verwendet werden, sind die Vorwiderstände für die beiden Messungen im Verhältnis $\sqrt{3}:1$ zu stufen. Die vollständige Schaltung zeigt Bild 4. Sie hat den Vorteil, in weiten Grenzen frequenz- und kurvenformunabhängig zu sein und läßt sich leicht für mehrere Spannungsmeßbereiche ausführen, wie es bei dem vorliegenden Gerät geschehen

Bild 5. Tragbarer Leistungsmesser mit drei eisengeschlossenen Meßwerken für Vierleiter-Drehstrom beliebiger Belastung.

ist. Bei der Benutzung des Zusatzkastens wird die Spannung statt an die Klemmen *RST* des Meßgerätes an die gleichnamigen Klemmen des Zusatzkastens angeschlossen.

2. Leistungsmesser für Vierleiter-Drehstrom beliebiger Belastung (Bild 5)[4]: Der Eisenkörper ist bei diesem Meßwerk unterteilt in ein feststehendes Ständerstück und ein bewegliches Schlußjoch (Bild 6). Die Schnittfugen der beiden Eisenkörper bilden Bogenstücke desselben Kreises, so daß sich beide Teile gegeneinander verdrehen lassen, wodurch sich die Breite des Luftspaltes und somit der Skalenverlauf verändern läßt. Im Luftspalt bewegt sich die eine axiale Seite der Drehspule; an seinen Enden liegen die beiden Schen-

1 feststehendes Ständerstück,
2 drehbares Jochstück,
3 Drehpunkt des Jochstückes,
4 Drehachse der beweglichen Spule,
5 geschnittener Schenkel der Feldwicklung,
6 Langlöcher für die Verdrehung des Joches,
7 geschnittener Schenkel der Drehspule.

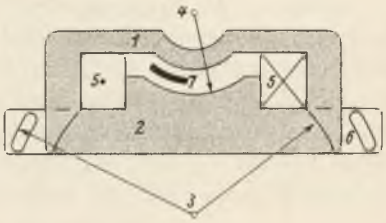


Bild 6. Blechschnitt des Leistungsmessers für Vierleiter-Drehstrom beliebiger Belastung.

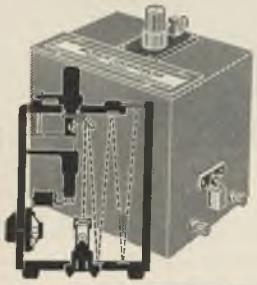
kel der Feldwicklung. Zwei solche um 180° versetzte Systeme mit gemeinsamer Drehachse bilden ein Dreileiter-Drehstrom-Meßwerk. Durch Anordnung eines dritten, axial versetzten Meßwerks ergibt sich ein Meßgerät für Vierleiter-Drehstrom, und durch ein viertes, symmetrisch zum dritten liegendes Meßwerk ließe sich ein Instrument zur Summierung zweier Dreileiter-Drehstromleistungen bauen. Das Gerät verbraucht im Strompfad etwa 2 VA, im Spannungspfad 10 mA und erreicht den Endausschlag bei cos φ 0,5. Es ist also besonders geeignet zu Messungen bei kleinem Leistungsfaktor oder bei überdimensionierten Stromwandlern.

Literatur.

1. G. Keinath, Die Technik elektr. Meßgeräte, 3. Aufl. München, Oldenbourg 1928, Bd. 1, S. 269...298. — 2. W. Geyger, Neueres über elektrodynamische Instrumente und ihre Verwendung in der elektrischen Meßtechnik. Helios, Leipzig 35 (1929), S. 185...191; 197...199. W. Geyger, Messungen an eisengeschlossenen elektrodynamischen Wechselstrom-Leistungsmessern nach der Kompensationsmethode. Arch. Elektrotechn. 22 (1929), S. 119...140. — 3. W. Skirl, Elektr. Messungen, 2. Aufl. Berlin-Leipzig, de Gruyter 1936, S. 251...264. — 4. O. Zwierina, Über eisengeschlossene dynamometrische Meßgeräte. Elektrotechn. u. Maschinenb. 53 (1935), S. 589...597.

