

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

5016-01/60

SCHRÖDER / GRAFE

MESSTECHNIK FÜR ELEKTROTECHNIKER

1

HERAUSGEBER
ZENTRALABTEILUNG FACHSCHULFERN-
UND ABENDSTUDIUM DES
MASCHINENBAUES DRESDEN

Herausgeber:
Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues Dresden

Meßtechnik für Elektrotechniker

Lehrbrief 1

5. überarbeitete Auflage

von

Dipl.-Ing. Walter Schröder

überarbeitet von

Ing. Hermann Grafe

1960

Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues, Dresden

Bestell - Nr. 5016 – 01/60

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

III/9/278

Ag 616/ 52 /60

Inhaltsverzeichnis

Seite

Vorwort	3
1 Allgemeines über Meßinstrumente	4
1.1 Hauptteile mechanischer Art	5
1.11 Die Lagerung	5
1.12 Die Spiralfedern	7
1.13 Dämpfung	8
1.14 Skalen, Ablesung, Gehäuse	11
1.15 Der Zeiger	17
1.2 Genauigkeit und Einflußgrößen	19
1.21 Anzeigefehler, Güteklassen, Empfindlichkeit	19
1.22 Drehmoment, Einstellsicherheit	24
1.23 Temperatur, Fremdfeld, Frequenz, Kurvenform	25
2 Die Meßwerke	
2.0 Drehspulmeßgerät	40
2.01 Aufbau und Wirkungsweise	40
2.02 Meßbereichserweiterung	49
Antworten und Lösungen	62
Quellenverzeichnis der Bilder	64
Tafel 1	65

Messen ist die Grundlage der Ingenieurtätigkeit sowohl für technische Forschung als auch für industrielle Fertigung. Der Satz "Messen heißt Wissen" gilt für den Forscher, dem die Natur durch experimentelle Messungen ungeklärte Fragen beantworten soll, und für den Betriebsmann, der durch Messungen den Fortschritt und die Güte der Fertigung prüft, Betriebsverluste ersparen kann und die Sicherheit der Anlage überwacht. Sie wissen selbst aus Ihrer Praxis die Bedeutung des Messens einzuschätzen, obwohl Sie die vielen Verfahren des Messens und Regelns nicht annähernd überblicken können. Das Gesamtgebiet der Meßtechnik ist so groß geworden, daß es keiner völlig beherrschen kann. Das gilt auch für das Teilgebiet der elektrischen Meßtechnik, das im Rahmen der Lehrbriefe behandelt wird. Diese können und sollen daher nur die Grundlagen geben, mit denen der Fachschulabsolvent in die Praxis gehen kann.

Wenn man messen will, muß man zunächst das "Meßwerkzeug" kennen und entscheiden können, welches für den vorgesehenen Zweck geeignet ist. Es werden daher in diesem Lehrbrief zunächst ein Teil der verschiedenen Meßwerke und ihre Eigenschaften beschrieben. Die Kenntnis der elektrischen Einheiten und Grundgesetze wird vorausgesetzt.

1 Allgemeines über Meßinstrumente

Ein Meßinstrument für elektrische Größen ist grundsätzlich eine Waage. Sie kennen doch die Federwaage, die häufig im Haushalt verwendet wird: Legen Sie die Ware auf die Schale, so dreht sich der Zeiger so lange über der geeichten Skala, bis die gespannte Feder dem Warengewicht das Gleichgewicht hält.

Beim elektrischen Gerät wird durch die Meßgröße (z.B. den Strom) eine verhältnismäßige Kraft erzeugt, die auf das bewegliche Organ des Meßwerks so lange ablenkend, in der Regel drehend, wirkt, bis eine mit der Bewegung zunehmende Gegenkraft (meistens die einer Spiralfeder) gleich groß wird. Die der elektrischen Meßgröße entsprechende Kraft wird also mit der Federkraft gemessen wie bei der Waage, und der stillstehende Zeiger gibt auf der Skala statt der Kraft den durch Eichung gewonnenen Wert der Meßgröße an. Daß der abgelesene Wert niemals ganz genau sein kann, ist hiernach einleuchtend und wichtig zu wissen. So wie die Genauigkeit einer Gewichts- oder Federwaage von der mehr oder minder sorgfältigen Ausführung abhängt und dem Verwendungszweck angepaßt ist, von der Dezimalwaage bis zur feinsten Chemikerwaage, so sind auch das System und die Ausführung des elektrischen Meßwerks maßgebend für die Größe der Anzeigefehler. Diese Einflüsse werden noch besprochen. Sie werden für Kontrollmessungen im Betrieb mit dem billigeren und robusten Betriebsinstrument auskommen, hingegen müssen Sie bei Abnahmemessungen und Wirkungsgradbestimmungen größtmögliche Genauigkeit mit Präzisionsinstrumenten anstreben.

1.1 Hauptteile mechanischer Art

1.11 Die Lagerung. =====

Die Lagerung des beweglichen Organs¹ muß sich dem Verwendungszweck des Meßgeräts anpassen. Die Reibung, welche die Genauigkeit der Anzeige beeinträchtigt, soll möglichst gering sein. Je geringer aber diese werden soll, um so empfindlicher wird die Lagerung gegen mechanische Beanspruchung. Die Spitzenlagerung (Bild 1 a) wird am meisten verwendet. Die Achse erhält beiderseits gehärtete und hochglanzpolierte Stahlkegel (Spitzenwinkel etwa 60°) mit abgerundeten Spitzen. Je schärfer die Spitze ist, um so geringer ist die Reibung (siehe Verhältnisse bei Stützzapfenreibung), aber um so leichter kann die Spitze bei Stößen gestaucht werden,

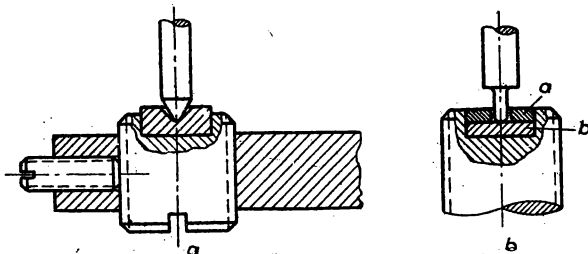


Bild 1 a) Spitzenlagerung

b) Zapfenlagerung

wodurch der Anzeigefehler größer wird. Die kleinsten Abrundungsradien von etwa 0,005 mm werden daher nur für höchstempfindliche Präzisionsmeßgeräte mit geringem Gewicht des drehbaren Teils verwendet. Ein solches Gerät muß sehr schonend behandelt werden. Bei tragbaren Montage- und bei Schalttafelgeräten muß man wegen der unvermeidbaren Erschütterungen die Spitze stumpfer machen, was jedoch auf Kosten der Genauigkeit geschieht. Gelegentlich wird besonders wegen starker Stöße (in Fahrzeugen) der Lagerzapfen verwendet (Bild 1b). Die Spitze läuft auf einem natürlichen oder synthetischen

¹ Begriffserklärungen des VDE: "Das Meßinstrument umfaßt das Meßwerk mit Gehäuse und mit eingebautem, angebautem, lösbar oder unlösbar verbundenem Zubehör. Ein Meßgerät kann auch mehrere Meßwerke enthalten. Das Meßwerk besteht aus den eine Bewegung erzeugenden, zueinander gehörenden Teilen des Meßgeräts. Das bewegliche Organ ist der Teil des Meßwerks, dessen Bewegung oder Lage von der Meßgröße abhängt."

Saphir bzw. Rubin, bei billigen Ausführungen auf einem Achat oder auf Bronze. Der Stein ist zur Einstellung des Spitzenspiels in eine feingängige Metallschraube gefaßt. Die eingeschliffene und polierte Pfanne ist am Grunde mit einem etwas größeren Radius abgerundet, damit die Spitze mit kleiner Reibungsfläche aufliegt. Beim Lagerzapfen unterscheidet man den Lochstein (a) und den Deckstein (b).

Die Lagerreibung ist natürlich auch von der Gebrauchslage der Meßinstrumente abhängig. Deshalb werden die Instrumente in einer bestimmten Gebrauchslage geeicht und diese auf der Skala mit angegeben (siehe Tafel 1 Nr. 28 .. 30). Über die Einstellsicherheit spitzengelagerter Instrumente bei Abweichungen von der Gebrauchslage erfahren Sie im Abschnitt 1.22 noch Näheres.

Auch bei der feinsten Spitzenlagerung bleibt natürlich eine geringe Reibung zwischen Spitzen und Steinen. Bei hochwertigen Meßgeräten kam man daher zu Konstruktionen, die diese Fehlerquelle ausschließen. Die Fadenaufhängung wird bei den empfindlichsten Geräten, den später zu beschreibenden Galvanometern, angewendet. Das hier besonders leicht gehaltene bewegliche Organ hängt an einem dünnen Faden (oder Band) aus Metall, z.B. Phosphorbronze, manchmal auch aus Quarz, der gleichzeitig durch Torsion die Gegenkraft liefert, so daß Spiralfedern entfallen. Diese Richtkraft ist bei dem dünnen Faden oder Band von etwa $8\mu\text{m}$ mal $80\mu\text{m}$ Querschnitt sehr klein, so daß Ströme von 10^{-12} A nachweisbar werden; aber naturgemäß ist auch die Empfindlichkeit gegen Stöße und Erschütterungen groß. Außerdem muß das frei hängende System mit Hilfe einer einge-

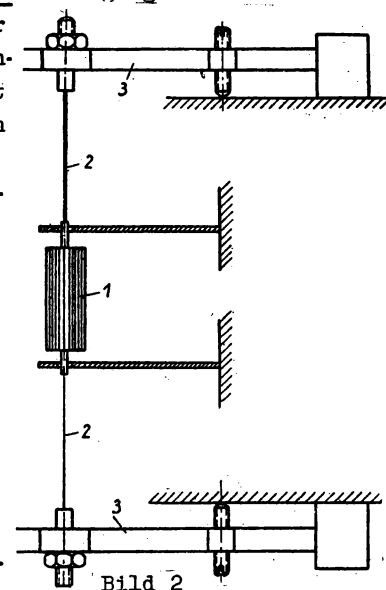


Bild 2
Schema d. Spannbandaufhängung

bauten Wasserwaage (Libelle) vor der Messung auf richtige Lage justiert werden.

Mechanisch, aber auch elektrisch unempfindlicher ist die Spannbandaufhängung (Bild 2). Die Spule (1) ist drehbar durch die Torsion der Bronzebänder (2), die durch einstellbare Parallelfedersätze (3) gespannt werden. Die Verdrehung der Bänder ergibt die Gegenkraft. Auch bei geringen Abweichungen von der Senkrechten wird die Spule ohne zu streifen gehalten. Daher ist zur Aufstellung des Meßgeräts keine Libelle nötig.

1.12 Die Spiralfedern.

=====

Bei Spitzenlagerung sind die Spiralfedern ein wichtiger Bauteil. Sie erzeugen das zur Anzeige notwendige Gegendrehmoment. Von ihrer Konstanz hängt die Genauigkeit der Anzeige ab. Die besten elastischen Eigenschaften hat Stahl, der aber wegen seiner Magnetisierbarkeit hierfür nicht zu gebrauchen ist. Seine unmagnetischen Legierungen lassen sich schlecht löten oder schweißen, so daß sie für Federn, die auch in der Regel der Stromzuführung dienen, ebenfalls ausfallen. Es werden meistens unmagnetische Kupferlegierungen, insbesondere Phosphorbronze, von der Drahtform zu Bändchen ausgewalzt und zu Spiralfedern gewickelt. Leider ist die Richtkraft der Feder nicht konstant, sie sinkt mit steigender Temperatur. Da die Meßinstrumente bei einer Temperatur von 20 Grad Celsius geeicht werden, rufen die Federn bei jeder davon abweichenden Temperatur eine Vergrößerung der Fehlangebe (= Anzeige-fehler) hervor. Die Gerätehersteller müssen deshalb darauf achten, daß die Federn nicht durch im Gerät eingebaute Widerstände unzulässig erwärmt werden.

Ein weiterer Einfluß der Temperatur ist das Aufrollen der Feder. Allerdings ist dies nicht einheitlich. Manche Federn bleiben stehen, andere rollen auch zu, vermutlich infolge ungleichmäßiger Metallstruktur. Um diesen Einfluß möglichst

auszugleichen, nimmt man zwei gleichartige Federn mit gegenläufigem Wickelsinn (siehe Bild 21 des Drehspulmeßwerks in 2.01). Das Bild zeigt auch den Rücker für die Nullpunkteinstellung. Das Ende der einen Feder kann mit dem Winkelhebel durch Verdrehung des Bolzens mit exzentrisch angesetztem Stift etwas nach links oder rechts bewegt werden. Dieser Bolzen ist in der Vorderwand oder in der Glasscheibe gelagert, kann also von außen mit einem Schraubenzieher gedreht werden. Die elastische Nachwirkung zeigt sich dadurch, daß der Zeiger schleichend in die Nullstellung zurückkehrt, diese evtl. gar nicht erreicht, weil die Feder zu stark beansprucht wird. Man hüte sich, die Federform am fertigen Gerät durch Biegen oder Auseinanderziehen zu verändern.

1.13 Dämpfung.

=====

Die Masse des beweglichen Organs stellt zusammen mit der Federung ein schwingungsfähiges System dar, das bei einem Anstoß Drehschwingungen ausführt. Zu Beginn einer Messung wirkt sich das so aus, daß der Zeiger zuerst über den eigentlichen Meßwert hinausschwingt und dann mit abnehmender Amplitude (= Schwingungsweite) um ihn hin und herpendelt, bis er schließlich zur Ruhe kommt. Die Kurve 1 im Bild 3 veranschaulicht in einem Diagramm das Verhalten des Zeigers in einem solchen Fall. Deshalb sind fast alle Meßwerke mit einer fest eingebauten Dämpfung versehen. Nach dem Grad der Dämpfung unterscheidet man:

1. Periodische Dämpfung: Hier läßt man noch einige wenige Pendelbewegungen des Zeigers zu, entsprechend der Kurve 2 des Bildes 3.
2. Aperiodische Dämpfung: Hierbei ist das System gerade so gedämpft, daß keine Überschwingung mehr auftritt, aber der Zeiger auch noch nicht "kriecht". (vgl. Kurve 3, Bild 3).
3. Überaperiodische Dämpfung: In diesem Fall ist die Dämpfung so groß, daß der Zeiger langsam zum Meßwert "hin-

kriecht" und immer langsamer wird, je mehr er sich dem Meßwert nähert . (Kurve 4, Bild 3).

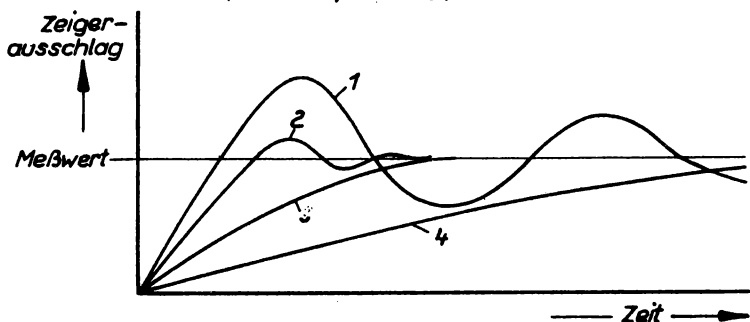


Bild 3 Zeigerbewegung bei verschiedenen Dämpfungsgraden

Die Dämpfung verhindert nicht nur ein Überschwingen des Zeigers, sie fängt auch den Einschaltstromstoß ab, der zum Verbiegen des Zeigers führen könnte.

Die Ausführung der Dämpfung ist aus den einzelnen Bildern der Meßwerke erkennbar. Es wird bei deren Beschreibung später darauf hingewiesen. Grundsätzlich hat man folgende Möglichkeiten:

1.131 Magnetische Dämpfung.

Durch die Bewegung im Magnetfeld entstehen in einer kurzgeschlossenen Windung (dem Metallrahmen, auf den die Spule gewickelt ist) oder in einem besonderen Metallzylinder oder in einer Metallscheibe (wie beim Zähler) proportional der Geschwindigkeit bremsende Ströme. Es ist die Generatorwirkung, die Sie bei der elektrischen Bremsung der Straßenbahn merken. Deren Motoren werden vom Netz abgeschaltet und arbeiten als Generator auf Widerstände, die stufenweise verkleinert werden. Je kleiner der Widerstand ist, um so stärker wird die Bremsung. So wirkt auch die Dämpfung bei Drehspul-Galvanometern, die keinen Spulenrahmen haben. Man kann die Spulenwindungen auch über einen äußeren Widerstand schließen und je nach seinem Widerstandswert verschiedene Dämpfungen erhalten.

1.132 Luftdämpfung

Ein leichter Kolben aus Aluminium bewegt sich in einem Zylinder (Kolbendämpfung) oder ein Flügel in einer Dämpferkammer aus Aluminium oder Kunststoff (Flügeldämpfung) mit Luftspalt zwischen dem beweglichen und dem festen Teil.

1.133 Flüssigkeitsdämpfung

Bei Meßwerken mit großen Richtkräften, z.B. bei schreibenden Geräten, muß man gegebenenfalls Öl oder Glyzerin statt Luft als Dämpfungsmittel nehmen, weil sonst die Bauteile für Kolben- oder Flügeldämpfung zu groß werden. Nachteilig sind die erforderlichen Dichtungen und die Abhängigkeit der Flüssigkeitszähigkeit von der Temperatur.

Wenn man die Dämpfung so bemißt, daß der Zeiger ohne Schwingung auf den Meßwert kommt, nennt man diese Einstellung aperiodisch (d.h. ohne Schwingung). Dämpft man noch stärker, d.h. überaperiodisch, so "kriecht" der Zeiger auf den Meßwert. Für technische Meßgeräte ist schon der aperiodische Ausschlag des Zeigers zu stark gebremst; es ist günstiger für die Schnelligkeit der Anzeige, wenn man 1 bis 3 Überschwingungen zuläßt. Die sogenannte Beruhigungszeit beträgt bei Schalttafelgeräten etwa eine Sekunde.

Die VDE-Regeln für Meßgeräte besagen (VDE 0410):

- a) Die 1.Überschwingung, die der auf Null oder am Skalenanfang stehende Zeiger beim Einschalten einer $\frac{2}{3}$ des Meßbereichs entsprechenden Meßgröße ausführt, darf 20% seiner endgültigen Einstellung (bezogen auf Skalenteile) nicht überschreiten.
- b) Die Beruhigungszeit, d.h. die Zeit, die der Zeiger beim Einschalten der Meßgrößen gemäß a) braucht, bis er sich bei seiner Schwingung von seiner endgültigen Einstellung nicht weiter als 1,5% dieses Wertes in Skalenteilen entfernt, darf 4 s nicht überschreiten.
- c) Die Bestimmungen a) und b) gelten nicht für Meßgeräte, deren Skalen- oder Zeigerlänge größer als 150 mm ist.

Sie gelten ferner nicht für thermische und Vibrationsmeßgeräte, ebenso nicht für Meßgeräte mit Bandaufhängung."

1.14 Skalen, Ablesung, Gehäuse.

=====

Die Skala ist auf einem Blech aus Eisen, Aluminium oder auf Hartpappe bzw. weißem Papier angebracht, manchmal auch auf Milchglas für Durchleuchtung von hinten, mit schwarzen Teilstrichen und Ziffern gezeichnet. Gelegentlich wird ein wichtiger Meßwert durch einen roten Strich gekennzeichnet. Für Fahrzeuge benutzt man meistens einen schwarzen Untergrund und hat dann die Teilung nebst Zeiger mit Leuchtfarbe versehen, damit der Fahrer bei Nacht nicht durch eine beleuchtete Skala gestört wird.

Manchmal muß der Nullpunkt in der Mitte liegen, z.B. bei einem Strommesser für das Laden und Entladen einer Batterie. Sie müssen dies dann bei einer Bestellung ausdrücklich angeben.

Man wählt die Skala so, daß der höchste betriebsmäßig vorkommende Meßwert nur wenig vor dem Endwert liegt. So nimmt man z.B. bei 220 V Betriebsspannung den listenmäßigen Meßbereich von 0 ... 250 V, womit gelegentliche Überspannungen noch erfaßt werden. Man soll möglichst im letzten Drittel der Skala messen, weil dort der Anzeigefehler am kleinsten ist, wie später noch erläutert wird.

Wenn auf der Skala nur ein bestimmter Bereich interessiert - nehmen wir bei obigem Beispiel etwa 100 ... 250 V an, weil Spannungen darunter nicht gemessen werden -, so kann man das Gerät mit unterdrücktem Nullpunkt ausführen. Die Skala beginnt nicht mit Null, sondern mit 100 V. Dadurch kann die ganze Skalenlänge für den kleineren Bereich von 100 ... 250 V eingeteilt werden, so daß man genauer ablesen kann. Dadurch wird aber nicht etwa der durch die Konstruktion begründete Anzeigefehler kleiner.

Die Teilstriche können auch am Anfang oder am Ende zusammenge-
drängt sein, entsprechend der geringeren Wichtigkeit die-
ser Gebiete. So erhalten z.B. sogenannte überstromsichere
Strommesser für Drehstrommotoren eine Skala, die am Ende
stark zusammengedrängt ist für die Anlaß-Stromspitzen, wäh-
rend der normale Betriebsstrom auf der weiten Teilung liegt.

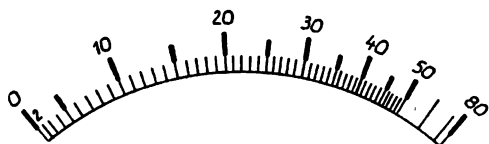


Bild 4. Skala eines überstrom-
sicheren Strommessers

(Bild 4). Eine gleichmäßi-
ge Teilung möglichst über
die ganze Skala ist aber
vorteilhaft für die Ablese-
genauigkeit, weil man Wer-
te zwischen den Teilstri-
chen leichter ermitteln

und den Zeigerausschlag aus großer Entfernung besser ab-
schätzen kann. Nicht immer deckt sich der Anzeigebereich
eines Meßinstrumentes mit dem eigentlichen Meßbereich. Der
Anzeigebereich umfaßt die ganze Länge der Skalenteilung, der
Meßbereich hingegen nur den Teil der Skala, für den die Ge-
nauigkeitsangaben entsprechend der auf der Skala aufgedruck-
ten Güteklasse (vgl. 1.21) gelten. Anfang und Ende des Meß-
bereiches sind durch Punkte oder Striche auf der Skala ge-
kennzeichnet. Nach DIN 43701 sind die Meßbereichendwerte ge-
normt, um eine Einheitlichkeit und Typenvereinfachung zu er-
zielen.

Die für einen gewünschten Skalenverlauf zu treffenden Maß-
nahmen werden bei den Meßwerken erwähnt.

Infolge der drehenden Bewegung des Zeigers ist die Skala ein
Kreisbogen von meistens 90° , aber auch von $270 \dots 300^\circ$. Soll
die Skala geradegestreckt sein, wie Bild 11 zeigt, so muß
der Zeiger eine Geradführung erhalten wie bei schreibenden
Meßgeräten.

Zur genauen Ablesung muß das Zeigerende über den Teilstri-
chen dünn sein. Bei Präzisionsgeräten läuft dieses Zeigeren-
de über einem Spiegelbogen in der Skala (Bild 13). Ist der
Blick genau senkrecht auf den Zeiger gerichtet, dann deckt
dieser sein Spiegelbild und zeigt auf den richtigen Meßwert.

Blickt man seitlich, so sieht man den Zeiger im Spiegel und macht einen Ablesefehler durch Parallaxe (griech.: Abweichung). Darunter versteht man den Winkel zwischen den von zwei Standorten aus auf einen Punkt gerichteten Geraden.

Die Skalenaufschrift soll nach VDE 0410 das Gerät eindeutig kennzeichnen. Es ist die "Personalbeschreibung" mit Symbolen der Tafel 1 (s.S. 65).

Will man auf große Entfernung eine Meßgröße erkennen, dann kommen Großskalen wie bei einer Turmuhr mit einem entsprechend großen Zeiger in Frage. Dieser wird dann meistens von einem kleinen Hilfsmotor bewegt, der von dem eigentlichen Meßwerk gesteuert wird. So baut man auch Geräte mit geraden Skalen bis zu 5 m Länge zur übersichtlichen Betriebskontrolle z.B. in Kesselhäusern oder großen Schaltwarten. Bei dem im Bild 5 als Beispiel dargestellten Lichtbandgroßgerät geschieht die Anzeige je Meßwerk durch ein Band, das oben und unten über Rollen geführt und durch den gesteuerten Hilfsmotor bewegt wird. Das Band ist aus einem schwarzen und einem lichtdurchlässigen Teil zusammengesetzt; es wird ebenso wie die durchscheinende Skala von hinten beleuchtet. Die Ziffern sind ebenfalls durchbrochen und leuchten demzufolge auch. Bei Skala I wird eine Leistung von 95 MW, bei Skala II eine Leistung von 15 MW angezeigt.

Die Gehäuse aller Meßgeräte sind dem Verwendungszweck angepaßt. Man unterscheidet grundsätzlich Schalttafelgeräte und tragbare Geräte. Erstgenannte haben Gehäuse aus Stahlblech oder Isolierstoff, deren Abmessungen nach DIN 43 700 genormt sind.

Runde Gehäuse für Einbau (Bild 6) ergeben ruhige Linien und übersichtliche Anordnung. Der Frontring sitzt auf der Vorderseite der Tafel, während der Tubus mit dem eingebauten

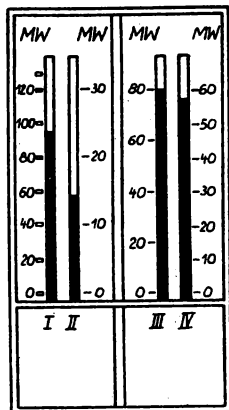


Bild 5
Lichtbandgroßgerät

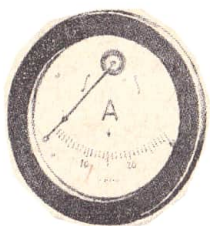


Bild 6
Rundes Gerät für
Schalttafeleinbau

Meßwerk durch eine Bohrung der Schalttafel geht. Die Anschlußklemmen sind immer rückseitig.

Ebenso für den Einbau bestimmt ist die quadratische Form (Bild 7) und die rechteckige Form. Bild 8 zeigt ein Rundprofilgerät mit der aus der Vorderfläche herausragenden, kreisbogenförmigen Skala und Glasscheibe, Bild 9 ein Flach- oder Tiefprofilgerät mit ebener Glasscheibe und gebogener Skala; Bild 10 desgleichen, jedoch mit ebener Skala, die zwar eine Geradföhrung für den Zeiger erfordert, aber eine bessere Ablesung ermöglicht. Man gibt heute in steigendem Maße den quadratischen und rechteckigen Einbaugeräten den Vorzug, da sie gegenüber der runden Ausführung eine bessere Platzausnutzung auf der Schalttafel ermöglichen. Bei eckigen Gehäuseformen bringt man eine größere Skalenlänge unter (vgl. Bild 11). Die genormten Gehäusegrößen für quadratische Meßgeräte



Bild 7 Meßgerät in quadratischer Form für Schalttafeleinbau



Bild 8
Rundprofilgerät



Bild 9
Flach- oder
Tiefprofilgerät

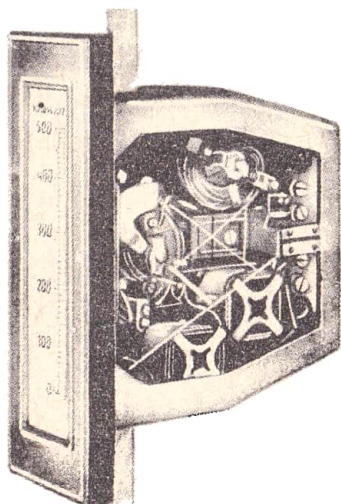


Bild 10 Flach- oder Tiefprofilgerät mit ebener Skala

sind so gewählt, daß man unter, über oder neben einem größeren Gerät zwei oder drei kleinere anbringen kann, ohne die Kantenlänge des größeren zu überschreiten. Das ist dann von Vorteil, wenn man mehrere Instrumente gleichzeitig beobachten muß. Außerdem geben solche Einbaugeräte der Schalttafel ein architektonisch schönes Aussehen. Der Preisunterschied von Geräten mit runden und eckigen Gehäusen ist nur gering, dagegen lassen sich die Schalttafeln technologisch und wirtschaftlich günstiger mit eckigen als mit runden Geräten ausrüsten. Eine Gegenüberstellung der Geräteabmessungen zeigt Bild 11.

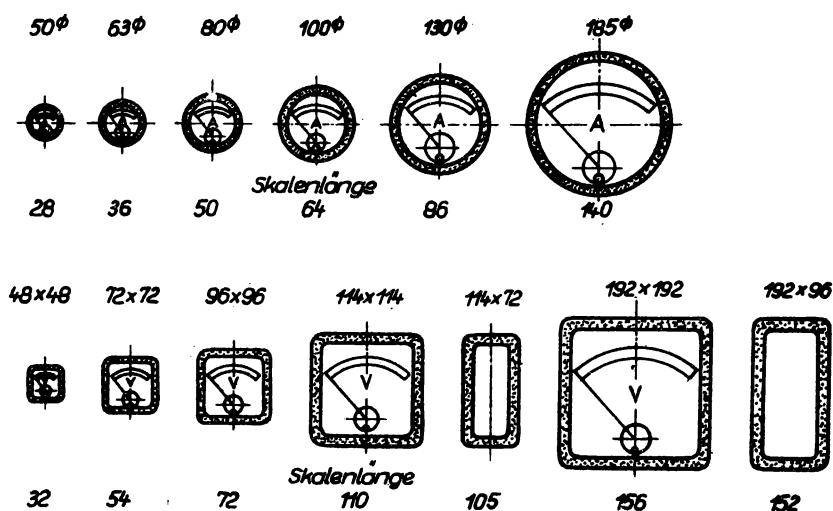


Bild 11 Abmessungen von Einbaugeräten

Bei Bestellung eines Geräts müssen Sie die Gebrauchslage angeben, weil es in dieser Lage geeicht wird (vgl. Tafel 1, S. Nr. 27 bis 30).

Schreibende Meßgeräte werden in rechteckigen Gehäusen (Bild 12) untergebracht. Durch die vordere Tür ist das Innere zugänglich. Sie werden für Schalttafel-aufbau oder -einbau geliefert.

Besondere Ausführungen der Gehäuse werden nötig nach VDE 0410

§ 7 hinsichtlich des Schutzes gegen äußere Einflüsse. Das Eindringen von feinstem Staub, von ätzenden Gasen und Dämpfen, von Tropf-, Spritz- und Schwallwasser ist gegebenenfalls zu verhindern. So gibt es z.B. eine flut- und druckwassersichere Kapselung zur Verwendung auf Wasserfahrzeugen oder eine schlagwettergeschützte sowie explosions sichere Ausführung für Räume mit explosiven Gasen.

Gehäuse für tragbare Geräte sind zur Aufstellung auf eine waagerechte Fläche vorgesehen. Das Meßwerk ist dementsprechend geeicht. Die Gehäuse werden heute vorwiegend dann aus Isolierstoff gepreßt, wenn durch die hohe Stückzahl die Preßformen lohnend werden (Bild 13). Metallteile für Klemmen und zur Befestigung werden mit eingepreßt. Holz- oder Metallgehäuse sind allerdings mechanisch widerstandsfähiger. Sie werden heute noch bei geringen Stückzahlen hochwertiger Spezialgeräte verwendet.

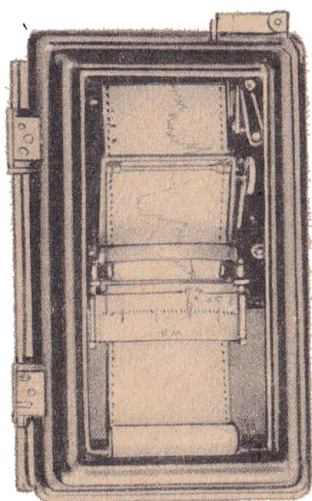


Bild 12 Schreibendes Meßgerät

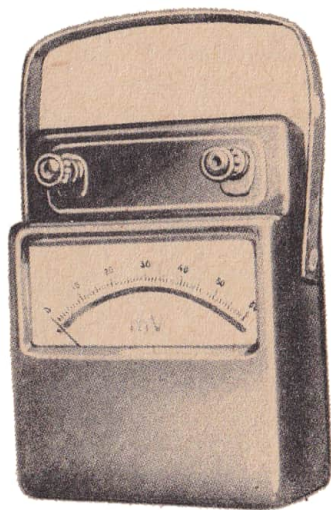


Bild 13 Tragbares Meßgerät mit Preßstoffgehäuse

1.15 Der Zeiger. =====

Er muß möglichst leicht sein, um die Lagerung nicht unnötig zu belasten, aber auch stabil genug, um keine Formänderung beim normalen Gebrauch zu erleiden. Mit Gegengewichten, zwei kleinen Drahttringen (bei größeren Meßwerken Muttern) auf zwei Schraubenbolzen am Zeiger (siehe Bild 21), wird der Schwerpunkt des beweglichen Organs in die Drehachse gebracht. Der drehbare Teil ist damit lageunabhängig. Der Ausschlag des Zeigers ist nach beiden Seiten durch federnde Anschläge begrenzt.

Wichtig für die Ablesung ist die Zeigerform. Der Messerzeiger über einer spiegelunterlegten Skala, wie ihn Bild 14 und Bild 13 zeigt, ermöglicht genaueste Ablesung und wird daher bei Feinmeßgeräten verwendet. Das Zeigerende ist messerförmig und hat die Dicke eines Teilstrichs. Der Lanzenzeiger (Bild 15) hat eine feine Spitze für Nahablesung. Die breite Lanze kann aus einiger Entfernung noch erkannt und somit der Meßwert geschätzt werden. Dies ist der übliche Zeiger für runde oder quadratische Schalttafelgeräte, wie es auch die Bilder 6, 7 und 8 angeben. Ähnliches gilt für den Balkenzeiger (Bild 16). Er wird vorzugsweise bei Profilgeräten benutzt (vgl. Bild 9 und Bild 10).

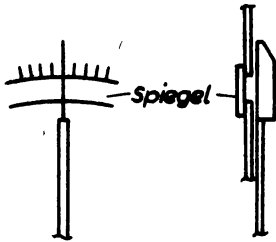


Bild 14 Messerzeiger mit spiegelunterlegter Skala



Bild 15 Lanzenzeiger

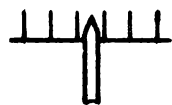


Bild 16 Balkenzeiger

Sie könnten fragen, warum die Skala nicht immer mit Spiegel zur Vermeidung der Parallaxe versehen wird. Weil die genaueste Ablesung wertlos wird, wenn das Meßgerät nicht genau

genug ist. Sie können eine Länge durch Anlegen eines Zollstockes noch so genau ablesen, das Ergebnis wird nicht einmal auf Zehntelmillimeter genau sein. Auch ein Schalttafelgerät ist im Vergleich zu einem hochwertigen und entsprechend teuren Präzisionsinstrument ein grober Zollstock.

Da der Zeiger so leicht wie möglich sein soll, lag es nahe, einen Lichtstrahl als Zeiger zu nehmen. Er wurde zuerst angewendet bei den empfindlichen Spiegelgalvanometern für Laborgebrauch, jetzt auch bei tragbaren Geräten und Schalttafelgeräten, wenn sich der Aufwand lohnt. Die Achse trägt dann ein ganz leichtes Spiegelchen, das den Lichtstrahl reflektiert, wie später noch beschrieben wird. Es gibt auch Geräte mit Riesenskalen und Lichtzeiger, die dann ohne Hilfsmotor auskommen, allerdings wegen des langen Lichtstrahls eine ziemlich große Bautiefe erfordern.

Zusammenfassung

=====

Die Lagerung des beweglichen Organs muß sich dem Verwendungszweck des Meßgeräts anpassen. Bei Präzisionsinstrumenten wird Faden- oder Spannbandaufhängung verwendet, bei Geräten für robusten Betrieb dagegen die Spitzen- oder Zapfenlagerung. Für die Erzeugung der Gegenmomente verwendet man Spiralfedern, vorwiegend aus Phosphorbronze. Gleichzeitig können sie als Stromzuführung bei verschiedenen Instrumenten dienen.

Als Dämpfung lernten Sie die magnetische Dämpfung, die Luft- und die Flüssigkeitsdämpfung kennen. Durch die Dämpfung wird eine kürzere Einstellzeit erzielt.

Die Skala eines Instrumentes richtet sich nach der Charakteristik des Meßwerks. Die Skalenaufschrift soll nach VDE 0410 das Gerät eindeutig kennzeichnen.

Sie lernten weiter die Aufbau- sowie Einbaugeräte und Profilgeräte kennen. Eine Sonderstellung nehmen die schreibenden Geräte ein.

Übungen =====

1. Warum kann man ein elektrisches Meßgerät mit einer Waage vergleichen ?
2. Was ist der Unterschied zwischen den Begriffen "Meßinstrument" und "Meßwerk" nach VDE ?
3. Welche Bauarten für die Lagerung des beweglichen Organs kennen Sie ?
4. Wodurch erzielt man bei den verschiedenen Lagerungsarten die Richtkraft sowie die Rückführung des Zeigers ?
5. Warum muß das Meßinstrument eine Dämpfung haben ?
6. Was bedeutet der Ausdruck "aperiodische Dämpfung" ?
7. Was versteht man unter dem Begriff "unterdrückter Nullpunkt" ?
8. Was können Sie aus der Skalenaufschrift erkennen ?
9. Nennen Sie die üblichen Gehäuse- und Zeigerformen für Schalttafelgeräte !

1.2 Genauigkeit und Einflußgrößen

1.21 Anzeigefehler, Güteklassen, Empfindlichkeit =====

Sie haben aus dem vorigen Kapitel erkannt, daß jede Messung mit einem mehr oder weniger großen Fehler behaftet ist. Denken Sie an das Beispiel mit dem Zollstock, dessen Länge zwischen dem Anfangsteilstrich und dem Endteilstrich sicherlich nicht genau übereinstimmt mit dem Urmeter aus Platin-Iridium in Paris. Verglichen mit dieser international festgelegten Meterlänge, kann der Zollstock länger oder kürzer sein, d.h. einen Plus- oder Minusfehler haben. So wird auch die Anzeige eines elektrischen Meßgeräts nach oben oder unten vom wahren

Wert abweichen. Die zulässige Abweichung (+ oder -) nennt man die Toleranz. Eine kleine Toleranz bedeutet also eine große Meßgenauigkeit. Sie ist eine durch den Aufwand bei der Fertigung bedingte Eigenschaft des Meßgeräts, auf die der Messende keinen Einfluß hat, es sei denn im Sinne der Verschlechterung durch schlechte Behandlung. Den tatsächlich auftretenden Unterschied zwischen angezeigtem und wahren Wert bei einer Messung nennt man "Fehlangebe". (Das muß nicht die höchstzulässige Abweichung sein.) Die Ablesegenauigkeit dagegen hängt zum Teil von Ihnen ab. Sie ist gegeben durch die im Punkt 1.1 erläuterten Ausführungen von Skala und Zeiger sowie durch Ihre Geschicklichkeit im Schätzen von Zwischenwerten. Zweckmäßig ist es, die Messung mehrmals zu wiederholen, wenn möglich auch durch verschiedene Beobachter. Die abgelesenen Werte werden dann voneinander abweichen und um einen Mittelwert "streuen". Wenn eine Änderung der Meßgröße selbst (z.B. durch steigende Temperatur) während der Zeit der Messungen ausgeschlossen ist und n Messungen mit den Werten $W_1, W_2, W_3 \dots W_n$ gemacht wurden, so erhalten Sie den wahrscheinlich richtigsten Wert W_m als arithmetisches Mittel:

$$W_m = \frac{W_1 + W_2 + \dots + W_n}{n} \quad (1)$$

Bei der Summierung werden sich die Fehler der einzelnen Meßwerte größtenteils aufheben, da sie wahrscheinlich in gleichem Maße positiv und negativ sind.¹ Der gefundene Mittelwert wird natürlich noch vom wahren Wert abweichen.

Woran erkennt man nun die Meßgenauigkeit eines Meßgeräts, also die höchstzulässigen Fehler ?

Nach VDE 0410 wird die Fehlertoleranz, der sogenannte Anzeigefehler, in Prozenten des Meßbereich-Endwerts auf der Skala angegeben als Klassenzeichen für sechs festgelegte Güteklassen (Tafel 1).

¹ Die ausführliche Begründung liefert die höhere Mathematik: "Ausgleichsrechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate."

Ein Gerät mit dem Klassenzeichen 0,2 darf demnach im ordnungsgemäßen Zustande einen Anzeigefehler von höchstens $\pm 0,2\%$ vom Meßbereich-Endwert haben. Nicht eingeschlossen sind zusätzliche Fehler, die durch Änderung der Temperatur, Frequenz, Kurvenform, Eichlage, des magnetischen Feldes und durch getrennte Meßwiderstände entstehen. Die Begrenzung dieser Fehler ist ebenfalls in den VDE-Regeln festgelegt (Tafel 1).

Lehrbeispiel 1

Ein Strommesser der Klasse 1,5 hat einen Meßbereich von 0 ... 30 A. Wie groß ist die höchstzulässige Fehlertoleranz in Ampere ?

Lösung :

Klasse 1,5 bedeutet, daß die Fehlergrenzen $\pm 1,5\%$ vom Meßbereich-Endwert (30 A) sind.

$\pm 1,5\%$ von 30 A sind $\pm 0,45$ A, die höchstzulässige Fehler-toleranz ist also $\pm 0,45$ A,
und zwar bei jedem Wert der Skala.

Steht der Zeiger auf 30 A, so liegt der wahre Wert zwischen 29,55 A und 30,45 A, vorausgesetzt, daß keine zusätzlichen Fehler durch obengenannte Einflußgrößen auftreten.

Bei 3 A Anzeige liegt der wahre Wert zwischen 2,55 A und 3,45 A. Sie sehen also, daß der auf den jeweiligen Meßwert bezogene Prozentwert des Fehlers nach unten hin immer größer wird. Bei 3 A ist der höchstzulässige Fehler $\pm 15\%$ von 3 A ! Aus diesem Grunde wählt man, wie schon erwähnt wurde, möglichst einen Meßbereich, bei dem man im oberen Drittel der Skala messen kann.

Liegt der Nullpunkt in der Mitte, so bezieht sich die Klassenangabe auf die Differenz beider Endwerte.

Lehrbeispiel 2

Der obige Strommesser Klasse 1,5 sei ein Gleichstromgerät mit dem Meßbereich - 30 ... 0 ... 30 A. Wie groß ist jetzt die Fehlertoleranz?