»GRAND PRIX« WELTAUSSTELLUNG PARIS

Multiflex-Galvanometer



Das neue Universalinstrument für die Messung und Registrierung kleiner Ströme.

Empfindlich wie ein Spiegelgalvanometer ab 1,5.10 $^{-9}$ A pro Skt.

Einfach im Gebrauch wie ein Zeigerinstrument.

Verschiedene Systeme mit 20 – 5000 Ω.

Für Gleichstrom, Wechselstrom und Hochfrequenz.

Preise ab RM. 240.–.

Verlangen Sie unsere neue Druckschrift 18/38.

DR. B. LANGE

SPEZIALFABRIK LICHTELEKTRISCHER ZELLEN UND APPARATE

Berlin-Dahlem, Garystr. 45/47 FERNRUF: 764939

Wellenmesser

nach Dr. Rohde
Bereich: 5—2000 m

Sondertypen: 3—16 m; 2,5—130 m; 2000—4000 m.

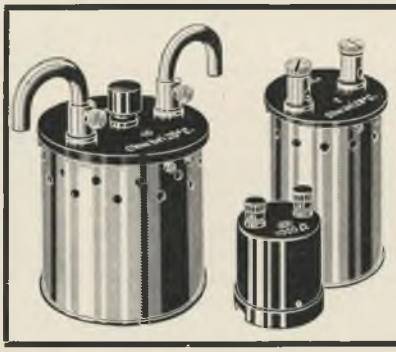
Auf Wunsch andere Bereiche

Dr. Steeg & Reuter, Bad Homburg

Gegr. 1855.

Richard Jahre

Spezialfabrik für Kondensatoren, Berlin SO 16, Köpenicker Straße 33



Robert Abrahamsohn
Berlin-Steglitz

Normal-Widerstände
in Präzisions- und technischer Ausführung.

Neue Liste erschienen.

Anzeigen werben wirtschaftlich!

Midgard-LENKLAMPEN

Einstellbare Arbeitslampen bester Leistung und äußerst solider Ausführung. Wandarme, Tisch- u. Doppeltischarme, Stativlampen.

INDUSTRIEWERK AUMA

RONNEBERGER & FISCHER, AUMA/Thüringen 230

FUESS
Mechanische Meßgeräte

Meteorologische Instrumente

Anzeigende und registrierende Aneroid- und Quecksilber-Barometer. Thermographen, Hygrographen und kombin. Schreibgeräte. Windmesser. Regenmesser. Psychrometer. Sonnenschein-Autographen. Sichtmesser. Prüfapparate für Barometer und Thermometer. Wetterhütten.

Wärmewirtschaftliche Meßgeräte

Anemometer. Staugeräte. Normdüsen. Mikromanometer. Differenzial-Manometer für hohe und niedrige Drücke. Vakuummeter.

Dilathermeter. Erddruck-Meßdosen

für Spannungs- und Dehnungsmessungen sowie Temperaturbestimmungen im Innern von Betonbauten.

Wasserstands- und Wassermengenmesser

Lattenpegel. Anzeig. und schreibende Schwimmerpegel. Fernpegel mit elektr. und pneum. Übertragung. Mengenschreiber und -zähler für Überfallwehre, Pumpen usw.

R. FUESS · Berlin-Steglitz

Optische Drehzahlmessung

— in vielen Fällen die einzige Möglichkeit, die Tourenzahl festzustellen — durch

Zeiss Ikon Stroboskop

das Präzisionsinstrument für Zeitlupenbeobachtung, Frequenzmessung, Gleichmäßigkeitskontrolle

Anfragen erbeten an

Zeiss Ikon A.G., Dresden 16

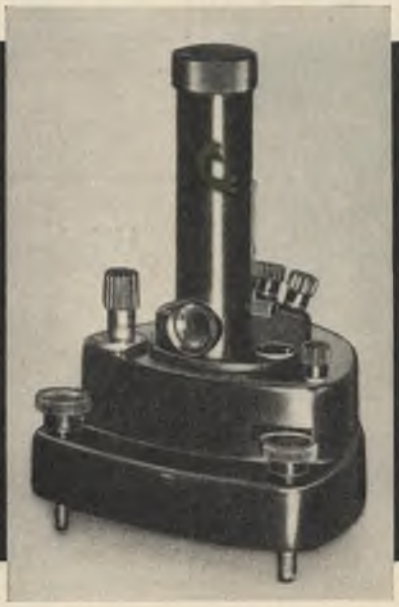
Instrumenten-Abt. 16

SIEMENS
MESSTECHNIK

SPIEGEL-GALVANOMETER

Bisher unerreichte Nullpunktsicherheit

durch hohe Standfestigkeit, Erschütterungsfreiheit, Schutz gegen Luftzug und Staub, Beseitigung von Thermokräften. Kurze Einstellzeit bei geringem Wattverbrauch, weitgehende Anpassungsmöglichkeit.



3 Ausführungen:

Schnellschwinger
(volle Periode 0,5 s)
für physiologische Messungen

Standardform
für allgemeine Laboratoriums- und Betriebsmessungen

Superform
höchste Strom- **und** Spannungs-Empfindlichkeit (mit Autokollimator-Fernrohr: 5×10^{-12} A und 5×10^{-9} V)

23 191

SIEMENS & HALSKE AG
WERNERWERK · BERLIN-SIEMENSSTADT

Führer durch die deutsche Meßgeräte-Industrie

Anemometer

R. FUESS
Berlin-Steglitz

Georg Rosenmüller
Dresden N 6 / 152

Beleuchtungsmesser

Dr. B. Lange,
Berlin-Dahlem, Garystr. 45/47

Ing. Edmund Zierold
Berlin-Schöneberg, Belziger Str. 25

Chronographen -registrierende-

H. Wetzer, Telegraphenfabrik, Pfronten/Bayern

Dampfzähler

Hallwachs & Morckel, Kom.-Ges., Meßapparate-Bau,
Bensheim

Dehnungsmesser

Lehmann & Michels,
Hamburg-Altona

H. Maihak Aktiengesellschaft,
Technische Meßinstrumente,
Hamburg 39

Druckmesser

Georg Rosenmüller
Dresden N 6 / 152

Durchflußmesser

Pollux G.m.b.H., Wassermesser- u. Armaturenfabrik
Ludwigshafen a. Rh., Industriestr. 16

Dynamometer

Hannov. Meßwerkzeug- und Federnfabrik Paul Gräfe
Hannover-W

Feuchtigkeitsmesser

Wilh. Lambrecht,
Göttingen

Frequenzmesser

Dr. Steeg & Reuter
G. m. b. H., Bad Homburg
Postschließfach 44

Galvanometer

P. J. Kipp & Zonen, Delft/Holland
Vertretung für Deutschland:
E. Leybold's Nachfolg., Köln-Bayental

Dr. B. Lange,
Berlin-Dahlem, Garystr. 45/47

Multiflex-Galvanometer

Ing. Edmund Zierold
Berlin-Schöneberg, Belziger Str. 25

Indikatoren

Lehmann & Michels
Hamburg-Altona

H. Maihak Aktiengesellschaft,
Technische Meßinstrumente,
Hamburg 39

Klima-Meßgeräte

R. FUESS
Berlin-Steglitz

Wilh. Lambrecht,
Göttingen

Kolorimeter

P. J. Kipp & Zonen, Delft/Holland
Vertretung für Deutschland:
E. Leybold's Nachfolg., Köln-Bayental

Dr. B. Lange,
Berlin-Dahlem, Garystr. 45/47

Kraft- und Druckmesser

Dr.-Ing. Hans Rumpff,
Bonn a. Rh.