Lösung:

Die Fehlergrenzen sind $\pm 1,5\%$ von -30A bis +30A=60A, sie werden also doppelt so groß wie vorher, nämlich $\pm 0,9$ A.

Das ist einleuchtend, denn der Zeiger bestreicht bei derselben Skalenlänge den doppelten Meßbereich: von -30 A bis +30 A = 60 A. Die Teilung ist um die Hälfte enger geworden. Außerdem ergibt sich als zweite ungünstige Folge die verringerte Ablesegenauigkeit.

Verwechseln Sie nicht Meßgenauigkeit mit Empfindlichkeit! Die erste ist charakterisiert durch die Fehlertoleranz, während man unter Empfindlichkeit die Zeigerausschlagsänderung bezogen auf die Änderung der Meßgröße versteht, also Skalenteile (Skt.) je Ampere oder je Milliampere oder je Millivolt usw.

Wenn die Skala gleichmäßig geteilt ist, dann nimmt der Zeigerausschlag verhältnismäßig der Meßgröße zu, und somit ist die Empfindlichkeit überall gleich groß. Bei solchen Meßwerken, die keine gleichmäßig geteilte Skala besitzen, haben wir auch keine konstante Empfindlichkeit, sondern sie müßte bei jedem Teilstrich angegeben werden. Auch ist es hier zweckmäßig, die Fehlertoleranz als Ausschlagabweichung in mm anzugeben.

Lehrbeispiel 3

Ein Gleichstrom-Meßgerät hat eine gleichmäßig geteilte Skala mit 120 Teilstrichen und braucht 3 mA für den Vollausschlag. Wie groß ist seine Empfindlichkeit?

L ö s u n g :

3 mA entsprechen 120 Skalenteilen, demnach

$$1 \text{ mA} \hat{=} \frac{120 \text{ Skt.}}{3 \text{ mA}} = 40 \frac{\text{Skt.}}{\text{mA}}$$

Die Empfindlichkeit ist $40 \frac{\text{Skt.}}{\text{mA}}$
=====

Das ist die Stromempfindlichkeit des Meßwerks.

L e h r b e i s p i e l 4

Das obige Meßgerät hat 20 Ω Spulenwiderstand und soll als Spannungsmesser ohne Vorwiderstand verwendet werden. Bei welcher Spannung erfolgt Vollausschlag, und wie groß ist die Spannungsempfindlichkeit ?

L ö s u n g :

Sie wissen, daß das Gerät für Vollausschlag 3 mA braucht. Bei 20 Ω Spulenwiderstand ist die dazu nötige Spannung nach dem Ohmschen Gesetz

$$U = I \cdot R = 3 \text{ mA} \cdot 20 \Omega = 60 \text{ mV}$$

=====

Die Spannungsempfindlichkeit ist $\frac{120 \text{ Skt.}}{60 \text{ mV}} = 2 \frac{\text{Skt.}}{\text{mV}}$
=====

Es ist auch üblich, den Kehrwert des vorstehenden Bruches als sogenannte Konstante des Geräts anzugeben, also

Konstante = Einheiten der Meßgröße je Skt.

Beim letzten Lehrbeispiel ist sie 60 mV/120 Skt. = 0,5 mV je Skt.

Diese Konstanten werden bei Geräten angegeben, die eine Skala ohne Bezeichnung der Meßgröße haben, weil man damit sowohl Spannungen als auch Ströme mit verschiedenen Meßbereichen unter Verwendung von Zusatzwiderständen messen kann, wie noch erläutert wird. Man muß dann den Ausschlag in Skt. mit der

betreffenden Konstanten malnehmen.

1.22 Drehmoment, Einstellsicherheit.

=====

Eine kleine Fehlangabe ist bedingt durch eine gute Einstellsicherheit. Denken Sie wieder an die Federwaage ! Hätte man keine Reibung und keine Federfehler, so müßte sich der Zeiger immer auf den genauen Wert einstellen. Dann wäre auch beim Meßgerät die Einstellung sicher, nämlich auf den Skalenpunkt, bei dem das durch die Meßgröße erzeugte Drehmoment gleich ist dem Gegenmoment durch die Federn. Allerdings hätten Sie dann immer noch Fehler durch die erwähnten Einflüsse der Temperatur, der Feldänderung u.a.

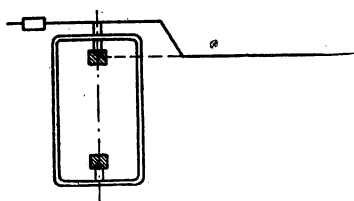


Bild 17 Innenspitzenlagerung

Die Lagerreibung macht sich dadurch bemerkbar, daß der Zeiger die vorgenannte ideale Gleichgewichtsstellung nicht erreicht, sondern mehr oder weniger entfernt davon stehenbleibt. Durch leichtes Klopfen an das Gehäuse kann man die ruhende Reibung beseitigen und den Ausschlag verbessern, was

allerdings bei guten Geräten nicht mit bloßem Auge sichtbar ist. Sie erkennen jedenfalls, daß der bremsende Einfluß der Reibung um so weniger ins Gewicht fällt, je größer das ablenkende Drehmoment im Verhältnis zum Reibungsmoment ist. Daher läßt sich bei schreibenden Geräten wegen der zusätzlichen Reibung durch die Schreibfeder die nötige Einstellsicherheit nur durch erhebliche Steigerung des Drehmoments erreichen. Das erklärt den wesentlich größeren Leistungsverbrauch dieser Geräte.

Der Kippfehler bei vertikaler Spitzenlagerung vermindert ebenfalls die Einstellsicherheit. Die obere Spitze muß wegen der Ausdehnungsmöglichkeit Spiel haben. Dadurch kann die Achse nach allen Seiten um einen kleinen Winkel kippen. Nach wel-

cher Seite dies geschieht, ist Zufall. Der Fehler kann also bei der Eichung nicht berücksichtigt werden. Er kann aber vermieden werden, wenn man das obere Lager dadurch tragend macht, daß die Achsspitze nach unten zeigt. Die untere Spitze ist nach oben gerichtet, d.h., beide Lager sind innerhalb der Spule (Innenspitzenlagerung, Bild 17). Der Zeiger ist dann in die Ebene des oberen Lagers abgebogen. Bei Geräten mit horizontaler oder schräger Achse tritt der Kippfehler nicht auf, weil beide Lager tragen, dafür ist aber die Reibung wesentlich größer. Die Federfehler mechanischer Art, welche die Einstellsicherheit beeinflussen, sind der Rolleffekt und die elastische Nachwirkung (1.12).

1.23 Temperatur, Fremdfeld, Frequenz, Kurvenform.

=====

Am Anfang dieses Kapitels wurde schon gesagt, daß der Anzeigefehler, der als Klassenzeichen auf der Skala angegeben ist (Tafel 1), nicht Fehler einschließt, die durch die in diesem Abschnitt geschilderten Einflußgrößen zusätzlich auftreten können. Die Angabe bezieht sich vielmehr auf 20° C Raumtemperatur, bei Wechselstrom mit praktisch sinusförmiger Kurve auf Nennfrequenz oder Nennfrequenzbereich (falls beide Angaben fehlen, auf den Bereich von 15 ... 60 Hz), bei Leistungsmessern auf Nennspannung und $\cos \varphi = 1$. Ausführliche Angaben machen die VDE-Regeln 0410. Die Einflußgrößen sollen hier nur kurz und allgemein behandelt werden. Interessenten, die tiefer eindringen wollen, sei das Buch von LANGBEIN und WERKMEISTER empfohlen.¹

Eine Temperaturänderung der Raumluft, aber auch die Heizung durch den Strom (Anwärmefehler) verändert den Ohmschen Widerstand der Wicklung, die Richtkraft der Federn bzw. der Aufhängebänder und die Feldstärke eines evtl. vorhandenen Magneten.

¹ LANGBEIN-WERKMEISTER. Elektrische Meßgeräte, Genauigkeit und Einflußgrößen. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig KG. Leipzig 1951.

Bei steigender Temperatur nimmt der Widerstand der Spulenwicklung bekanntlich zu (rund 0,4% /grd.). Da $I = \frac{U}{R}$, wird bei konstanter Spannung U dadurch der Spulenstrom und somit der Zeigerausschlag kleiner. Andererseits nimmt die Elastizität der Spiralfedern bei Erwärmung ab (-0,04 % /grd), so daß das Gegenmoment schwächer wird. Ein Dauermagnet wird durch Temperatursteigerung geschwächt (im Mittel -0,02% /grd), das bedeutet einen kleineren Ausschlag des Zeigers.

Bleibt durch diese Einflüsse ein restlicher Temperaturfehler, der beseitigt werden muß, dann werden meistens Kunstschaltungen vorgenommen, indem der Spule temperaturabhängige oder temperaturunabhängige Widerstände parallel geschaltet oder vorgeschaltet werden.

Bei einem Spannungsmesser ohne Magnet haben Sie eine Reihenschaltung Spule plus Widerstand. Der Widerstand bzw. Temperaturkoeffizient sei bei der Spule R_s bzw. α_s , beim Vorwiderstand R_v bzw. α_v . Der Gesamtwiderstand $R_g = R_s + R_v$ habe den Gesamt-Temperaturkoeffizienten α_g . Dann ist die Widerstandszunahme

$$\alpha_g \cdot R_g = \alpha_s \cdot R_s + \alpha_v \cdot R_v$$

daraus

$$\alpha_g = \frac{\alpha_s \cdot R_s + \alpha_v \cdot R_v}{R_g} \left[\frac{1}{\text{grd}} \right] \quad (2)$$

Wenn Sie nun den Vorwiderstand aus der Legierung Manganin:

Cu	82,12 %
Mn	15,02 %
Ni	2,29 %
Fe	0,57 %

herstellen, so können Sie für α_v praktisch Null einsetzen, für Kupfer α_s rund 0,004 $\frac{1}{\text{grd}}$. Dann wird

$$\alpha_g = \frac{0,004 \cdot R_s + 0 \cdot R_v}{R_g} = 0,004 \cdot \frac{R_s}{R_g}$$

In Prozent von R_g ausgedrückt, ist die Widerstandszunahme

$$\frac{\alpha_g \cdot R_g \cdot 100}{R_g} = 0,4 \cdot \frac{R_s}{R_g}$$

Wenn dieser Einfluß auf den Zeigerausschlag durch die Abnahme der Federkraft ausgeglichen werden soll, dann muß sein (Federkraft: - 0,04% / grd).

$$0,4 \cdot \frac{R_s}{R_g} + (-0,04) = 0 \text{ oder } \frac{R_s}{R_g} = \frac{0,04}{0,4} = \frac{1}{10}$$

Wenn z.B. der Spulenwiderstand $R_s = 1 \Omega$ ist, muß der Manganinwiderstand $R_v = 9 \Omega$ sein, da $R_g = R_v + R_s$ ist.

Bei neunfachem Vorwiderstand wird der Temperaturfehler voll kompensiert. Nach Obigem können Sie ableiten, wie groß R_v wird, wenn Sie statt Manganin einen Werkstoff mit negativem Temperaturkoeffizienten nehmen. Es gibt geeignete Legierungen aus Silber, Mangan und Zinn. Eine davon z.B. hat den Koeffizienten $\alpha = - 0,00012 \text{ 1/grd}$ und dabei eine geringe Thermospannung gegen Kupfer (- 0,02 mV/100 grd).

Sie können nämlich nicht einen beliebigen Widerstandswerkstoff im Meßgerätebau nehmen. Durch seine Verbindung mit den Kupferanschlüssen wird ein Thermoelement geschaffen, das bei ungleicher Erwärmung der Verbindungsstellen eine störende Thermo-Urspannung liefert (s. "Grundlagen der Elektrotechnik" Lbf.4). Das Konstantan (60% Cu, 40% Ni) mit 4,3mV/100 grd wird daher weniger verwendet. Außerdem verlangt man von Meßwiderständen, daß sich ihr Widerstandswert mit der Zeit durch Alterungserscheinungen möglichst wenig verändert.

Da die meisten Meßgeräte beim Messen einen Widerstand darstellen, durch den ein Strom fließt und an dem ein Spannungsabfall entsteht, bewirkt man Erweiterungen von Spannungsbereichen häufig mit vorgeschalteten Widerständen. Diese sind praktisch temperaturkonstant, und somit ergibt sich dabei ganz von selbst eine Temperaturfehlerkompensation. Wenn man die Magnetfeldschwächung durch Temperaturerhöhung mit geeigneten Magnetwerkstoffen und durch eine entsprechende Voralterungsbehandlung sehr klein hält, so gelten natürlich die

obigen Betrachtungen auch für Drehspulgeräte. Außerdem läßt sich die Schwächung des Dauermagneten mit einem magnetischen Nebenschluß kompensieren. Darüber erfahren Sie im nächsten Kapitel noch Näheres.

Ganz besonders beachten muß man den Temperatureinfluß auf die aus Cu-Draht gewickelte Meßwerkspule, wenn dem Meßwerk - z.B. bei Strommeßbereicherweiterungen - ein Widerstand parallel geschaltet wird. Da dieser naturgemäß um ein Vielfaches kleiner ist als der Spulenwiderstand, ergeben sich folgende Verhältnisse:

Ist z.B. ein Meßgerät mit einem 1 mA-Meßbereich auf 10 mA erweitert worden, so fließt durch den temperaturkonstanten Parallelwiderstand R_p ein Strom von 9 mA (siehe Bild 18), während durch den aus Cu-Draht gewickelten Spulenwiderstand R_{sp} nur 1 mA fließt. An beiden Widerständen herrscht der gleiche Spannungsabfall U . Erhöht sich nun durch Temperatureinfluß der Wert von R_{sp} (R_p bleibt dabei konstant), so ändert sich der Spannungsabfall U nur sehr wenig. Der Parallelwiderstand R_p mit seinem neunfach größeren Strom bestimmt zu neun Zehnteln die Konstanz der Spannung U . Man kann also sagen: U bleibt praktisch konstant. Sie bleibt um so konstanter, je größer I_p gegen I_{sp} ist, bzw. je größer die Meßbereicherweiterung ist. Das hat aber zur Folge, daß I_{sp} mit ansteigendem R_{sp} abnimmt und somit der Zeigerausschlag kleiner wird.

Diese Fehlangabe kann man verringern durch Vorschalten eines temperaturkonstanten Widerstandes unmittelbar vor die Spule, wie es das Bild 19 zeigt. Natürlich steigt dabei der Eigenverbrauch der ganzen Schaltung an.

Nachstehende Lehrbeispiele sollen Ihnen den Vorgang noch einmal verdeutlichen, wobei der Übersichtlichkeit halber angenommen werden soll, daß der für den Cu-Draht schon angegebene Temperaturkoeffizient $\alpha_s = 0,004 \frac{1}{\text{grd}}$ für das ganze Meßwerk gilt.

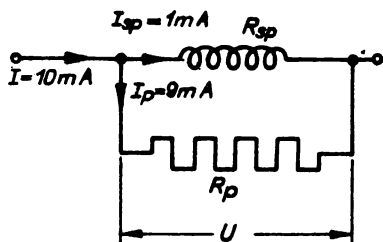


Bild 18 Spule mit Parallelwiderstand

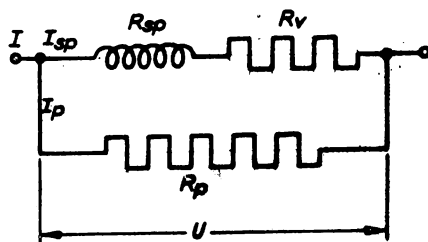


Bild 19 Temperaturfehler-kompensierte Schaltung

Lehrbeispiel 4

Eine Meßwerkspule (z.B. Drehspule) aus Cu-Draht hat bei 20°C einen Wert von $R_{sp} = 20 \text{ Ohm}$. Sie benötigt zum vollen Zeigerausschlag einen Strom von $I_{sp} = 1 \text{ mA}$. Wie groß ist der Temperaturfehler infolge Widerstandserhöhung der Meßwerkspule bei 30°C , wenn ihr zur Meßbereicherweiterung ein konstanter Nebenwiderstand parallel geschaltet ist, durch den 9 mA fließen und der die Spannung U praktisch konstant hält? (Vgl. Bild 18!) Die Skala ist in 100 Skalenteile geteilt.

Lösung:

$$U = I_{sp} \cdot R_{sp} = 1 \text{ mA} \cdot 20 \Omega = 0,02 \text{ V}$$

Bei 30°C und $\alpha_s = 0,004 \text{ 1/grd}$ gilt:

$$R_{sp}' = R_{sp} [1 + \alpha_s \cdot \Delta \vartheta] = 20 \Omega [1 + 0,004 (30-20)] = 20,8 \Omega$$

Liegt nun die volle Spannung von $0,02 \text{ V}$ an der Schaltung, so müßte der Zeiger auf Endausschlag stehen, also auf Skalenteil 100. Da aber nur $I_{sp}' = \frac{0,02 \text{ V}}{20,8 \Omega} = 0,9615 \text{ mA}$ durch die Spule fließen, steht der Zeiger etwas oberhalb Skalenteil 96 bei 96,15. Das ist aber eine Fehlangebe von $100 - 96,15 = 3,85\%$.

Lehrbeispiel 5

Wie groß wird der Temperaturfehler bei 30°C, wenn der Spule im vorigen Beispiel entspr. Bild 19 ein konstanter Vorwiderstand $R_v = 80 \Omega$ vorgeschaltet wird?

Lösung:

Bei 20°C gilt: $U = I_{sp} (R_{sp} + R_v) = 1 \text{ mA} (20 \Omega + 80 \Omega) = 0,1 \text{ V}$,

bei 30°C gilt: $R_{sp}' + R_v = 20,8 \Omega + 80 \Omega = 100,8 \Omega$

$$I_{sp}' = \frac{0,1 \text{ V}}{100,8 \Omega} = 0,992 \text{ mA}.$$

Das gibt aber eine Fehlangebe von nur $100 - 99,2 = 0,8\%$.

Wie schon erwähnt, erhöht sich dadurch der Eigenverbrauch der Schaltung. Auch der Nebenwiderstand muß in dieser Schaltung einen entsprechend größeren Wert haben als vorher.

Im Gegensatz zu der bisher beschriebenen Möglichkeit, den Temperaturfehler mittels Vorwiderstand zu kompensieren, hat man auch Schaltungen entwickelt, in denen der kompensierende Widerstand parallel zur Meßwerkspule liegt. Dabei muß dann dieser Widerstand einen positiven Temperaturkoeffizienten besitzen. Eine sehr bekannte Schaltung, die mit einer nur geringen Abweichung in einem bekannten Vielfachmeßgerät angewendet wird, ist die sogen. temperaturfreie Schaltung, die in Bild 20 abgebildet ist. Bei dieser Kunstschaltung erreicht man einen fast vollständigen Ausgleich des Temperatureinflusses.

Bei der Betrachtung der Wirkungsweise gehen wir wieder davon aus, daß die

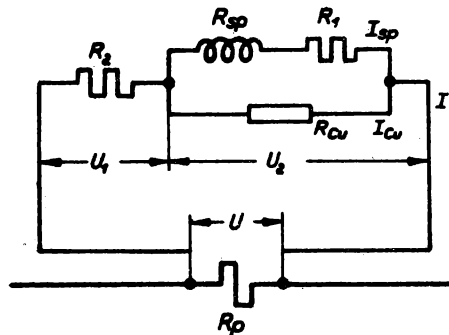


Bild 20 Temperaturfreie Schaltung

Spannung U durch den parallelen Widerstand R_p praktisch konstant gehalten wird. R_1 und R_2 sind temperaturkonstante Widerstände, dagegen sind R_{sp} und R_{cu} aus Kupferdraht gewickelt.

Bei einer Temperaturerhöhung werden die Widerstände R_{Sp} (= Meßwerkspule) und R_{Cu} größer. Das bedeutet aber, daß der Strom I kleiner wird, denn der Gesamtwiderstand von $(R_{Sp} + R_1) + R_{Cu}$ steigt an. Da I absinkt, verringert sich auch der Spannungsabfall U_1 am Widerstand R_2 , so daß die Spannung U_2 an der Stromverzweigung I_{Sp} , I_{Cu} wieder steigt. Dies wirkt wiederum auf das Absinken der Ströme I_{Sp} , I_{Cu} entgegengesetzt ein. Durch geeignete Dimensionierung der Widerstände, je nach Größe von R_{Sp} , erreicht man, daß I_{Sp} nahezu konstant bleibt.

In der nachstehend aufgeführten mathematischen Ableitung der Schaltung des Bildes 20 stellen R_{Sp} und R_{Cu} die Werte bei 20° C dar.