Kurzzeitmeßgeräte

H. Wetzer, Telegraphenfabrik, Pfronten/Bayern

Lehren

ABAWERK G. m. b. H.
Alig & Baumgärtel
ASCHAFFENBURG

Luftmesser

Georg Rosenmüller
Dresden N 6 / 152

Magnetische Meßgeräte

Meßgeta, Elektrotechnische Spezialfabrik, Aschaffenburg,
Weißenburger Str. 36

Mengen-Meßgeräte

Hallwachs & Morckel, Kom.-Ges., Meßapparate-Bau,
Bensheim

Pollux G.m.b.H., Wassermesser- u. Armaturenfabrik
Ludwigshafen a. Rh., Industriestr. 16

ROTA AACHEN

Stabe-Apparatebau, Mengenmesserfabrik für Dampf, Preßluft, Wasser, Gase, Öle, Berlin SO 36.

Meßleitungen und Kontakte

Meßgeta, Elektrotechnische Spezialfabrik, Aschaffenburg,
Weißenburger Str. 36

Meßstäbe

Albert Saß,
Berlin-Steglitz, Filandastr. 32

Meßuhren

ABAWERK G. m. b. H.
Alig & Baumgärtel
ASCHAFFENBURG

Meßwerkzeuge

ABAWERK G. m. b. H.
Alig & Baumgärtel
ASCHAFFENBURG

Mikrometer

Albert Saß,
Berlin-Steglitz, Filandastr. 32

Optische Meßgeräte

R. FUESS
Berlin-Steglitz

Oszillographen

Dr.-Ing. Hans Rumpff,
Bonn a. Rh.

Parallel-Endmaße

ABAWERK G. m. b. H.
Alig & Baumgärtel
ASCHAFFENBURG

pH-Meßgeräte

F. & M. Lautenschläger
G.m.b.H., München 2 SW
Lindwurmstraße 29—31

Photozellen

Dr. B. Lange,
Berlin-Dahlem, Garystr. 45/47

Ing. Edmund Zierold
Berlin-Schöneberg, Belziger Str. 25

Planimeter

Gebrüder Haff, G. m. b. H., Pfronten-Ried, Postfach 107, gegr. 1835. Fabrik für Reißzeuge, Polar-Planimeter, Winkelspiegel.

Präzisions-Reißzeuge

Gebrüder Haff, G. m. b. H., Pfronten-Ried, Postfach 107, gegr. 1835. Fabrik für Reißzeuge, Polar-Planimeter, Winkelspiegel.

Pyrometer

W. C. Heraeus G. m. b. H.,
Hanau

Pyrometer-Schutzrohre

W. C. Heraeus G. m. b. H.,
Hanau

Quarzgut und Quarzglas

Heraeus-Quarzglas G.m.b.H.,
Hanau a. M.

Rauchgasprüfer

H. Maihak Aktiengesellschaft,
Technische Meßinstrumente,
Hamburg 39

Regler

Arca-Regler A.-G.,
Berlin-Schöneberg
Mühlenstr. 9

G-S-T Ges. für selbsttätige Temperaturregelung
Berlin-Wilmdf.

Dr.-Ing. Kieback & Peter
Berlin-Lichtenberg

G. Kromschröder A.-G.,
Osnabrück

Apparatebau
Josef Heinz Reineke, Bochum
Castroper Straße 26

Vesta GmbH., Inh. Max H. Walter
Fabrik für alle Arten Gasregler
Berlin O 34, Grünberger Str. 54

Relais

Franz Baumgartner
Fabrik elektrischer Apparate
Köln - Klettenberg 4

Rotosil

Heraeus-Quarzglas G.m b.H.,
Hanau a. M.