Für Raumtemperatur (20°C) gilt:

$$I_{Sp} = \frac{U_2}{R_{Sp} + R_1} \quad I_{Cu} = \frac{U_2}{R_{Cu}}$$

$$I = I_{Sp} + I_{Cu} = \frac{U_2}{R_{Sp} + R_1} + \frac{U_2}{R_{Cu}} = U_2 \frac{R_{Cu} + R_{Sp} + R_1}{R_{Cu} (R_{Sp} + R_1)}$$

$$\frac{I_{Sp}}{I} = \frac{U_2}{R_{Sp} + R_1} \cdot \frac{R_{Cu} (R_{Sp} + R_1)}{U_2 (R_{Cu} + R_{Sp} + R_1)} = \frac{R_{Cu}}{R_{Cu} + R_{Sp} + R_1}$$

$$I_{Sp} = I \frac{R_{Cu}}{R_{Cu} + R_{Sp} + R_1}$$

In die letzte Gleichung setzt man für I den Ausdruck, der sich nach dem Ohmschen Gesetz aus U und dem Gesamtwiderstand der Schaltung ergibt, ein:

$$I = \frac{U}{R_2 + \frac{R_{Cu} (R_{Sp} + R_1)}{R_{Cu} + R_{Sp} + R_1}} \quad \text{somit}$$

$$I_{Sp} = \frac{U}{R_2 + \frac{R_{Cu} (R_{Sp} + R_1)}{R_{Cu} + R_{Sp} + R_1}} \cdot \frac{R_{Cu}}{R_{Cu} + R_{Sp} + R_1}$$

$$I_{Sp} = \frac{U}{\frac{R_2}{R_{Cu}} (R_{Cu} + R_{Sp} + R_1) + (R_{Sp} + R_1)}$$

Bei einer Temperaturänderung soll der gleiche Strom fließen (veränderlich sind R_{Sp} und R_{Cu}) :

$$I_{Sp} = \frac{U}{\frac{R_2}{R_{Cu}(1+\alpha \Delta \vartheta)} [R_{Cu}(1+\alpha \Delta \vartheta) + R_{Sp}(1+\alpha \Delta \vartheta) + R_1] + R_{Sp}(1+\alpha \Delta \vartheta) + R_1}$$

Da der Strom I_{Sp} bei 20°C gleich dem nach einer Temperaturänderung sein soll, müssen die Nenner der letzten beiden Gleichungen einander gleich sein:

$$\frac{R_2}{R_{Cu}} (R_{Cu} + R_{Sp} + R_1) + (R_{Sp} + R_1) = \frac{R_2}{R_{Cu}(1+\alpha \Delta \vartheta)} [R_{Cu}(1+\alpha \Delta \vartheta) + R_{Sp}(1+\alpha \Delta \vartheta) + R_1] + R_{Sp}(1+\alpha \Delta \vartheta) + R_1$$

daraus erhält man:

$$\frac{R_1 R_2}{R_{Cu}} + R_{Sp} = \frac{R_1 R_2}{R_{Cu}(1+\alpha \Delta \vartheta)} + R_{Sp}(1+\alpha \Delta \vartheta)$$

Da die Temperaturänderungen, denen die Meßgeräte unterliegen, relativ gering sind, und die Glieder $\alpha \Delta \vartheta$ in der letzten Gleichung noch etwas mehr als eine Zehnerpotenz unter 1 liegen, kann man setzen:

$$\frac{R_1 R_2}{R_{Cu}(1+\alpha \Delta \vartheta)} \approx \frac{R_1 R_2}{R_{Cu}} (1 - \alpha \Delta \vartheta) \quad \begin{array}{l} \text{(Beim Rechnen mit Größen} \\ x \ll 1 \text{ kann man die sich} \\ \text{durch Reihenentwicklung} \\ \text{ergebenden Beziehungen} \\ \text{benutzen, z.B. } \frac{1}{1+x} \approx 1-x) \end{array}$$

Setzt man das oben ein, so kann man unter der hier gegebenen Voraussetzung, daß die Temp.-Koeffizienten für R_{Sp} und R_{Cu} gleich sind, schreiben:

$$\frac{R_1 R_2}{R_{Cu}} + R_{Sp} \approx \frac{R_1 R_2}{R_{Cu}} (1 - \alpha \Delta \vartheta) + R_{Sp}(1 + \alpha \Delta \vartheta)$$

$$\frac{R_1 R_2}{R_{Cu}} \alpha \Delta \vartheta \approx R_{Sp} \alpha \Delta \vartheta$$

$$R_{Sp} \approx \frac{R_1 R_2}{R_{Cu}}$$

=====

Unter dieser Bedingung ist I_{Sp} fast konstant. Nachstehendes Beispiel verdeutlicht Ihnen die Verwirklichung einer solchen Schaltung.

Lehrbeispiel 6

Nach der Schaltung Bild 20 sind folgende Größen gegeben:

$$R_{Sp} = 80 \, \Omega, \quad R_{Cu} = 120 \, \Omega, \quad R_1 = 120 \, \Omega,$$

$$R_2 = 80 \, \Omega, \quad U = 400 \, mV.$$

Wie groß ist I_{Sp} bei $20^\circ C$ und bei $40^\circ C$?

Lösung :

Der Kombinationswiderstand R_K der Parallelschaltung

$R_{Sp} + R_1 \parallel R_{Cu}$ ist

$$R_K = \frac{(R_{Sp} + R_1) R_{Cu}}{R_{Sp} + R_1 + R_{Cu}} = \frac{200 \cdot 120}{200 + 120} = 75 \, \Omega,$$

$$I = \frac{U}{R_K + R_2} = \frac{0,4}{75 + 80} = 2,58 \, mA$$

$$U_2 = I \cdot R_K = 2,58 \cdot 75 = 193,6 \, mV$$

$$I_{Sp} = \frac{U_2}{R_{Sp} + R_1} = \frac{193,6}{200} = 0,967 \, mA$$

Bei $20^\circ C$ beträgt also der Strom $I_{Sp} = 0,967 \, mA$
=====

Tritt Erwärmung auf $40^\circ C$ ein, steigt der Widerstand von R_{Sp} und der von R_{Cu} an. $\Delta \vartheta = 20^\circ$ und $\alpha = 0,0039 \, 1/^\circ C$.

$$R_{Sp}' = R_{Sp} (1 + \alpha \Delta \vartheta) = 80 (1 + 0,0039 \cdot 20) = 86,24 \, \Omega$$

$$R_{Cu}' = R_{Cu} (1 + \alpha \Delta \vartheta) = 120 (1 + 0,0039 \cdot 20) = 129,37 \, \Omega$$

R_1 und R_2 sind temperaturkonstant und ändern sich nicht. Somit ergibt sich:

$$R_K' = \frac{206,24 \cdot 129,37}{206,24 + 129,37} = 79,6 \, \Omega \quad I = \frac{0,4}{79,6 + 80} = 2,51 \, mA$$

$$U_2 = 2,51 \cdot 79,6 = 199,9 \, mV \quad I_{Sp} = \frac{199,9}{206,24} = 0,967 \, mA$$

=====

Der Strom durch die Spule des Meßwerks ändert sich also nicht.

Sie müssen den Fremdfeldeinfluß beachten, da Sie sonst ganz erhebliche Fehlanzeigen erhalten können. Sie wissen, daß bei Meßgeräten mit Spulen das Drehmoment durch die im Gerät erzeugten magnetischen Felder des festen und des beweglichen Teils bewirkt wird wie bei einem Motor. Wenn die Felder innerhalb des Meßwerks durch außerhalb erzeugte Felder gestört werden, kann der geeichte Anzeigewert nicht mehr stimmen. Schon das schwache Erdfeld mit rund $2 \cdot 10^{-9}$ Vs/cm² muß bei empfindlichen Geräten berücksichtigt werden. Wenn Sie auf tragbaren Geräten der Klassen 0,2 , 0,5 und 1 einen Nord-Süd-Pfeil sehen, dann müssen Sie das Gerät in dieser Richtung aufstellen, weil es in dieser Richtung geeicht wurde. Fehlt der Pfeil, dann muß das Gerät lt. VDE in jeder Lage zum Erdfeld die Fehlergrenzen seiner Klasse einhalten.

Stärkere Gleich- oder Wechselfelder können z.B. durch nahe stromführende Leiter, Maschinen und Umspanner hervorgerufen werden. Denken Sie beim Messen auch an Regelwiderstände auf dem Meßtisch, die, in Spulenform gewickelt, entsprechend ihrer Amperewindungszahl magnetische Felder bilden. Es kann geschehen, daß ein Dreheiseninstrument einen Ausschlag zeigt, ohne daß es an eine Spannung angeschlossen ist. Bei Wechselstrom ist für den Fehler außer der Stärke auch noch die Phasenlage des Störfeldes maßgebend.

Nach dem VDE sind Richtwerte für den Fremdfeldeinfluß bestimmt:

Fremdfeldeinfluß ist jene Änderung der Anzeige, die lediglich durch ein Fremdfeld von $50 \cdot 10^{-9}$ Vs/cm² bei gleicher Stromart und Frequenz, bei ungünstigster Phase des Fremdfeldes und ungünstigster gegenseitiger Lage verursacht wird. Sie darf $\pm 1,5\%$ der Anzeige bei einem Drehspulgerät und $\pm 3\%$ der Anzeige bei allen anderen Arten von Meßgeräten nicht überschreiten. Die Prüfung soll bei einer Einstellung des Zeigers auf zwei Drittel des Skalenwerts ausgeführt werden.

Haben Sie eine Vorstellung von $50 \cdot 10^{-9}$ Vs/cm² ? Vermutlich nicht, auch nicht durch die Berechnung, daß dieses Feld 25-mal so stark wie das Erdfeld ist. Wenn durch einen Leiter

2000 A fließen, dann herrschen in 80cm Abstand $50 \cdot 10^{-9} \text{Vs/cm}^2$. Das Meßgerät wird in einer Spule von etwa 1 m Durchmesser geprüft. Bei 400 Aw, also z.B. bei 200 Windungen mit 2 A erhält man im Mittelpunkt ein homogenes (gleichmäßiges) Feld von $50 \cdot 10^{-9} \text{Vs/cm}^2$.

Welche Maßnahmen gedenken Sie nun zu treffen, um den Fremdfeldeinfluß zu unterdrücken ?

Als Messender werden Sie die Nähe von Streufelder erzeugenden Maschinen und Apparaten vermeiden. Leitungen mit großen Stromstärken möglichst nicht an die Meßgeräte führen, sondern bei Gleichstrom Nebenwiderstände und bei Wechselstrom Stromwandler zur Herabsetzung des Meßstroms verwenden. Auch die Instrumente werden Sie sicherheitshalber mit mindestens 30cm Abstand voneinander aufstellen, damit sie sich nicht gegenseitig beeinflussen. Unterlassen Sie auch vor der Messung das Putzen des Skalenglases, denn dadurch bringen Sie eine elektrische Ladung auf das Glas, die anziehend auf den Zeiger wirkt. Sie haben dann ein elektrisches Störfeld (einen Kondensator). Durch Anhauchen des Glases (Feuchtigkeit) kann man die Ladung ableiten. Sie können also durch den Aufbau der Meßschaltung den Fremdfeldeinfluß klein halten.

Weiterhin können Sie bei der Messung selbst das Störfeld dadurch weitgehend kompensieren, daß Sie zwei Meßwerte ablesen und davon den Mittelwert nehmen, und zwar führen Sie bei Wechselstromgeräten die zweite Messung mit gewendetem Instrumentfeld (Vertauschung der Anschlüsse) durch; bei Drehspulgeräten für Gleichstrom geht das nicht, Sie müssen dann das ganze Meßgerät um 180° drehen. Es lohnt sich jedenfalls, bei einer Meßreihe einmal diesen Versuch zu machen, wenn Sie Fremdfeldeinfluß befürchten.

Bei der Konstruktion des Meßgeräts hat der Hersteller folgende Möglichkeiten, die Störfelder weitgehend auszuschalten:

1.231 Starkes Nutzfeld im Gerät.

Moderne Drehspulgeräte mit starken Dauermagneten aus Alu-

minium-Nickel-Legierungen haben im Luftspalt bis zu etwa $30.000 \cdot 10^{-9} \text{Vs/cm}^2$. Das Erdfeld mit $2 \cdot 10^{-9} \text{Vs/cm}^2$ kann dabei nichts ausrichten. Das Streufeld von starken Magneten und großen Strömen ist jedoch zu beachten. Andererseits gibt es eisenlose Leistungsmesser, die nur ein Feld von $200 \cdot 10^{-9} \text{Vs/cm}^2$ haben. Hier müssen natürlich schon schwache Störfelder erhebliche Fehlanzeigen ergeben. Man findet Leistungsmesser auch mit Eisen, aber dann muß man andere Fehler in Kauf nehmen. Es ist leider so, daß es kein vollkommenes Meßgerät gibt.

1.232 Abschirmung

Die Abschirmung des Meßgeräts durch einen einhüllenden Eisenpanzer, Kennzeichen auf der Skala durch Nr.20 der Tafel 1, stellt bei ausreichender Bemessung den besten Schutz dar, ergibt aber Verteuerung und erhebliches Mehrgewicht. Wenn der Panzer wirksam sein soll, muß er einen kleinen magnetischen Widerstand haben, was bei gewöhnlichem Eisen große Wandstärken bedeutet. Außerdem darf durch das Fremdfeld keine bleibende Magnetisierung erfolgen, die auf das Meßwerk einwirken kann. Eine gute und leichte Abschirmung gelang erst mit den modernen Nickel-Eisen-Legierungen mit hoher Permeabilität und kleiner Remanenz, die unter verschiedenen Kunstnamen, wie Mumetall, Megaperm, Permalloy usw. geliefert werden. Die Fe- und Ni-Prozente sind verschieden; Mumetall enthält außerdem noch Kupfer, Megaperm enthält Mangan. - Das gewöhnliche Eisenblechgehäuse von Schalttafelgeräten schützt nicht vollkommen, Isolierstoffgehäuse natürlich gar nicht. Darum wird bei diesen eine Abschirmung aus Blech eingelegt.

1.233 Astatistische Anordnung

Wenn Sie zwei Magnetnadeln so übereinanderlegen, daß der Nordpol der einen mit dem Südpol der anderen zusammenkommt, dann wirken sie nach außen nicht mehr als Magnet. Setzen Sie den Mittelpunkt auf eine Spitze wie bei einem Kompaß, so sind die zusammengelegten Nadeln frei beweglich (astatisch¹)

¹ griech.:astasia, Unstettheit, Unruhe; astatisch=leicht bewegl.

und stellen sich nicht in die Richtung des Erdfeldes. Dieses beeinflußt sie nicht mehr. Dieses "astatische Nadelpaar" wurde bei dem alten Nadelgalvanometer gebraucht, um das Erdfeld auszuschalten.

Die astatische Anordnung von Meßwerken zur weitgehenden Ausschaltung des Fremdfeldeinflusses finden Sie auch bei modernen Präzisionsgeräten. Bilder von solchen Ausführungen sehen Sie später bei der Besprechung dieser Geräte.

Grundsätzlicher Aufbau: Zwei elektrisch und mechanisch gleiche Meßwerke sind dicht übereinander in einem Gehäuse untergebracht. Die beweglichen Organe beider Meßwerke sitzen auf einer gemeinsamen Achse. Sie haben also im Gehäuse zwei Meßwerke, gekuppelt durch eine Achse mit gemeinsamem Zeiger und so geschaltet, daß sich die beiden Drehmomente, die der Meßstrom erzeugt, addieren. Dabei haben die Felder oben und unten entgegengesetzte Richtung; infolgedessen verstärkt das Fremdfeld das eine und schwächt das andere. Somit heben sich die Wirkungen auf das Drehmoment an der Achse gegenseitig auf, wenn das Fremdfeld oben so stark ist wie unten, d.h., wenn es homogen ist. Neuerdings sind für astatische und geschirmte Meßinstrumente die höchstzulässigen Fremdfeldfehler auf die Hälfte der eingangs genannten Werte herabgesetzt worden.

1.234 Weitere Einflüsse auf die Meßgenauigkeit

Der Frequenzeinfluß muß laut VDE innerhalb der durch die Klasse gegebenen Fehlergrenze bleiben, wenn sich die Frequenz innerhalb des angegebenen Bereiches (Nennfrequenzbereich) oder um $\pm 10\%$ der Nennfrequenz ändert. Ist jedoch bei Meßgeräten der Klasse 0,2 keine Nennfrequenz oder kein Frequenzbereich angegeben, dann darf die Änderung der Anzeige durch Frequenzänderungen von 15 ... 60 Hz den Wert von $\pm 0,1\%$ der Anzeige nicht überschreiten. Die Niederfrequenz der modernen großen Netze wird so konstant gehalten, daß Sie sich bei Messungen mit dieser Frequenz keine Sorgen zu machen brauchen. Im Gebiet der Mittel- und Hochfrequenz aber haben Sie in einem großen Bereich zu messen.

Der Frequenzfehler wird hervorgerufen:

durch den frequenzabhängigen Scheinwiderstand des Meßwerkes infolge seiner Selbstinduktion und Kapazität.

durch induzierte Wirbelströme und

durch die Gegeninduktivität zweier Spulen.

Durch die Selbstinduktion L der wechselstromführenden Spule steigt ihr induktiver Widerstand $\omega \cdot L$ mit zunehmender Frequenz ($\omega = 2\pi \cdot f$). Beim Strommesser ist das ohne Bedeutung, denn er liegt in Reihe mit dem Verbraucher. Wenn nun auch der Scheinwiderstand der Spule zunimmt, so wird zwar der Gesamtwiderstand des Stromkreises geringfügig größer und damit der Strom kleiner, aber der Strommesser zeigt doch den richtigen Wert an. Dasselbe gilt übrigens bei einer Änderung des Ohmschen Widerstandes durch Erwärmung. Beim Spannungsmesser hingegen messen Sie durch den Spulenstrom die Spannung. Durch den steigenden Spulenwiderstand und den somit sinkenden Strom wird eine Abnahme der Spannung vorgetäuscht.

Die Selbstinduktion der Spule stört also beim Spannungsmesser. Beseitigen läßt sich diese nicht, aber man kann ihren Einfluß klein halten, wenn der Vorwiderstand R als Ohmscher Widerstand groß wird im Verhältnis zum induktiven Widerstand $\omega \cdot L$ der Spule. Dann darf aber der Vorwiderstand wirklich nur ein Ohmscher Widerstand sein, obwohl er doch als dünner Draht in Spulenform gewickelt wird. Wie wird das gemacht? (Bifilare Wicklung, siehe "Grundlagen der Elektrotechnik" Lehrbrief 8)

Zur Kompensation des Einflusses der Selbstinduktion gibt es eine Reihe von Kunstschaltungen. Stellen Sie sich vor: Ein passend bemessener Kondensator überbrückt den Vorwiderstand. Da der Kondensatorwiderstand $1/\omega C$ mit steigender Frequenz sinkt, bleibt der Gesamtwiderstand konstant. Der Einfluß der Kapazität macht sich bei Geräten für Mittel- und Hochfrequenz bemerkbar (ω groß!) und wird bei diesen erwähnt.

Induzierte Wirbelströme in massiven Leitern und im Eisen bewirken zusätzliche Erwärmung sowie durch Rückwirkung eine Schwächung des Feldes. Ihr Einfluß auf die Anzeige muß bei

allen Instrumenten klein gehalten werden durch Vermeidung geschlossener Strombahnen (Metallrahmen mit Schlitzen, Magneteisen fein lamelliert, Hochfrequenztransformatoren mit Massekern usw.). Diese Erscheinung bewirkt auch einen zusätzlichen Fehler beim Einbau von Meßinstrumenten in eiserne Schalttafeln, der jedoch vom Hersteller berücksichtigt und ausgeglichen werden kann.

Die Gegeninduktivität macht sich bei den Spulen eines Leistungsmessers abhängig von der Frequenz bemerkbar und wird bei den einzelnen Geräten erwähnt werden.

Die Wellenform des Wechselstroms kann die Anzeige erheblich beeinflussen. Der auftretende Fehler hängt von der Bauart des Meßgeräts, vom Verfahren der Meßwertbildung ab. Er muß daher bei jeder Bauform erläutert werden. Sie können sich denken, daß ein mit sinusförmiger Spannung geeichtes Gerät bei einer anderen Spannungskurve falsch zeigt. Dies ist der Kurvenformfehler.

Zusammenfassung =====

Die durch die Güteklassen der Meßgeräte festgelegten Fehlergrenzen werden bei Abweichung von den Bezugsdaten für Temperatur, Frequenz, Wellenform und bei Fremdfeldeinfluß überschritten.

Für diese zusätzlichen Fehler sind laut VDE ebenfalls der Klasse entsprechend Grenzen festgesetzt.

Um diese Grenzen einzuhalten, sind je nach dem Meßsystem Kompensationsschaltungen und Verfeinerungen der Konstruktion nötig. Auch durch Auswahl und Aufbau der Meßschaltung können Sie Fehlereinflüsse ausschalten oder klein halten.

Während der Laie die Anzeige eines Meßgeräts als richtig betrachtet, können Sie durch die Kenntnis der Fehlermöglichkeiten den Wert einer Messung beurteilen.

Übungen =====

10. Erläutern Sie den Begriff "Anzeigefehler".
11. Auf der Skala eines Meßgeräts finden Sie das Klassenzeichen 0,5. Was bedeutet das ?
12. Was verstehen Sie unter "Empfindlichkeit" eines Meßgeräts ?
13. Wie erklären Sie den Einfluß eines Fremdfeldes ?
14. Warum ist ein Blech aus einer Ni-Fe-Legierung, z.B. Mumetall, als Abschirmung gegen ein Fremdfeld besonders geeignet ?
15. Sie messen mit einem ungeschützten Wechselstromgerät in einem Fremdfeld. Wie können Sie dessen Einfluß schaltungs-technisch kompensieren ?
16. Eine Meßwerkspule aus Cu-Draht hat einen Widerstand $R_{Sp} = 15 \text{ Ohm}$. Ihr ist ein temperaturkonstanter Manganwiderstand $R_V = 75 \text{ Ohm}$ vorgeschaltet. Wieviel % beträgt die Widerstandsänderung des Gesamtwiderstandes $R_{Sp} + R_V$ bei einer Erwärmung um 10 grd gegenüber 20°C ?
 $\alpha_{Cu} = 0,0039 \text{ 1/grd}$, $\alpha_{\text{Manganin}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/grd}$,
Abnahme der Federkraft nicht berücksichtigt.

2 Die Meßwerke

2.0 Drehspulmeßgerät

2.01 Aufbau und Wirkungsweise.

=====

Das Sinnbild finden Sie unter Nr.1 der Tafel 1. Dieses allgemein als Drehspulmeßwerk bezeichnete System hat wegen seiner guten Eigenschaften ein großes Anwendungsgebiet. Sie wissen schon aus "Grundlagen der Elektrotechnik" Lehrbrief 1, daß es an sich nur für Gleichstrom geeignet ist. Sie wissen

aber auch, daß man Wechselstrom bequem gleichrichten kann. Dadurch ist dieses Meßwerk für fast alle Frequenzen verwendbar geworden.

2.011 Die Hauptteile.

Die Hauptteile werden Ihnen in Bild 21 gezeigt, bei dem die Lagerträger wegen der Übersichtlichkeit fortgelassen sind. Der feststehende, hufeisenförmige Dauermagnet aus Wolfram- oder Kobaltstahl hat angeschraubte, zylindrisch ausgedrehte Polschuhe aus weichem Eisen mit kleinem magnetischem Widerstand. Zwischen den Polschuhen erkennen Sie den zylindrischen Polkern aus Weicheisen, der an dem nicht gezeichneten Lagerträger genau zentriert befestigt ist. Beach-

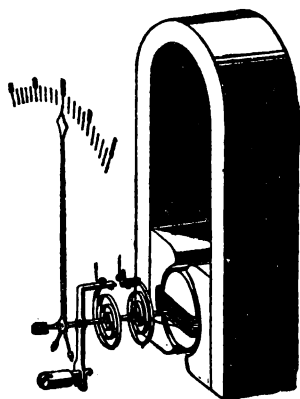


Bild 21 Drehspulinstrument

ten Sie, daß der Polkern sich nicht mitdreht ! Er hat den Zweck, im Luftspalt zwischen Polschuh und Kern ein radialhomogenes Feld zu schaffen, d.h., daß die Kraftlinien im Luftspalt radial gerichtet sind und gleichmäßige Dichte haben. In diesem homogenen Feld bewegt sich die Drehspule, deren Wicklung um ein Aluminiumrähmchen - erinnern Sie sich an die Dämpfung! - gewickelt ist. Sie sehen ferner die beiden gegenläufig gewickelten Spiralfedern für das Gegenmoment, die auch zur Stromzuführung dienen. Die rechte Feder sitzt gewöhnlich auf der anderen Seite, ihr äußeres Ende ist am Lagerträger befestigt, das der linken Feder können Sie zur Nullpunkteinstellung etwas verdrehen (siehe 1.12). Die Skala ist schematisch gezeichnet, unten am Zeiger erkennen Sie die beiden Ausgleichgewichtchen (siehe 1.15). Meist hat der Magnet einen verstellbaren magnetischen Nebenschluß. Dieser besteht aus einem verschiebbaren Weicheisenstück, mit dem Sie das die Drehspule durchsetzende Feld etwas ändern können, weil ein Teil der Feldlinien entsprechend dem Widerstand der Nebenschlußstrecke Eisen plus Luft abgezweigt wird (Bild 22a).

Sie können also das Meßwerk empfindlicher machen, wenn Sie das Nebenschlußeisen in Pfeilrichtung verschieben, z.B. zum Nacheichen, falls der Magnet schwächer geworden ist. Man kann den Nebenschluß auch zur Kompensation des Temperatureinflusses verwenden. Entweder man läßt ihn durch einen Bimetallstreifen temperaturabhängig verstellen, oder man legt über den Luftspalt eine feste Brücke aus einer Speziallegierung (Thermoperm), deren magnetische Leitfähigkeit mit steigender Temperatur schneller abnimmt als die Remanenz des Magneten. Die Wirkung ist gleich der, die Sie durch Verschieben des Weicheisens in Pfeilrichtung erzielen. Man kann diese Thermopermstücke so bemessen, daß die Luftinduktion \mathcal{L} im Temperaturbereich konstant bleibt oder daß die Induktion mit steigender Temperatur größer wird, wenn der durch die Widerstandszunahme der Spule und der Feder abnehmende Strom kompensiert werden soll. Bild 22 zeigt zwei Beispiele der zahlreichen Bauformen von Magneten. Der Hufeisenmagnet (Bild 21) ist schwer und hat große Streuung von Feldlinien zwischen den Schenkeln und an deren Außenseite. Die Streulinien sind für die Drehspule nutzlos, sie stören höchstens, wenn sie durch benachbarte Eisenmassen gehen, die dann als magnetischer Nebenschluß das Feld ändern können und die Anzeige fälschen.

Merken Sie sich :

Beim Messen mit mehreren Feinmeßgeräten sollen diese mit mindestens 30 cm Abstand voneinander aufgestellt werden.

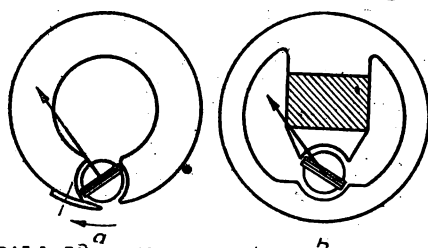


Bild 22 Ringmagnete

Die Ringmagnete nach Bild

22 haben wesentlich geringere Streuung. Sie konnten verwendet werden, nachdem man bessere Werkstoffe für Magnete gefunden hatte. Der Magnet aus Wolframstahl mußte so lang sein, um genügend Sicherheit gegen Entmagnetisierung zu erhalten. Die hochlegierten Kobaltstähle und die Stähle mit Aluminium und Nickel (Alnistahl, Örstit, Koerzit) ermöglichen wegen

ihrer hohen Koerzitivkraft verringerte Bau-
länge und Gewicht und
bis dreimal so große
Luftspaltinduktion. In
Bild 22a sehen Sie ei-
nen Magnet aus Kobalt-
stahl ohne angesetzte
Polschuhe mit ausge-
schliffener Bohrung für
Drehspule. In Bild 22b
ist der eigentliche Mag-
net aus Alnistahl
schraffiert, das übrige
ist Weicheisen. Der
Alnistahl ist so hart,

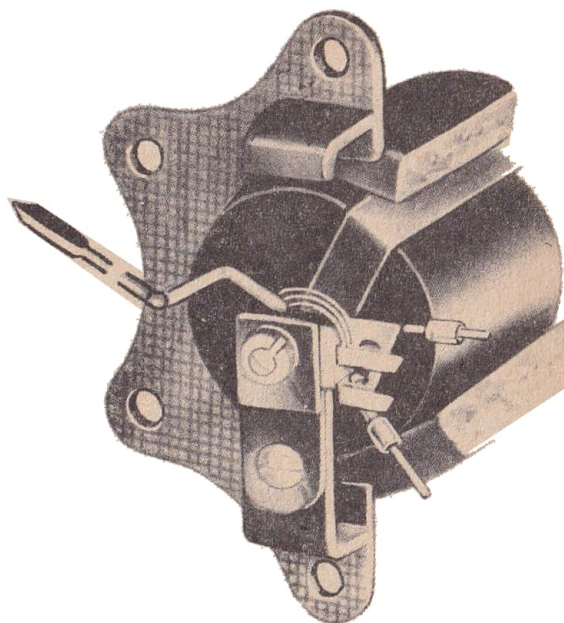


Bild 22 c Drehspulmeßwerk mit
Kernmagnet

daß Sie Nacharbeiten
nur durch Schleifen und
Schweißen durchführen können. Deshalb gießt man sie in mög-
lichst einfache Formen. Eine ähnliche Anordnung finden Sie
bei dem sogenannten Multizet. Bild 22 c zeigt ein modernes
Drehspulmeßwerk mit einem Kernmagneten aus diesem hochwer-
tigen Material, der innerhalb der Drehspule fest gelagert ist.
Der äußere geschlossene Eisenring, von dem im Bild ein Teil
weggeschnitten ist, dient als Rückschluß für die Feldlinien
und schirmt außerdem weitgehend gegen ein Fremdfeld ab.

2.012 Die Abhängigkeit des Zeigerausschlages vom Meßstrom

Aus dem Studium der "Grundlagen der Elektrotechnik" wissen
Sie, daß ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld abge-
lenkt wird. Die Kraft, mit der er senkrecht zu den Feldlini-
en und zum Strom bewegt wird, ist

$$P = \frac{L \cdot l \cdot I}{9,81 \cdot 10^{-5}} \quad p \quad (3)$$

Da jede Spule zwei Spulenseiten hat und die Spule w Windungen

mit dem mittleren Radius r besitzt, so erhält man das Drehmoment zu :

$$M = 2 P \cdot r = \frac{2 \cdot \cancel{L} \cdot l \cdot I \cdot w \cdot r}{9,81 \cdot 10^{-5}} \left[\text{pcm} \right]$$

Darin ist \cancel{L} die Luftspaltinduktion in Vs/cm²,

I = Meßstrom in A,

l = wirksame Leiterlänge = axiale Polkernlänge in cm

w = Windungszahl der Drehspule,

r = mittlerer Spulenradius in cm .

Für ein gegebenes Meßwerk mit radialhomogenem Feld (vgl. Bild 23) sind außer dem Strom I alle Größen der rechten Seite der Gleichung konstant. Das Magnetfeld im Luftspalt ist radialhomogen (Bild 23). Faßt man nun diese konstanten Größen zu einer Gesamtkonstanten c_1 zusammen, dann ist das

$$\text{Ablenkmoment } M_I = c_1 \cdot I.$$

Die Federn erzeugen ein Gegendrehmoment , das sogen.

$$\text{Richtmoment } M_R = c_2 \cdot \alpha,$$

wobei α der Ausschlag in Skalenteilen ist und c_2 die Federkonstante in pcm/Skt gegeben durch Abmessungen und Werkstoff der Feder.

Im Idealfall ohne Reibung dreht sich die Spule solange, bis

$$M_I = M_R, \text{ also } c_1 \cdot I = c_2 \cdot \alpha \text{ ist. Daraus folgt}$$

$$\text{Ausschlag } \alpha = \frac{c_1}{c_2} \cdot I$$

Der Quotient aus den beiden Konstanten c_1 und c_2 ergibt wieder eine Konstante c_3 . Man erhält somit $\alpha = c_3 \cdot I$. Hierin wird α in Skalenteilen (= Skt) und I im Strommaß z.B. mA eingesetzt. Demnach erhält die Konstante c_3 die Dimension Skt/mA. Nach Abschnitt 1.21 - insbesondere nach Lehrbeispiel 3 - ist das jedoch die Dimension der Empfindlichkeit eines Meßwerks. Wie ebenfalls in 1:21 (Lehrbeispiel 4) angegeben, ist der Kehrwert der Empfindlichkeit die Meßgerätekonstante k , die vom Hersteller für Geräte mit Skalen ohne Bezeichnung der Meßgröße angegeben wird. Nimmt man statt c_3 die Meßgerätekonstante k , so erhält man endgültig:

$$I = k \cdot \alpha \quad (4)$$

Hierin wird eingesetzt: I im Strommaß, α in Skalenteilen (= Skt) und k in Stromeinheit/Skalenteil. Falls I in mA angegeben ist, so wird k in mA/Skt eingesetzt.

Der Ausschlag ist eine lineare Funktion des Stromes. Doppelter Strom gibt doppelten Ausschlag, dreifacher Strom den dreifachen Ausschlag usw.

Wir hätten also eine gleichmäßig geteilte **Skala**. Die Fehler des Gerätes bewirken geringfügige Abweichungen, so daß der Hersteller bei Feinmeßgeräten die Teilung durch Eichung bestimmen muß.

Wünscht man sich einen ungleichmäßigen Skalen-Verlauf, so ist der Luftspalt im Drehbereich entsprechend veränderlich zu machen. Dann ist in Formel (3) die Induktion \mathfrak{L} und dadurch in (4) c_3 veränderlich. Machen Sie den Luftspalt z.B. so wie in Bild 24 angegeben, dann haben wir anfangs bei großem Luftspalt eine kleine Induktion und damit ein kleines Drehmoment, das mit kleiner werdendem Luftspalt zunimmt. Sie werden daraus erkennen, daß die Teilung am Anfang eng ist und dann entsprechend der Polschuhform weiter wird, wie Bild 25 zeigt. Das im Bild 22c gezeigte Kernmagnetmeßwerk hat bei kreisrunder Form des Kernmagneten und des konzentrisch darum liegenden Eisenringes auch kein radial homogenes Magnetfeld (Bild 26a). Um die Skala praktisch linear zu teilen, gibt man dem Kern die im Bild 26b gezeigte Form.

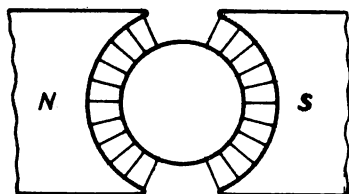


Bild 23 Radial-homogenes Magnetfeld

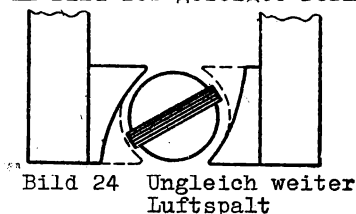


Bild 24 Ungleich weiter Luftspalt



Bild 25 Skalenteilung

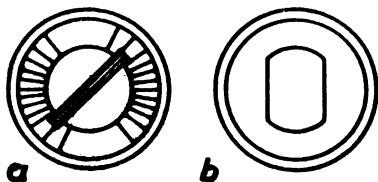


Bild 26 a und b Magnetfeld eines Kernmagnetmeßwerks

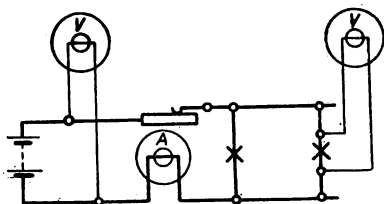


Bild 27 Strom- und Spannungsmessung

2.013 Strom- und Spannungsmesser

Bei der Aufstellung der Formel (4) hat sich ergeben, daß das Drehmoment im gegebenen Feld des Dauermagneten lediglich vom Strom abhängig ist. Das Drehspulgerät ist also grundsätzlich ein Strommesser, und zwar für Gleichstrom. Sie wissen aus den Lehrbriefen "Grundlagen der Elektrotechnik" (Linkehandregel), daß die Kraftrichtung durch die Stromrichtung im Feld gegeben ist. Bei Wechselstrom erhält also der Zeiger abwechselnd einen Bewegungsimpuls nach rechts und nach links. Bereits bei einer Frequenz von 50 Hz erfolgt kein Ausschlag, da die Masse des Meßwerkes zu groß ist.

Die Spannung können Sie nur mittelbar nach dem Ohmschen Gesetz $U = I \cdot R$ messen. Diese Gleichung sagt Ihnen eindeutig: Wenn der Widerstand R des Meßkreises konstant ist, dann ist der Meßstrom I ein Maß für die angelegte Spannung U . Setzen Sie in (4) für $I = \frac{U}{R}$ ein, dann erhalten Sie:

$$\frac{U}{R} = k \cdot \alpha \quad \text{oder} \quad U = R \cdot k \cdot \alpha.$$

Da $R \cdot k$ auch eine Konstante ergibt, schreibt man:

$$U = k_u \cdot \alpha \quad (4a)$$

k_u ist Spannungskonstante in V/Skt. Man kann also die Skala in Volt oder Millivolt statt in Stromeinheiten eichen. Daraus ergibt sich die grundsätzliche Schaltung nach Bild 27. Den Strommesser schalten Sie in den Stromkreis, dessen Stromstärke gemessen werden soll, den Spannungsmesser parallel an die Punkte, deren Potentialdifferenz das Gerät als Spannung

anzeigen soll.¹

Das Meßwerk braucht je nach der Empfindlichkeit nur 2 ... 60 mA für den Endausschlag und hat einen geringen Widerstand von einigen Ohm.

Daraus ergibt sich nach dem Ohmschen Gesetz $R = \frac{U}{I}$ ein Vorwiderstand bei höheren Spannungen aus temperaturunabhängigem Widerstandsmaterial (Manganin), wenn das Meßwerk als Spannungsmesser dienen soll. Der Vorwiderstand muß aus Manganin sein, damit der Widerstand des Stromkreises möglichst konstant bleibt, sonst würde bei längerer Einschaltung durch die Erwärmung eine Widerstandssteigerung eintreten. Dadurch würde der Strom abnehmen und das Gerät weniger Spannung anzeigen, obgleich die speisende Spannung konstant geblieben ist. Der Vorwiderstand wird bei Laborgeräten häufig getrennt geliefert, bei Schalttafelgeräten ein- oder angebaut, jedenfalls aber so, daß er Spule und Federn nicht anwärmt.

Sie können sich als allgemeine Regel merken:

Spannungsmesser großer Widerstand, Parallelschaltung !
Strommesser kleiner Widerstand, Reihenschaltung mit Verbraucher !

Schalten Sie irrtümlich den Strommesser als Spannungsmesser, dann haben Sie, da der Instrumentenwiderstand klein ist, praktisch einen Kurzschluß. Sie müssen sich darüber klar sein, daß bei jeder Spannungsmessung ein Strom fließt, der die Spannungsquelle belastet und einen Spannungsabfall erzeugt. Dies erläutert folgendes Lehrbeispiel:

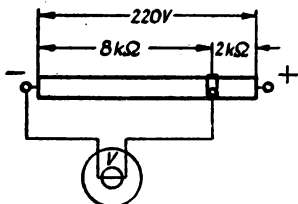


Bild 28
Schaltung des Spannungsteilers

Lehrbeispiel 7

Ein Spannungsteilerwiderstand liegt nach Bild 28 an 220 Volt. Sein Widerstand beträgt 10 kΩ.

¹ Um Schaltpläne richtig lesen und zeichnen zu können, müssen Sie die gebräuchlichsten genormten Schaltzeichen lernen, die in FRIEDRICH, Tabellenbuch für die Elektrotechnik, Ausgabe C, Fachbuchverlag Leipzig, enthalten sind.

- a) Welche Spannung herrscht am Abgriff $8\text{ k}\Omega$, wenn der Spannungsmesser nicht angeschlossen ist ?
- b) Welche Spannung zeigt ein Spannungsmesser, der beim Endwert $240\text{ V } 30\text{ mA}$ aufnimmt ?

L ö s u n g :

a) Die gesuchte Spannung sei U_x . Die Spannungen müssen sich wie die Widerstände verhalten.

$$U_x : 220\text{ V} = 8\text{ k}\Omega : 10\text{ k}\Omega, \text{ also } U_x = 0,8 \cdot 220\text{ V} = \underline{\underline{176\text{ V}}}$$

b) Der Widerstand des Spannungsmessers (Zuleitungen können vernachlässigt werden) ist $R_g = 240\text{ V} / 0,03\text{ A} = 8000\Omega = 8\text{ k}\Omega$.

Durch den Spannungsmesser wird eine Stromverzweigung gebildet, deren Widerstand $4\text{ k}\Omega$ ist, da jeder Zweig $8\text{ k}\Omega$ hat. Der an 220 V liegende Gesamtwiderstand ist $4\text{ k}\Omega + 2\text{ k}\Omega = 6\text{ k}\Omega$. Die Spannung am Abgriff, die das Instrument anzeigt, ist jetzt

$$U_x = 4\text{ k}\Omega / 6\text{ k}\Omega \cdot 220\text{ V} = \underline{\underline{147\text{ V}}}$$

nach der gleichen Rechnung wie bei a). Durch die Belastung des Spannungsmessers tritt also ein erheblicher Spannungsabfall auf.

Sie müssen hochohmige Meßgeräte verwenden, z.B. beim Messen von Anoden- und Gitterspannungen in Röhrenschaltungen ist ein Gerät zweckmäßig, das etwa 2 mA bei Vollausschlag braucht. Das Messen einer Spannung ohne Stromentnahme ermöglicht das elektrostatische Gerät und die Kompensationsmethode, die später besprochen werden.

Häufig gibt man heute - insbesondere bei Meßwerken für Spannungsmesser - den Widerstand in Ω/V an. Das darf Sie nicht dazu verleiten anzunehmen, daß der Gerätewiderstand sich über den Ausschlagbereich ändert. Diese Angabe ist vielmehr mit dem Endwert des Meßbereiches zu multiplizieren. Ist z.B. für ein Meßwerk $500\Omega/\text{V}$ angegeben und hat es bei Endausschlag an seinen Klemmen einen Spannungsabfall von 50 mV , dann ist sein Widerstand $R_g = 500\Omega/\text{V} \cdot 0,05\text{ V} = 25\Omega$.

Übrigens gibt der Kehrwert $\frac{1}{500 \Omega/V} = 2 \text{ mA}$ den Strom bei Endausschlag an.

2.02 Meßbereicherweiterung

2.021 Strommesser

Der Spulenstrom ist durch die stromzuführenden Spiralfedern begrenzt, die wegen Gefährdung der elastischen Eigenschaften nicht erwärmt werden sollen. Deshalb wickelt man die Spule für höchstens 60 mA bei Vollausschlag. Was machen Sie nun, wenn Sie größere Ströme messen wollen? Erinnern Sie sich an das Gesetz der Stromverzweigung. Damit haben Sie die Lösung. Man muß den 60 mA übersteigenden Strom durch einen parallel geschalteten Widerstand an der Spule vorbeileiten (Bild 29). Der zu messende Strom I verzweigt sich mit dem Anteil I_n in den sogenannten Nebenwiderstand (engl. Shunt) mit dem Widerstandswert R_n und mit dem Anteil I_g ins Meßwerk mit dem Widerstand R_g . Die Zweigströme verhalten sich umgekehrt wie die Zweigwiderstände, also $\frac{R_n}{R_g} = \frac{I_g}{I_n}$,

daraus folgt $R_n = R_g \cdot \frac{I_g}{I_n}$.