Schablonen

Filler & Fiebig, Berlin SW 68
Schrift- und Zahlenschablonen
Schablonen für Konstrukteure

Schwingungsmesser

Lehmann & Michels
Hamburg-Altona

Spektrographen

R. FUESS
Berlin-Steglitz

P. J. Kipp & Zonen, Delft/Holland
Vertretung für Deutschland:
E. Leybold's Nachfolg., Köln-Bayental

Optische Werke
C. A. Steinheil Söhne G. m. b. H.
München 8, St. Martinstr. 76

Strömungsmesser

Hallwachs & Morckel, Kom.-Ges., Meßapparate-Bau,
Bensheim

Georg Rosenmüller
Dresden N 6 / 152

ROTA AACHEN

Temperatur-Meßgeräte

R. FUESS
Berlin-Steglitz

Julius Heinrich, Fabrik wärmetechnischer Meß- und Regelgeräte
Quedlinbg., Fernsp. 392, Schließf. 55

Wilh. Lambrecht,
Göttingen

Otto Mattner
Werkstätten f. techn. Meßinstrumente
Berlin SO 36, Kottbusser Str. 23

Führer durch die deutsche Meßgeräte-Industrie

G. Siebert G. m. b. H.,
Hanau a. M., Leipziger Str. 10

Terpe & Reinholz,
Quedlinburg A, Gröpern 23
Werkstatt f. techn. Meßinstrumente

Wegener & Mach G.m.b.H.,
Quedlinburg. Gegr. 1887. Spezialfabrik f. Fernthermometer, auch m. Registrierung.

Thermometer

R. FUESS
Berlin-Steglitz

Paul Wegener, Fabrik techn. Meßinstrumente, Ballenstedt 6

Torsionswaage

R. JUNG Aktiengesellschaft
Heidelberg

Viskosimeter

R. JUNG Aktiengesellschaft
Heidelberg

Waagen

Sartorius-Werke Aktiengesellschaft, Göttingen/Leine

Wasserzähler

Pollux G.m.b.H., Wassermesser- u. Armaturenfabrik
Ludwigshafen a. Rh., Industriestr. 16

Wassermesser-Vertriebs-Gesellschaft mbH.,
Berlin W 15, Pariser Str. 44
Alleinvertrieb der Werke:
Bopp & Reuther G. m. b. H.,
Dreyer, Rosenkranz & Droop A.-G.,
Hydrometer Akt.-Ges.,
H. Meinecke A.-G.,
Hermann Pipersberg jr.,
Siemens & Halske A.-G.

Windmesser

Georg Rosenmüller
Dresden N 6 / 152

Zählwerke

Irion & Vosseler,
Zählerfabrik
Schwenningen a. N. A/Württ.

ANZEIGEN IM **ATM** SIND BRÜCKEN ZUM VERBRAUCHER!

PYROMETER jeder Art und für jeden Verwendungszweck

Pyro-Werk G.m.b.H. Hannover

Wärmetechnische Meßgeräte

KEISER & SCHMIDT
Elektrotechnische Fabrik GmbH.
BERLIN-CHARLOTTENBURG 2

Mengenmesser

für

Wasser
Dampf
Gase

Type L-A-R Z Syst. Lang

Momentanzeige!
Registrierung!
Mech. Zählung!

Mechanisches **Tastzählwerk** kann auch **nachträglich** in fast alle Mengenmesser aller Systeme **eingebaut** werden.

Dr. MARTIN BÖHME
Berlin NW 87 · Klopstockstraße 15 H

Das Messen von

Oberflächen-Temperaturen

Fordern Sie Aufklärung von:

WARNECKE & BÖHM A.G.

Fabriken von Farben und Lacken · Berlin-Weißensee

Druck und Verlag von R. Oldenbourg, München 1, Schließfach 31. / Copyright 1932 by R. Oldenbourg, München und Berlin. — Printed in Germany.
Für den Anzeigenteil verantwortlich: Jakob Bauer, München. DA. I. Vj. 1938 3400 Stück. Pl. 5.