Nun ist $I_n = I - I_g$; dies eingesetzt ergibt

$$R_n = R_g \cdot \frac{I_g}{I - I_g} = R_g \cdot \frac{1}{\frac{I}{I_g} - 1} \quad (\text{Bruch durch } I_g \text{ gekürzt})$$

Bezeichnet man $\frac{I}{I_g}$ als Meßbereicherweiterung mit n , so wird

$$R_n = \frac{R_g}{n - 1} \quad (5)$$

Nach dieser Formel bestimmt man den Ohmwert des Nebenwiderstandes R_n für einen gewünschten Meßbereich, wenn man den Meßwerkwiderstand R_g und die Strom- oder Spannungsempfindlichkeit des Geräts kennt.

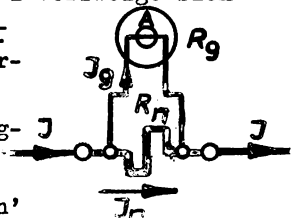


Bild 29 Meßbereicherweiterung durch Nebenwiderstand

Lehrbeispiel 8

Ein Drehspulmeßwerk hat 10Ω Widerstand und bei 150 Skalenteilen einen Spannungsverbrauch von 45 mV. Wie groß wird der Nebenwiderstand R_n für einen Meßbereich von 4,5 A ?

Lösung :

Da der Zeiger auf den Endstrich 150 kommt, wenn an die Klemmen 45 mV gelegt werden, so ist nach dem Ohmschen Gesetz der Spulenstrom (Instrumentenstrom)

$$I_g = \frac{U}{R_g} = \frac{45 \text{ mV}}{10 \Omega} = 4,5 \text{ mA}$$

Die Meßbereicherweiterung $n = \frac{I}{I_g} = \frac{4,5 \cdot 1000 \text{ A}}{4,5 \text{ A}} = 1000$

$$R_n \cdot \frac{R_g}{n-1} = \frac{10 \Omega}{1000-1} = 0,01001 \Omega$$

Auf so viele Stellen hinter dem Komma werden nun die Abmessungen des Widerstandes natürlich nicht berechnet, sondern vielleicht auf rund $0,01\Omega$. Der richtige höhere Wert kann bei der Eichung gewonnen werden, etwa durch geringe Querschnittverringering (Abschaben).

Für kleine Ströme (bei tragbaren Feinmeßgeräten etwa 6 ... 10 A, bei Schalttafelgeräten höchstens 100 A) werden die Nebenwiderstände in das Gehäuse ein- oder auf der Rückseite angebaut. Die Wärmeentwicklung darf nicht stören. Für höhere Ströme werden daher getrennte Nebenwiderstände verwendet; dazu kommt, daß Sie beim Bau von Schaltanlagen nicht die starken Querschnitte bis zu den Strommessern zu legen brauchen, sondern nur dünne Zuleitungen (siehe Bild 29). Der Nebenwiderstand liegt dabei im Hauptstromkreis, die Leitungen zum Meßgerät werden an den Klemmen a und b (siehe Bild 30) angeschlossen. Austauschbare Nebenwiderstände müssen um eine Güteklasse besser sein als das Instrument, für das sie verwendet werden (vergl. Tafel 1).



Bild 30 Nebenwiderstand

Der Widerstand der Zuleitungen vom Nebenwiderstand zum Meßwerk muß berücksichtigt werden, denn sie sind nach Bild 29 zum Widerstand R_g des Meßwerks zu rechnen. Im letzten Lehrbeispiel hatten Sie also mit einem angebauten Widerstand gerechnet. Sonst wird lt. Normung der Widerstand von $0,035 \Omega$ berücksichtigt. Das ist 2 mal 1 m Kupferleitung von 1 mm^2 oder 2 mal 1,5 m von $1,5 \text{ mm}^2$ usw., denn der Widerstand muß gleichbleiben. Bild 30 zeigt das Ausführungsbeispiel eines Nebenwiderstandes zum Einfügen in eine Stromschiene. Die Hauptanschlüsse sind 2 Kupferwinkelstücke, an denen Sie auch die Klemmschrauben a und b für die Leitungen zum Instrument sehen. Der Meßwiderstand wird durch eingelötete Manganinstäbe dargestellt, deren Querschnitt und Anzahl von der Stromstärke bestimmt werden. Für kleinere Stromstärken hat man einen geraden oder gewendelten Manganindraht oder auch ein gewelltes Manganinband. Wie Sie in 1.23 erfahren haben, ist Manganin am geeignetsten, weil es außer einem kleinen Temperaturkoeffizienten auch die geringste Thermospannung gegen Kupfer hat. Wenn die beiden Anschlußstücke des Nebenwiderstandes ungleiche Temperatur haben, womit Sie wegen der verschiedenen Übergangswiderstände der Kontakte immer rechnen können, so erhält das Meßwerk eine zusätzliche Thermospannung.

Die Meßanordnung nach Bild 29 als eine Strommessung im Nebenschluß können Sie übrigens auch auffassen als die Messung des Spannungsabfalls am Nebenwiderstand durch ein Millivoltmeter. Die Hersteller gleichen auch auf diese Weise die Widerstände auf normale Spannungswerte bei Nennstrom ab: 30, 60, 150 mV; ausnahmsweise 300 mV. Bei Schalttafelgeräten wählt man aus der Preisliste den normalen getrennten Widerstand für 60 mV zu einem der aufgeführten Nennströme (Meßbereich). Listenmäßig gibt es Widerstände für Nennströme

von 1 ... 4000 A. Das zugehörige Drehspulmeßwerk wird dann ebenfalls für 60 mV bei Vollausschlag ausgeführt unter Einrechnung des erwähnten Zuleitungswiderstandes von $0,035 \Omega$. Für besonders lange Zuleitungen werden auch Widerstände mit 150 mV Abfall nebst dem zugehörigen Meßgerät listenmäßig geführt.

Wie in 2.013 schon erwähnt, spielt der Meßgerätewiderstand, also der Gesamtwiderstand von $R_g \parallel R_n$, eine besondere Rolle hinsichtlich der Beeinflussung des Meßkreises an oder in dem ein Strom bzw. eine Spannung gemessen wird. Den Gesamtwiderstand eines erweiterten Strommessers $R_g \parallel R_n$ erhält man folgendermaßen:

$$\begin{aligned} \text{Der Leitwert} \quad \frac{1}{R_g \parallel R_n} &= \frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_n} \\ \text{da} \quad R_n &= \frac{R_g}{n-1}, \quad \text{ist} \quad \frac{1}{R_n} = \frac{n-1}{R_g} \\ \text{eingesetzt:} \quad \frac{1}{R_g \parallel R_n} &= \frac{1}{R_g} + \frac{n-1}{R_g} = \frac{n}{R_g} \\ \text{Der Gesamtwiderstand somit:} \quad R_g \parallel R_n &= \frac{R_g}{n} \quad (5a) \end{aligned}$$

Der Gesamtwiderstand ist gleich dem n-ten Teil des Widerstandes vom nichterweiterten Gerät.

L e h r b e i s p i e l 9

Ein Drehspulmeßwerk mit einem 12 Ohm großen Spulenwiderstand, dessen Skala in 75 Teile geteilt ist, hat eine Konstante $k = 80 \mu A/\text{Skt.}$ Sein Meßbereich soll mit einem Nebenwiderstand auf das 5-fache erweitert werden. Wie groß sind der Gesamtwiderstand des erweiterten Meßgerätes, der Nebenwiderstand und welchen Meßbereich erhält es durch die Erweiterung?

L ö s u n g :

$$\text{Gesamtwiderstand } R = R_g \parallel R_n = \frac{R_g}{n} = \frac{12 \Omega}{5} = 2,4 \Omega$$

$$R_n = \frac{R_g \cdot R}{R_g - R} = \frac{12 \, \Omega \cdot 2,4 \, \Omega}{(12 - 2,4) \, \Omega} = 3 \, \Omega$$

Bereich vor der Erw.: $I_g = k \cdot \alpha = 80 \, \mu\text{A/Skt} \cdot 75 \, \text{Skt} = 6000 \, \mu\text{A} = 6 \, \text{mA}$

Bereich nach der Erw.: $I = I_g \cdot n = 6 \, \text{mA} \cdot 5 = 30 \, \text{mA}$

2.022 Spannungsmesser

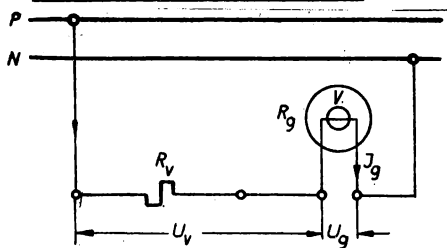


Bild 31 Meßbereicherweiterung durch Vorwiderstand

Wie beim Strommesser findet man eine allgemeine Formel zur Berechnung des Vorwiderstandes R_v für einen gewünschten Meßbereich mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes (Bild 31). Dem Höchststrom I_g in der Spule, also auch im Vorwiderstand, entspricht

die höchste angezeigte Spannung U .

U_v ist die Teilspannung am Vorwiderstand R_v .

$$R_v = \frac{U_v}{I_g} = \frac{U - U_g}{U_g / R_g} = R_g \cdot \frac{U - U_g}{U_g} = R_g \cdot \left(\frac{U}{U_g} - 1 \right)$$

Bezeichnet man die Meßbereicherweiterung $\frac{U}{U_g}$ mit n , so wird

$$R_v = R_g \cdot (n - 1) [\Omega] \quad (6)$$

Lehrbeispiel 10

Ein Meßwerk mit $R_g = 10 \, \Omega$ und $U_g = 60 \, \text{mV}$ soll beim Endaus-schlag 300 V anzeigen.

- Wie groß müssen Sie den Vorwiderstand R_v machen ?
- Wie groß ist die Leistungsaufnahme des Spannungsmessers bei 300 V ?

Lösung :

$$a) \text{ Die Meßbereicherweiterung } n = \frac{300 \, \text{V}}{0,06 \, \text{V}} = 5000$$

$$R_v = 10 \, \Omega \cdot (5000 - 1) = 49 \, 990 \, \Omega$$

=====

Sie können den Vorwiderstand R_v auch auf folgende Weise berechnen:

Das Meßwerk braucht für Vollausschlag $I_g = \frac{60 \text{ mV}}{10 \text{ } \Omega} = 6 \text{ mA}$.

Dieser Strom muß auch bei 300 V fließen, also muß der Gesamtwiderstand sein: $R = \frac{300 \text{ V}}{0,006 \text{ A}} = 50 \text{ 000 } \Omega$. Davon 10 Ω für die Spule abgezogen, bleiben 49 990 Ω .

b) Die Leistung ist bekanntlich $N = \frac{U^2}{R}$ wobei R der Gesamtwiderstand ist, also

$$N = \frac{U^2}{R_v + R_g} = \frac{(300 \text{ V})^2}{50 \text{ 000 } \Omega} = \frac{3^2 \cdot 10^4 \text{ V}^2}{5 \cdot 10^4} = \frac{9 \text{ V}^2}{5} = \underline{\underline{1,8 \text{ W}}}$$

Wenn Sie, wie oben, erst den Strom ausrechnen, kommen Sie auf dasselbe Ergebnis nach der Gleichung $N = U \cdot I = 300 \text{ V} \cdot 0,006 \text{ A} = 1,8 \text{ W}$. Das Gerät nimmt also sehr wenig Leistung auf, und davon entfällt ein kleiner Teil, der vernachlässigt werden kann, auf das Meßwerk selbst, nämlich $60 \text{ mV} \cdot 6 \text{ mA} = 360 \text{ Mikrowatt } (\mu\text{W})$ oder 0,36 Milliwatt (mW). Den Hauptverlust verursacht der Vorwiderstand.

Nach den früheren Ausführungen (2.013) muß der Vorwiderstand temperaturunabhängig sein. Man verwendet in der Regel isolierten Manganindraht auf Rollen, Platten oder Rahmen aus Isolierstoff, meist in das Gehäuse eingebaut, wenn die Wärmeentwicklung zulässig ist. Manchmal finden Sie bei tragbaren Geräten Ventilationslöcher zur Wärmeableitung. Feinmeßgeräte für Labor und Prüffeld sind gewöhnlich für verschiedene Meßbereiche vorgesehen, sie haben Vorwiderstände, die in einem besonderen Gehäuse aus gelochtem Blech und herausgeführten Anzapfungen, besonders bei höheren Spannungen, untergebracht sind. Vorwiderstände für Bereiche über 650 V müssen durch einen Hochspannungspfeil gekennzeichnet sein und müssen nach VDE 0410 einen Hinweis auf das Auftreten von Hochspannung tragen. Übrigens müssen Schalttafelinstrumente mit leitendem Gehäuse einen Schutzleitungsanschluß haben, wenn bei Beschädigung die Spannung des Gehäuses höher als 42 V werden kann. Sie kennen

auch die in der Funktechnik viel verwendeten Hochohmwiderstände in Form eines kleinen Zylinders. Bei dem als "Karboid" bezeichneten Widerstand z.B. wird auf den Voll- oder Hohlzylinder aus Porzellan eine dünne Kohlenstoff-Schicht aufgebrannt, die mit einem Schutzlack überzogen wird, nachdem die Enden Kontaktschellen erhalten haben. Solche Vorwiderstände werden Sie bei Spannungsmessern aus der Massenfabrikation finden. Der Temperatureinfluß ist schwach negativ ($0,02 \dots 0,03\% \text{ } 1/\text{grd}$). Der Widerstandswert läßt sich auf etwa 1% abgleichen.

2.023 Vielfach-Meßgeräte

Bei den Vielfach-Meßgeräten ist jeweils ein Drehspulmeßwerk mit mehreren Meßbereichen ausgestattet. Betrachtet man zunächst die Vielfach-Strommesser, so müßten die Nebenwiderstände für die Bereiche mittels eines Stufenschalters einzeln zum Meßwerk parallel geschaltet werden. Das würde aber bedeuten, daß der Übergangswiderstand der Schalterkontakte in Reihe zum jeweiligen Nebenwiderstand liegt. Da die Nebenwiderstände aber oftmals sehr kleine Widerstandswerte haben, ist in diesen Fällen der schwer erfassbare Kontaktwiderstand nicht mehr zu vernachlässigen. Man vermeidet daher durch eine Schaltung, wie sie das Bild 32 zeigt, einen Schalter. Das Gerät hat dann eine gemeinsame Klemme für alle Bereiche und dazu noch soviel Klemmen wie Bereiche vorhanden sind. Hier (Bild 32) sind es beispielsweise drei Bereiche. Die praktische Ausführung eines solchen Gerätes ist in Bild 33 dargestellt. Kommt bei Meßgeräten mit einer großen Anzahl von Bereichen dennoch ein Schalter zur Anwendung, so behält man die im Bild 32 angegebene Schaltung grundsätzlich bei und schaltet ihn entsprechend Bild 34.

Bei der Berechnung der in Reihe geschalteten Nebenwiderstände wollen wir von der Schaltung nach Bild 32 ausgehen. Hierin ist I_1 der kleinste, I_2 der mittlere und I_3 der



Bild 33 Praktische Ausführung eines Vielfachstrommessers

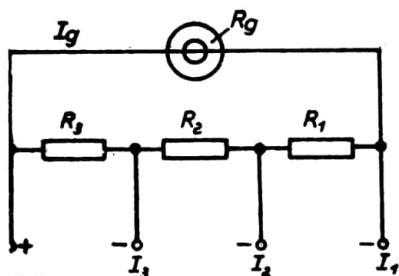


Bild 32 Vielfachstrommesser

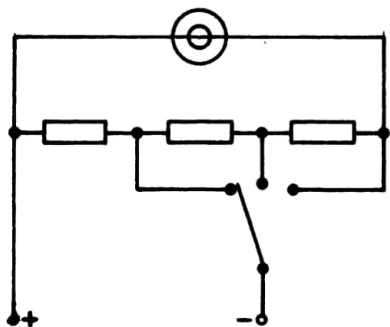


Bild 34 Vielfachstrommesser mit Schalter

größte Strommeßbereich. Man betrachtet zunächst den Bereich I_1 . Für diesen Bereich läßt sich der zum Meßgerät parallel geschaltete Gesamt Widerstand $R_1 + R_2 + R_3 = R$ nach der im Abschnitt 2.021 in der Ableitung der Nebenwiderstands berechnung enthaltenen Gleichung

$$R_n = R_g \frac{I_g}{I - I_g} \quad \text{berechnen:}$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = R = \frac{R_g \cdot I_g}{I_1 - I_g}$$

Für die anderen Bereiche ergibt sich das in Bild 35 dargestellte Ersatzschaltbild, da dann ein Teil des Gesamt widerstandes $R = R_1 + R_2 + R_3$ als Vorwiderstand R_v und der Rest von R als Nebenwiderstand R_p wirkt. Mit $R_p + R_v = R_1$ ergibt sich deshalb der Nebenwiderstand zu $R_p = R - R_v$.

Andererseits erhält man auch den Nebenwiderstand unter Anwendung der Formel (5) zu:

$R_p = \frac{R_g + R_v}{n - 1}$ wobei n der allgemeine Erweiterungsfaktor ist. Durch Gleichsetzung der Ausdrücke für R_p folgt:

$$\frac{R_g + R_v}{n - 1} = R - R_v ;$$

und daraus durch Umformung :

$$R_g + R_v = (R - R_v)(n - 1) = R(n - 1) - R_v(n - 1)$$

$$R_v + R_v(n - 1) = R(n - 1) - R_g$$

$$R_v = \frac{R(n - 1) - R_g}{n}$$

Weiterhin bekommt man aus $R_p + R_v = R$, für R_v die Gleichung $R_v = R - R_p$. Setzt man diesen Ausdruck für R_v in den obigen Gleichungsansatz

$$R_p = \frac{R_g + R_v}{n - 1} \text{ ein, so folgt } R_p = \frac{R_g + R - R_p}{n - 1}$$

und daraus durch Umformung:

$$R_p(n - 1) = R_g + R - R_p$$

$$R_p \cdot n - R_p = R_g + R - R_p$$

$$R_p = \frac{R_g + R}{n} \quad (8)$$

Die Formeln (7) und (8) lassen sich auf jede Meßbereichserweiterung mit einer beliebigen Anzahl von Meßbereichen anwenden. Bei drei Meßbereichen gilt für den Bereich I_2 :

$$n = \frac{I_2}{I_g}, \quad R_v = R_1, \quad R_p = R_2 + R_3$$

Für den Bereich I_3 gilt: $n = \frac{I_3}{I_g}$; $R_v = R_1 + R_2$, $R_p = R_3$

Wir bekommen also R_1 und R_3 , dann ergibt sich R_2 zu :

$$R_2 = R - (R_1 + R_3).$$

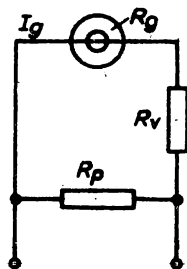


Bild 35 Ersatzschaltbild für Vielfachstrommesser

(7)

Lehrbeispiel 11

Die Berechnung der Erweiterungswiderstände für einen Vielfachstrommesser nach der im Bild 32 angegebenen Schaltung soll erfolgen für ein Drehspulmeßwerk, an dem bei Endaus-
schlag eine Spannung von 20 mV abfällt und dessen Spulen-
widerstand 5 Ohm groß ist. Das Gerät soll die Bereiche
10 mA, 100 mA, 1 A erhalten.

L ö s u n g :

Gegeben sind $U_g = 20 \text{ mV}$ und $R_g = 5 \Omega$, somit

$$I_g = \frac{U_g}{R_g} = \frac{20 \text{ mV}}{5 \Omega} = 4 \text{ mA}$$

$$I_1 = 10 \text{ mA}, \quad I_2 = 100 \text{ mA}, \quad I_3 = 1 \text{ A}$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = R = \frac{I_g \cdot R_g}{I_1 - I_g}$$

$$R = \frac{4 \text{ mA} \cdot 5 \Omega}{10 \text{ mA} - 4 \text{ mA}} = 3,333 \Omega$$

Für Bereich I_2 ist nach dem Ersatzschaltbild (Bild 35)

$$R_v = R_1 \text{ und } n = \frac{I_2}{I_g} = \frac{100 \text{ mA}}{4 \text{ mA}} = 25 ,$$

somit erhält man nach Formel (7) :

$$R_1 = R_v = \frac{3,333 \Omega (25 - 1) - 5 \Omega}{25} = 3 \Omega$$

$$\text{Für Bereich } I_3 \text{ gilt entsprechend } R_p = R_3 \text{ und } n = \frac{I_3}{I_g} = \frac{1000 \text{ mA}}{4 \text{ mA}} = 250$$

$$\text{nach Formel (8): } R_3 = R_p = \frac{5 \Omega + 3,333 \Omega}{250} = 0,033 \Omega$$

$$\text{Man erhält nun } R_2 = 3,333 \Omega - 3 \Omega - 0,033 \Omega = 0,3 \Omega$$

Etwas einfacher wird die Schaltung für Vielfach-Spannungs-
messer (Bild 36). Man braucht nur die Bereichswiderstände
als Vorwiderstände hintereinander zu schalten. Dabei wir-
ken die Widerstände der jeweils kleineren Bereiche für die
nächsthöheren mit. Soll auch hier ein Schalter zur Bereich-

umschaltung verwendet werden, so ist das nicht sehr kritisch, da die Kontaktübergangswiderstände hier vernachlässigbar klein sind gegenüber den wesentlich größeren Vorwiderständen. Bei der Ableitung der Berechnungsgleichungen für die Vorwiderstände gehen wir auch hier wieder - entsprechend Bild 36 - von drei Meßbereichen U_1 , U_2 und U_3 aus. Die Erweiterungsfaktoren für die Meßbereiche sind:

$$n_1 = \frac{U_1}{U_g}, \quad n_2 = \frac{U_2}{U_g}, \quad n_3 = \frac{U_3}{U_g}.$$

Für den Bereich U_1 ist der Vorwiderstand $R_{V_1} = R_1$.

Für den Bereich U_2 ist der gesamte Vorwiderstand $R_{V_2} = R_1 + R_2$.

Für den Bereich U_3 ist der gesamte Vorwiderstand $R_{V_3} = R_1 + R_2 + R_3$.

Daraus erhält man $R_2 = R_{V_2} - R_1$ und

$$R_3 = R_{V_3} - R_2 - R_1.$$

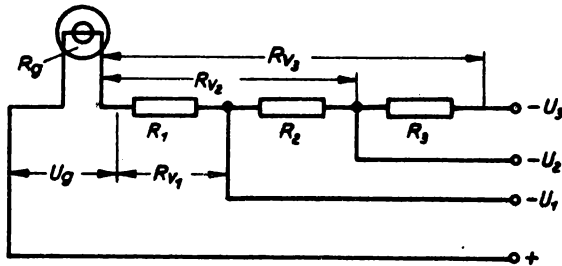


Bild 36 Vielfachspannungsmesser

Nach der Formel (6) ergibt sich für den Bereich U_1 :

$R_{V_1} = R_g(n_1 - 1)$, da $R_{V_1} = R_1$ ist, bekommt man unter Verwendung obigen Ausdrucks für n_1 :

$$R_1 = R_g \left(\frac{U_1}{U_g} - 1 \right) \quad (9)$$

Für den Bereich U_2 ergibt sich entsprechend: $R_{V_2} = R_g(n_2 - 1)$.

Diesen Ausdruck setzt man in die obige Gleichung für R_2 ein.

$R_2 = R_{v_2} - R_1 = R_g (n_2 - 1) - R_1$, setzt man hierin noch für $R_1 = R_g (n_1 - 1)$ ein, so folgt:

$$\begin{aligned} R_2 &= R_g (n_2 - 1) - R_g (n_1 - 1) = R_g (n_2 - 1 - n_1 + 1) \\ &= R_g (n_2 - n_1). \end{aligned}$$

Unter Verwendung der Spannungsquotienten für n_2 und n_1 ist schließlich

$$R_2 = R_g \frac{U_2 - U_1}{U_g} \quad (9a)$$

Für den Bereich U_3 ergibt sich in ähnlicher Weise:

$R_{v_3} = R_g (n_3 - 1)$, dies eingesetzt in

$$R_3 = R_{v_3} - R_2 - R_1 \text{ gibt } R_3 = R_g (n_3 - 1) - R_2 - R_1.$$

Für R_2 wird $R_g (n_2 - n_1)$ und für R_1 wird $R_g (n_1 - 1)$ noch eingesetzt:

$$R_3 = R_g (n_3 - 1) - R_g (n_2 - n_1) - R_g (n_1 - 1). \text{ Das umgeformt:}$$

$$R_3 = R_g (n_3 - 1 - n_2 + n_1 - n_1 + 1) = R_g (n_3 - n_2)$$

Unter Verwendung der Spannungsquotienten für n_3 und n_2 ist letztlich

$$R_3 = R_g \frac{U_3 - U_2}{U_g} \quad (9b)$$

Wie Sie aus den Formeln (9a) und (9b) ersehen, hat der Zähler des Spannungsquotienten eine bestimmte Folge. Hätte das Meßgerät vier Bereiche, dann würde die Formel für R_4 lauten:

$$R_4 = R_g \frac{U_4 - U_3}{U_g}$$

Allgemein formuliert:

$$R_m = R_g \frac{U_m - U_{m-1}}{U_g} \quad \text{für } m = 1, 2, 3 \dots (9c)$$

Hierin ist m die Zahl des Bereiches, wobei eine Schaltung nach Bild 36 vorausgesetzt ist.

Lehrbeispiel 12

Für einen Vielfachspannungsmesser mit den Meßbereichen 1,5 V, 7,5 V und 30 V sind entsprechend der Schaltung

nach Bild 36 die Vorwiderstände zu berechnen. Das Meßwerk hat einen Drehspulwiderstand von 30 Ohm, eine Konstante $k = 5 \cdot 10^{-4}$ V/Skt und eine gleichmäßige Skalenteilung von 0 ... 150 Skalenteilen.

L ö s u n g :

$$U_g = k \cdot \alpha = 5 \cdot 10^{-4} \text{ V/Skt} \cdot 150 \text{ Skt} = 0,075 \text{ V}$$

$$\text{Nach Formel (9) ist } R_1 = 30 \Omega \left(\frac{1,5 \text{ V}}{0,075 \text{ V}} - 1 \right) = 570 \Omega$$

$$\text{und nach Formel (9a) : } R_2 = 30 \Omega \frac{7,5 \text{ V} - 1,5 \text{ V}}{0,075 \text{ V}} = 2400 \Omega$$

$$\text{und weiter nach (9b) : } R_3 = 30 \Omega \frac{30 \text{ V} - 7,5 \text{ V}}{0,075 \text{ V}} = 9000 \Omega$$

Vielleicht ist Ihnen aufgefallen, daß in der Schaltung nach Bild 36 auch beim kleinsten Spannungsbereich immer noch ein Vorwiderstand vor dem Meßwerk liegt. Man kann natürlich auch eine Anschlußklemme mit direktem Anschluß an das Meßwerk anbringen. Das tut man jedoch nur dort, wo dieser kleinste Bereich benötigt wird. Denn wie Sie aus 1.23 wissen, tritt ja durch die Vorwiderstände, die aus Manganin hergestellt sind, eine erwünschte Temperaturfehlerkompensation ein. Bei dem eingangs beschriebenen Vielfach-Strommesser war allerdings der kleinste Bereich nicht temperaturkompensiert und, wie Sie ebenfalls aus 1.23 wissen, ist das besonders ungünstig, wenn temperaturkonstante Widerstände parallel zum Meßwerk liegen. Deshalb schaltet man - sobald es den Umständen nach möglich ist - häufig noch einen temperaturkonstanten Widerstand unmittelbar vor das Meßwerk. Bei der Berechnung der Nebenwiderstände ist dann dieser zusätzliche Vorwiderstand zu R_g hinzuzuzählen und mit zu berücksichtigen. Sie werden vielleicht Bedenken äußern über den erhöhten Eigenverbrauch, den diese Widerstände mit sich bringen. In den weitaus meisten Fällen läßt sich dieser zusätzliche Leistungsbedarf ertragen, da das Drehspulmeßwerk den Vorteil sehr kleinen Eigenverbrauchs hat und somit der Gesamtverbrauch eines erweiterten Drehspulmeß-

gerätes immer noch recht klein bleibt.

Man kann auch einem Meßwerk mehrere Strom- und Spannungsbereiche zuordnen. Der kleinste Strommeßbereich ist dann zugleich der kleinstmögliche Spannungsbereich. Allerdings muß man bei den Spannungsbereichen den durch die Nebenwiderstände erhöhten Leistungsbedarf in Kauf nehmen. Die Schaltung eines solchen Gerätes, bei dem auch der kleinste Strommeßbereich eine Temperaturfehlerkompensation durch den Widerstand R_T besitzt, ist in Bild 37 wiedergegeben.

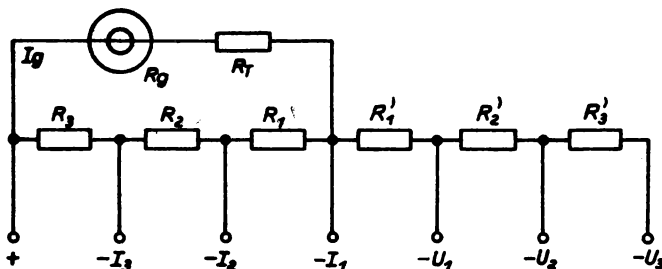


Bild 37 Vielfach-Strom-Spannungsmesser

A n t w o r t e n u n d L ö s u n g e n

=====

1. Das durch die Meßgröße erzeugte Drehmoment wird durch das entgegengerichtete Moment einer Feder gemessen. Bei Gleichgewicht steht der Zeiger auf dem durch Eichung erhaltenen Meßwert der Skala.
2. Das Meßwerk besteht aus den Teilen, die zur Erzeugung der Drehmomente nötig sind. Als Meßinstrument bezeichnet man das vollständige Gerät mit Gehäuse, Klemmen Widerständen usw. In einem Meßinstrument können mehrere Meßwerke sein.

3. Spitzen- oder Zapfenlagerung, Faden- oder Bandaufhängung Spannbandaufhängung.
4. Bei Spitzen- und Zapfenlagerung durch Spiralfedern, bei Band- oder Spannbandaufhängung durch die Verdrehung (Torsion) der Bänder.
5. Um die Zeigerschwingungen zu unterdrücken.
6. Die Dämpfung ist so bemessen, daß sich der Zeiger ohne Überschwingung in der kürzest möglichen Zeit auf den Meßwert einstellt.
7. Die Skala beginnt statt mit dem Wert Null mit einem Zwischenwert.
8. Die Einheit der Meßgröße, System und Güteklasse, Stromart und Frequenz, Gebrauchslage, Prüfspannung, evt.Meßwandlerübersetzung und Anzahl der Meßwerke.
9. Runde Form für Aufbau und Einbau, quadratische Form, Rund- und Flachprofilgeräte für Einbau.
Lanzenzeiger und Balkenzeiger mit Messerspitze.
10. Der Anzeigefehler ist die höchstzulässige Abweichung der Anzeige vom wahren Wert der Meßgröße. Er wird in Prozentsen des Meßbereichendwertes angegeben.
11. Der Hersteller sichert damit zu, daß der Anzeigefehler innerhalb der Grenzen $\pm 0,5\%$ vom Meßbereichendwert bleibt, wenn die bei der Eichung herrschenden Verhältnisse (Temperatur, Frequenz, Kurvenform, Fremdfeld, Eichlage) eingehalten werden.
12. Empfindlichkeit ist die Zeigerausschlagänderung in Abhängigkeit von der Meßwertänderung. Ein Meßinstrument ist also dann empfindlich, wenn es gegenüber einem anderen gleichartigen Gerät bei gegebener Meßwertänderung den größeren Zeigerausschlag hervorruft.
13. Ein Fremdfeld (Erdfeld, Streufelder von Maschinen und Apparaten) durchsetzt das Meßwerk und überlagert sich dem vom Meßstrom erzeugten Feld, indem es dieses

schwächt oder verstärkt.

14. Hohe Permeabilität ermöglicht geringe Wandstärke mit Rücksicht auf Preis und Gewicht; eine kleine Remanenz verhindert die merkbare Bildung von Magnetpolen im Abschirmpanzer.
15. Mittel aus zwei Ablesungen, davon eine mit vertauschten Anschlüssen.
16. $\alpha_g \cdot R_g = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/grd} \cdot 15 \Omega + 1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/grd} \cdot 75 \Omega$
 $= 0,06925 \text{ /grad.}$
Bei 10 grad Erwärmung ist $\Delta R_g = 0,06925 \Omega / \text{grad} \cdot 10 \text{ grad}$
 $= 0,6925 \Omega$
 $\hat{=} \frac{0,6925 \cdot 100}{15 + 75} = 0,77\%$

Quellenverzeichnis der Bilder

- Friedrich Weickert: Hochspannungsanlagen, 7.Aufl.
Fachbuchverlag Leipzig 1951:
Bild 6, 7, 8, 9, 10, 11, 21
- Walter Nell: Handbuch der Elektrotechnik,
II.Band, 2.Aufl.
Fachbuchverlag Leipzig 1951:
Bild 12
- Wilhelm Friedrich: Tabellenbuch für die Elektrotechnik,
Ausgabe C,
Fachbuchverlag Leipzig 1952,
Tafel 1
- Werkfoto VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt: Bild 33

Meßgeräte nach VDE 0410

Nr.	Schaltzeichen	Benennung	Nr.	Schaltzeichen	Benennung																											
1		Drehspulmeßgerät. Feststehender Dauer-Magnet, Spule, durch Strom magnetisch abgelenkt. Drehmagnetmeßgerät, 1 oder mehr feste Spulen, mindestens 1 Magnet.	21		Gleichstrom																											
2		Drehpul-Quotientenmesser. Feststehender Magnet, mehrere ablenkbare Spulen. (Ohne Richtkraft.)	22		Wechselstrom																											
3		Dreheisenmeßgerät. Strom in feststehender Spule bewegt Eisenstück.	23		Gleich- und Wechselstrom (Allstrom)																											
4		Dreheisen-Quotientenmesser. Strom in mehreren feststehenden Spulen bewegt Eisenstück.	24		Drehstrom Meßgerät m. 1 Meßwerk																											
5		Elektrodynamisches Meßgerät (eisenlos). Elektrodynamisch abgelenkte Spulen.	25		" " 2 Meßwerken																											
5a		Desgl. (eisengeschlossen). Eisen steigert Drehmoment.	26		" " 3 " "																											
6		Elektrodynamischer Quotientenmesser (eisenlos). Elektrodynamisch abgelenkte Spulen.	27		senkrechte Gebrauchslage																											
6a		Desgl. (eisengeschlossen).	28		waagerechte " "																											
7		Induktionsmeßgerät. Drehfeldmeßwerk mit 1 feststehenden und 1 beweglichen Stromleiter (Scheiben oder Trommeln).	29		schräge " "																											
8		Induktions-Quotientenmesser. Wie Nr. 7, jedoch mit mehreren Stromleitern.	30		Desgl. mit Neigungswinkelangabe																											
9		Heizdrahtmeßgerät. Zeigerbewegung durch Erwärmung (Verlängerung) des Leiters.	31		Nulleneinstellung																											
10		Elektrostatisches Meßgerät. Zwischen ungleichmäßigen Platten wirken anziehende Kräfte.	32		Prüfspannungszeichen schwarz umrandeter Stern																											
11		Vibrationsmeßgerät. Schwingungsfähige Anzeigesysteme (Anziehung oder Abstoßung).	<table><tr><th>Sternzeichen</th><th>Betriebsspannung Ub oder Stromkreisspannung</th><th>Prüfspannung Up</th></tr><tr><td>ohne Ziffer</td><td>bis 40 V</td><td>500 V</td></tr><tr><td>mit " 2</td><td>über 40 " 650 V</td><td>2 000 V</td></tr><tr><td>" " 5</td><td>" 650 " 1 500 V</td><td>5 000 V</td></tr><tr><td>" " 10</td><td>" 1 500 " 3 000 V</td><td>10 000 V</td></tr><tr><td>" " 20</td><td>" 3 000 " 6 000 V</td><td>20 000 V</td></tr><tr><td>" " 30</td><td>" 6 000 " 10 000 V</td><td>30 000 V</td></tr><tr><td>" " 50</td><td>" 10 000 " 15 000 V</td><td>50 000 V</td></tr><tr><td>Up in kV</td><td>" 15 000</td><td>2,2 Ub + 20 000 V</td></tr></table>			Sternzeichen	Betriebsspannung Ub oder Stromkreisspannung	Prüfspannung Up	ohne Ziffer	bis 40 V	500 V	mit " 2	über 40 " 650 V	2 000 V	" " 5	" 650 " 1 500 V	5 000 V	" " 10	" 1 500 " 3 000 V	10 000 V	" " 20	" 3 000 " 6 000 V	20 000 V	" " 30	" 6 000 " 10 000 V	30 000 V	" " 50	" 10 000 " 15 000 V	50 000 V	Up in kV	" 15 000	2,2 Ub + 20 000 V
Sternzeichen	Betriebsspannung Ub oder Stromkreisspannung	Prüfspannung Up																														
ohne Ziffer	bis 40 V	500 V																														
mit " 2	über 40 " 650 V	2 000 V																														
" " 5	" 650 " 1 500 V	5 000 V																														
" " 10	" 1 500 " 3 000 V	10 000 V																														
" " 20	" 3 000 " 6 000 V	20 000 V																														
" " 30	" 6 000 " 10 000 V	30 000 V																														
" " 50	" 10 000 " 15 000 V	50 000 V																														
Up in kV	" 15 000	2,2 Ub + 20 000 V																														
12		Thermoumformer. Thermoelemente liefern eine Urspannung.	<table><tr><th>mit Ziffer 2</th><th>Meßgeräte zum Anschluß an Stromwandler</th><th>2 000</th></tr></table>			mit Ziffer 2	Meßgeräte zum Anschluß an Stromwandler	2 000																								
mit Ziffer 2	Meßgeräte zum Anschluß an Stromwandler	2 000																														
13		Desgl. mit Drehspulmeßgerät. Thermoelemente mit Nr. 1.	<table><tr><th colspan="2">Klasseneinteilung</th><th colspan="2">Zulässige Anzeigefehler der Meßgeräte bei 20° C Raumtemperatur</th></tr><tr><th>Arten der Geräte</th><th>Klassenzeichen</th><th></th><th></th></tr><tr><td rowspan="3">Feinmeßgeräte</td><td>0,1</td><td>± 0,1</td><td rowspan="3">% vom Meßbereich-Endwert</td></tr><tr><td>0,2</td><td>± 0,2</td></tr><tr><td>0,5</td><td>± 0,5</td></tr><tr><td rowspan="3">Betriebsmeßgeräte</td><td>1,0</td><td>± 1,0</td><td rowspan="3"></td></tr><tr><td>1,5</td><td>± 1,5</td></tr><tr><td>2,5</td><td>± 2,5</td></tr></table>			Klasseneinteilung		Zulässige Anzeigefehler der Meßgeräte bei 20° C Raumtemperatur		Arten der Geräte	Klassenzeichen			Feinmeßgeräte	0,1	± 0,1	% vom Meßbereich-Endwert	0,2	± 0,2	0,5	± 0,5	Betriebsmeßgeräte	1,0	± 1,0		1,5	± 1,5	2,5	± 2,5			
Klasseneinteilung		Zulässige Anzeigefehler der Meßgeräte bei 20° C Raumtemperatur																														
Arten der Geräte	Klassenzeichen																															
Feinmeßgeräte	0,1	± 0,1	% vom Meßbereich-Endwert																													
	0,2	± 0,2																														
	0,5	± 0,5																														
Betriebsmeßgeräte	1,0	± 1,0																														
	1,5	± 1,5																														
	2,5	± 2,5																														
14		Isolierter Thermoumformer. Wie Nr. 12, jedoch mittelbare Erwärmung.	<p>Die gleichen Abweichungen in % sind zulässig bei:</p> <ol style="list-style-type: none">1. Leistungsmessern mit Phasenverschiebung 90°2. Änderung der Raum-(Bezugs-)temperatur um ± 10 grad3. " " Frequenz um ± 10 % der Nennfrequenz4. " " Spannung bei Leistungszeiger um ± 20 % der Nennspannung. <p>Vorstehende Fehlergrenzen gelten für Meßgeräte einschl. der zugehörigen Neben- und Vorwiderstände. — Getrennt gelieferte Widerstände sollen nachstehend angegebenen Genauigkeitsklassen angehören.</p>																													
15		Desgl. mit Drehspulmeßgerät. Wie Nr. 13, mittelbare Erwärmung.	<table><tr><th colspan="2">Fehlergrenzen getrennt gelieferter Widerstände</th></tr><tr><th>Neben- u. Vorwiderstandsklasse</th><th>Abweichung vom Nennwert bzw. Belastungswert zwischen + 10° u. 30° C</th></tr><tr><td>0,05; 0,1; 0,2; 0,5</td><td>± 0,05; ± 0,1; ± 0,2; ± 0,5 % v. Nennw.</td></tr></table>			Fehlergrenzen getrennt gelieferter Widerstände		Neben- u. Vorwiderstandsklasse	Abweichung vom Nennwert bzw. Belastungswert zwischen + 10° u. 30° C	0,05; 0,1; 0,2; 0,5	± 0,05; ± 0,1; ± 0,2; ± 0,5 % v. Nennw.																					
Fehlergrenzen getrennt gelieferter Widerstände																																
Neben- u. Vorwiderstandsklasse	Abweichung vom Nennwert bzw. Belastungswert zwischen + 10° u. 30° C																															
0,05; 0,1; 0,2; 0,5	± 0,05; ± 0,1; ± 0,2; ± 0,5 % v. Nennw.																															
16		Gleichrichter. Zu messender Wechselstrom in Gleichstrom umgeformt.	<p>Fehlergrenzen getrennt gelieferter Widerstände</p> <table><tr><th>Neben- u. Vorwiderstandsklasse</th><th>Abweichung vom Nennwert bzw. Belastungswert zwischen + 10° u. 30° C</th></tr><tr><td>0,05; 0,1; 0,2; 0,5</td><td>± 0,05; ± 0,1; ± 0,2; ± 0,5 % v. Nennw.</td></tr></table>			Neben- u. Vorwiderstandsklasse	Abweichung vom Nennwert bzw. Belastungswert zwischen + 10° u. 30° C	0,05; 0,1; 0,2; 0,5	± 0,05; ± 0,1; ± 0,2; ± 0,5 % v. Nennw.																							
Neben- u. Vorwiderstandsklasse	Abweichung vom Nennwert bzw. Belastungswert zwischen + 10° u. 30° C																															
0,05; 0,1; 0,2; 0,5	± 0,05; ± 0,1; ± 0,2; ± 0,5 % v. Nennw.																															
17		Desgl. mit Drehspulmeßgerät. Nr. 16 mit Nr. 1.	<p>Beispiel für einen Leistungszeiger: Senkrechte Lage; Betriebsmeßgerät Kl. 1,5; Drehstrom 50 Hz mit 2 Meßwerken; Prüfspannung 2000 V für Spannungswandler 6000/100 V und Stromwandler 10/5 A.</p>																													
18		Eisennadelmeßwerk.																														
19		Drehmagnetmeßwerk.																														
20		Eisenschirm für Meßgeräte. Abschirmung von Fremdfeldern. Eisenblechgehäuse gilt nicht als Abschirmung.																														

B e i l a g e

zu Lehrbrief 1 "Meßtechnik für Elektrotechniker"

Auf Grund der noch nicht abgeschlossenen Überarbeitung
der Lehrbriefreihe

"Meßtechnik für Elektrotechniker"

gelangt diese im Jahre 1960 wie folgt zum Einsatz:

Lehrbriefe 1, 2, 3	neu
Lehrbriefe 3, 4	alt
Lehrbriefe 5, 6	neu.

INGENIEUR.
FERNSTUDIUM

5016-02/60

SCHRÖDER/GRAFE

**MESSTECHNIK
FÜR
ELEKTROTECHNIKER**

2

HERAUSGEBER
ZENTRALABTEILUNG FACHSCHULFERN-
UND ABENDSTUDIUM DES
MASCHINENBAUES DRESDEN

Herausgeber:
Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues Dresden

Meßtechnik für Elektrotechniker

Lehrbrief 2

5. überarbeitete Auflage

von

Dipl.- Ing. Walter Schröder

überarbeitet von

Ing. Hermann Grafe

1960

Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues, Dresden

Bestell-Nr. 5016 – 02/60

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Ag 616/ 87 /60

Inhaltsverzeichnis

Seite

2 Die Meßwerke

2.0 Drehspulmeßgerät (Fortsetzung)

2.03 Sonderbauarten 1

2.04 Drehspulgeräte zur Messung von Wechsel-
strom 9

2.1 Drehmagnetmeßgerät 34

2.11 Nadelgalvanometer 34

2.12 Drehmagnetgerät 34

2.2 Kreuzspul-Meßgerät (Quotientenmesser) 39

2.21 Aufbau und Wirkungsweise 39

2.22 Die Anwendung 43

2.3 Dreheisen-Meßwerk 45

2.31 Aufbau und Wirkungsweise 45

2.32 Eigenschaften der Dreheisengeräte und
ihre Fehlergrößen 49

2.33 Meßbereicherweiterung 54

Antworten und Lösungen 64

Quellenverzeichnis der Bilder 68

Tafel 1 siehe Lehrbrief 1

2 Die Meßwerke

2.0 Drehspulmeßgerät (Fortsetzung)

2.03 Sonderbauarten

=====

2.031 Spiegelgalvanometer

Unter einem Galvanometer allgemein versteht man ein hochempfindliches Meßwerk zur Anzeige kleinster Ströme. Es gibt also auch Wechselstromgalvanometer, In diesem Kapitel beschäftigen wir uns mit dem Drehspulgerät, das grundsätzlich die Hauptteile dieses Systems hat. Sie erinnern sich: Drehspule im Feld eines Dauermagneten, Polkern aus Weicheisen, Lagerung, eine Federkraft zur Erzeugung des Gegenmoments, Dämpfung. Bei besonders sorgfältiger Ausführung mit feiner Spitzenlagerung, Messerzeiger und spiegelunterlegter Skala mit Strichteilung bezeichnet man Geräte der bisher beschriebenen Bauart als Zeigergalvanometer, um ihre elektrische Empfindlichkeit zu kennzeichnen. In Brückenschaltungen (z.B. Wheatstone-Brücke) wird dieses Gerät als Nullinstrument häufig angewendet. Bei dem Spiegelgalvanometer ist der körperliche Zeiger durch ein kleines Spiegelchen ersetzt, das sich mit der Drehspule um ihre Mittellinie dreht und einen Lichtstrahl reflektiert. Im Schema Bild 1 sind Magnet und Polkern weggelassen. Die frei (ohne Rähmchen) gewickelte Spule 1 hängt an dem dünnen Band 2 aus Phosphorbronze, Platinnickel oder auch Quarz. Mit dem Torsionsknopf 3 kann der Nullpunkt justiert werden. Durch die Verdrehung des Bandes entsteht die Richtkraft. Die Stromzuführung zur Spule geschieht durch dünne, praktisch richtkraftlose Goldbändchen. Ein von der Projektionslampe 5 mit Optik erzeugter Lichtstrahl mit Strichmarke wird von dem Spiegelchen 4 auf die Skala 6 geworfen, die auf die Wand gemalt oder von einem Stativ getragen wird. Das Gewicht des beweglichen Organs ist zwar gering, belastet aber das dünne Band erheblich. Beim Transport muß daher die Spule mit dem Arretierungshebel 7 angehoben werden, wodurch die Spule an die untere Fläche

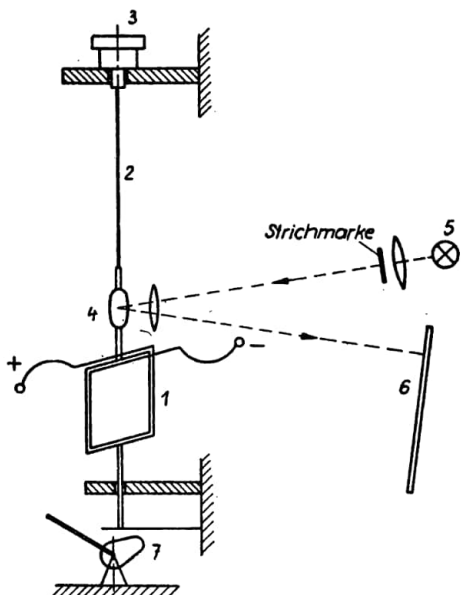


Bild 1 Schema eines Spiegelgalvanometers

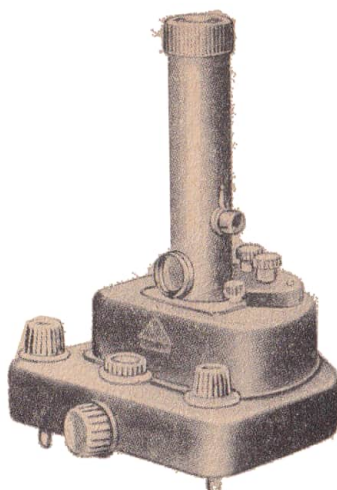


Bild 2 Spiegelgalvanometer mit frei hängender Spule

des Polkerns gedrückt wird und das Band entlastet. Das Gehäuse hat verstellbare Füße und eine Wasserwaage (Libelle), weil das hängende System frei zwischen den Polschuhen spielen muß (Bild 2). Dieses System ist das empfindlichste, nicht nur mechanisch, sondern auch elektrisch. Die Empfindlichkeit steigt mit der Länge des Zeigers, und den gewichtslosen Lichtzeiger könnten Sie theoretisch unbeschränkt verlängern, indem Sie mit der Skala weiter weggehen, solange der Lichtfleck noch zu sehen ist. Ferner kann man die Empfindlichkeit durch kleinere Richtkraft steigern, wenn man das Aufhängeband oder den Aufhängefaden länger und dünner macht. Nun können Sie sich aber vorstellen, wie die geringste Erschütterung des kleinen Spiegels den Lichtfleck auf der Skala um so mehr tanzen läßt, je entfernter die Skala ist, und daß sich die Einflüsse der elastischen Nachwirkung und der Temperatur beim Aufhängeband um so mehr bemerkbar machen, je schwächer dieses ist. Wenn Sie genau messen wollen, dann muß zuerst einmal der Nullpunkt stillstehen. Selbst wenn man

2

das Galvanometer durch besonderen Aufwand vollkommen erschütterungsfrei aufstellen würde, gibt es doch eine Grenze der Empfindlichkeit durch die sogenannte Brownsche Molekularbewegung. Die in dauernder unregelmäßiger Bewegung befindlichen Luftmoleküle stoßen an die Spule und den Spiegel, der dadurch erschüttert wird, so daß eine sichere Ablesung nicht möglich ist.

Die oben beschriebene Anzeige durch einen Lichtfleck mit Strichmarke hat den Vorteil, daß mehrere Beobachter ablesen können. Setzen Sie an die Stelle der Projektionslampe mit ihrer Optik und Strichmarke ein Fernrohr mit einem feinen, senkrechten Faden im Brennpunkt des Okulars, so sehen Sie durch das Fernrohr im Spiegelchen 4 einen kreisförmigen Teil der Skalenteilung mit der Fadenmarke als Durchmesser. Die Zahlen der Skala malt man dann auf dem Kopf stehend, damit man sie im Fernrohr aufrecht sieht. Bei der Drehung des Spiegels wandern die Skalenteile an Ihrem Auge vorbei; bei Stillstand ermöglicht der feine Faden genaue Ablesung. Sie wissen übrigens: Wenn sich der Spiegel um den Winkel α dreht, so ist der Ausschlag des Lichtstrahls 2α . Dasselbe gilt natürlich für den "Blickstrahl" aus ihrem Auge.

Die Entfernung zwischen Skala und Gerät ist normalerweise 1 ... 2m. Im Labor, Eichraum und Prüffeld ist diese Apparatur auf Meßplätzen meist festeingebaut. Man hat gern, am Meßtisch sitzend, die Skala vor sich in Augenhöhe. Das Galvanometer wird zweckmäßig darüber in 1 ... 2 m Höhe erschütterungsfrei auf eine Konsole an der Wand aufgestellt und der Lichtstrahl mittels Prismen und Spiegel auf die Skala gelenkt. Solche Ablesevorrichtungen werden von den Herstellern der Instrumente geliefert.

Ist Ihnen bei der Erklärung zu Bild 1 aufgefallen, daß die Drehspule nicht auf das sonst übliche Alu-Rähmchen gewickelt ist? Braucht man denn beim Galvanometer keine Dämpfung?

Ein Dämpfungsrahmen würde als eine Kurzschlußwindung erstens

bei den hier auftretenden kleinen Drehmomenten zu stark bremsen, zweitens durch sein Gewicht die Aufhängung unliebsam belasten und drittens durch seine Masse bei verhältnismäßig großem Trägheitsradius ein zusätzliches Trägheitsmoment liefern. Mathematische Ableitungen führen hier zu weit. Die Schwingungsdauer des beweglichen Organs nimmt zu, wenn das Trägheitsmoment größer wird. Man benötigt aber eine kurze Einstellzeit, um schnell ablesen zu können. So wird mit der Spulenwicklung selbst gedämpft, wie in 1.13 beschrieben. Sobald sich die Spule im Magnetfeld dreht, wird in ihr unabhängig vom Meßstrom eine Induktionsspannung erzeugt, die über den Widerstand der Meßanordnung (= Außenwiderstand), an den das Galvanometer angeschlossen ist, einen Induktionsstrom zur Folge hat. Dieser bewirkt nach den Gesetzen der Elektrodynamik eine Bremsung und damit eine Dämpfung. Die Größe des Außenwiderstandes bestimmt also die Größe der Dämpfung. Ist der Widerstand klein, wird die Dämpfung groß, ist er groß, so ist die Dämpfung gering. Zwischen den beiden Extremen der sehr großen und sehr geringen Dämpfung gibt es einen Wert des Außenwiderstandes, bei dem das Galvanometer gerade aperiodisch gedämpft ist (vgl. 1.13). Diesen Wert nennt man den "Äußeren Grenzwiderstand". Der Grenzwiderstand wird vom Hersteller angegeben.

Mit einem einzigen Galvanometer kommt man nicht für alle Zwecke aus, die Spulenwicklung muß angepaßt sein. Für kleine Ströme braucht man viele Windungen dünnen Drahtes, was Sie aus der Drehmomentenformel ablesen können:

Wenn I klein ist, muß w groß werden, das ergibt eine Spule mit großem Widerstand. Andererseits braucht man zur Messung kleiner Spannungen eine Spule mit kleinem Widerstand, also wenigen Windungen von größerem Querschnitt, damit der Strom groß genug wird. Es gibt auch Instrumente mit zwei Wicklungen auf der Spule, eine ist hochohmig und die andere niederohmig wie bei einem Gerät mit Bandaufhängung, dessen Daten als Beispiel in Tafel 2 verzeichnet sind. Warum sind dort aber für jede Spule zwei äußere Grenzwiderstände angegeben,

bei denen der Ausschlag aperiodisch wird, so daß damit die kürzeste Einstellzeit von 7 s erreicht wird? Das Gerät hat einen verstellbaren magnetischen Nebenschluß, mit dem man das wirksame Feld schwächen kann, wie Sie bereits wissen. Der obere der beiden Tabellenwerte gilt für das stärkste, der untere für das schwächste Feld, dementsprechend ist auch die Empfindlichkeit verschieden.

T a f e l 2

Elektrische Daten eines Spiegelgalvanometers

T [s]	R _i [Ω]	R _a [Ω]	C _I [nA/mm/m]	C _U [μV/mm/m]	T = Einstellzeit im aperiodischen Grenzfall
7	600	55 000	0,09	5	R _i = Meßwerkwiderstand R _a = Grenzwiderstand
	-	2 900	0,36	1,25	
	10	167	1,7	0,3	
	-	2	6,3	0,08	

C_I = Stromkonstante in nA (10⁻⁹A) für 1mm Ausschlag bei 1 m Skalenabstand

C_U = Spannungskonstante in μV (10⁻⁶V) für 1mm Ausschlag bei 1m Skalenabstand

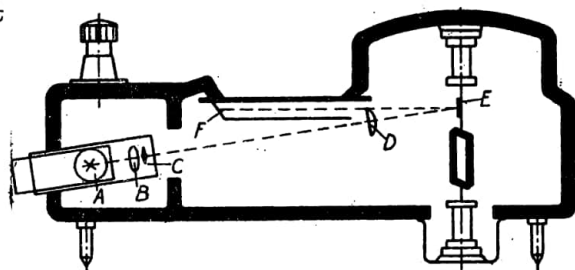
Sie können nun leicht überlegen: Wenn weniger Kraftlinien durch die Spule gehen, so wird die bei der Drehung induzierte Spannung kleiner, somit auch der bremsende Strom. Wollen Sie daher dieselbe Dämpfung wie bei einem starken Feld haben, dann müssen Sie den Widerstand des äußeren Stromkreises verkleinern, damit wieder der frühere Bremsstrom fließt. Mit Hilfe des magnetischen Nebenschlusses haben Sie also die Möglichkeit der aperiodischen Dämpfung bei allen Außenwiderständen in dem für diese angegebenen Bereich. In jedem Fall ist eine Messung der Strom- bzw. Spannungskonstante erforderlich.

2.032 Das Lichtmarkengalvanometer

Als Lichtmarkengalvanometer wird ein Spiegelgalvanometer

bezeichnet, bei dem Meßwerk, Skala, Optik und Projektionslampe in einem handlichen Preßstoffgehäuse untergebracht sind und das wie andere tragbare Geräte schnell einsatzfähig ist. Die Spannbandaufhängung der Drehspule macht die Libelle zur genau waagerechten Aufstellung wie auch eine Arretiervorrichtung entbehrlich. Es wird natürlich nicht die Empfindlichkeit der normalen Spiegelgalvanometer erreicht. Bild 3 zeigt

die Schnittskizze mit dem Strahlengang. Die von einer Batterie oder einem Klingeltrafo gespeiste Lampe A (4 V) im verstellbaren Tubus zur Scharfeinstellung projiziert das Schattenbild der Zeigermarke C mittels der Optik B



- | | |
|-------------------------|---|
| A Glühlampe | D plankonvexe Linse |
| B bikonvexe Sammellinse | E Planspiegel am Meßorgan |
| C feststehender Zeiger | F auf die Skala projiziertes Zeigerbild |

Bild 3 Strahlengang in einem Lichtmarkengalvanometer

und D über den Drehspiegel E auf die Skala F. Deren Krümmung hat als Radius die Länge des Lichtstrahls vom Spiegel zur Skala, so daß der Zeigerschatten überall scharf ist. Bild 4 ist das Skalenbild mit der Lichtmarke, die eine parallaxefreie Ablesung ermöglicht. Die Erkennbarkeit im Dunkeln ist vorteilhaft.

Wie jedes Galvanometer hat auch dieses kein Spulenrähmchen zur Dämpfung; diese wird durch den Widerstand des äußeren Stromkreises bewirkt, wie Sie bei der Besprechung des Spiegelgalvanometers erfahren haben. Auch hier werden Geräte mit verschiedenem Spulenwiderstand hergestellt, je nach dem Verwendungszweck auch mit geeichten Skalen in μ A bzw. mV (kleinster Meßbereich $1\mu A$ bzw. 1 mV bei 100 Skalen-

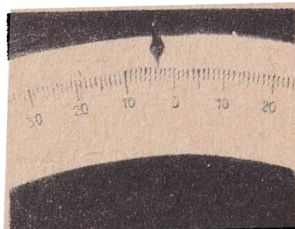


Bild 4 Skalenbild eines Lichtmarkengalvanometers

teilen, Anzeigefehler $\leq \pm 0,75\%$). Die Einstellzeit bei aperiodischem Ausschlag liegt bei diesen Galvanometern zwischen 1,5 und 3 s.

2.033 Ballistisches Galvanometer, Kriechgalvanometer

Diese Bezeichnung kennzeichnet Instrumente, mit denen Sie im Gegensatz zu den vorher besprochenen einen Strom- bzw. Spannungstoß messen können. Wenn Sie z.B. einen geladenen Kondensator kurzschließen, so tritt die Entladung bekanntlich stoßartig auf. Entladen Sie den Kondensator über die Drehspule, so wird diese bei nicht zu hohem Ohmwert praktisch stoßartig in Bewegung gesetzt. Daher das Beiwort "ballistisch". Ballistik ist die Lehre von der Bewegung freifliegender Körper.

Das ballistische Galvanometer hat fast denselben Aufbau wie das normale Gerät. Der Unterschied ist, daß das Trägheitsmoment des beweglichen Organs durch eine Zusatzmasse vergrößert wird (Bild 5), wofür es verschiedene Konstruktionen gibt. Dadurch wird die Schwingungsdauer wesentlich verlängert. Die Zeiten für den Ausschlag im aperiodischen Grenzzustand liegen etwa zwischen 3,5 und 10 s. Das ist nötig, denn der Ausschlag ist nur dann ein Maß für die Elektrizitätsmenge in Amperesekunden oder Coulomb, die während des Stromstoßes durch die Spule geflossen ist, wenn die Dauer dieses Stromstoßes kurz ist gegen die Schwingungsdauer des beweglichen Organs. Das ergibt sich aus der mathematischen Berechnung, die hier nicht behandelt werden soll.

Sie messen also die Elektrizitätsmenge $I \cdot t$ und beobachten auf der Skala den Nullpunkt und den ersten Umkehrpunkt der Schwingung; der Ausschlag braucht nämlich nicht aperiodisch zu sein. Allerdings wird die genaue Ablesung erleichtert, wenn Sie die

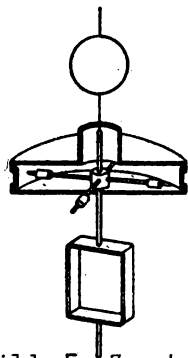


Bild 5 Zusatzmasse eines ballistischen Galvanometers

Dämpfung bis zum aperiodischen Grenzzustand erhöhen. Zur Eichung können Sie einen Kondensator mit der bekannten Kapazität C durch Anlegen an die Gleichspannung U aufladen und über das Galvanometer entladen. Der Ausschlag entspricht dann der Elektrizitätsmenge

$$Q = C \cdot U$$

Die Dämpfung verändern Sie durch einen Parallelwiderstand zur Spule.

Es gibt übrigens auch normale Galvanometer, die durch Auflegen der Zusatzmasse von Hand oder durch Umlegen eines Hebels zu einem ballistischen gemacht werden.

Das Kriechgalvanometer arbeitet auch ballistisch und ist eine Abart des vorbeschriebenen Geräts insofern, als Trägheitsmoment und Richtkraft sehr klein gehalten werden, während die Dämpfung sehr groß (kriechend) gemacht wird. Man verwendet es insbesondere für Messungen von magnetischen Feldern (induzierter Spannungsstoß in einer Prüfspule) als Flußmesser oder Fluxmeter. Hier wird Spitzenlagerung verwendet.

Da Trägheitsmoment und Richtkraft klein sind, bewirkt ein Stromstoß einen Ausschlag, der im Gegensatz zum ballistischen Galvanometer im Bruchteil einer Sekunde die Endlage erreicht und dann wegen der starken Dämpfung bei schwacher Richtkraft kriechend zurückgeht, daher der eigentlich nicht passend gewählte Name. Das Zurückkriechen des Zeigers stört, wenn Sie viele Messungen hintereinander machen müssen. Sie können dann die Spule schnell durch Gegenstrom aus einer Batterie zurückdrehen. Der Unterschied in der Messung gegenüber dem ballistischen Galvanometer ist der, daß der Stromstoß andauern darf, während sich die Spule schon dreht.

Zusammenfassung

=====

Drehspulmeßgeräte werden in der Elektrotechnik weitaus am häufigsten angewendet, da sie wegen ihres geringen Eigenverbrauchs vielseitig verwendbar sind. Bis auf wenige Sonderfälle haben die Drehspulmeßwerke einen konstanten Luftspalt und dadurch eine gleichmäßig geteilte Skala. Der Ausschlag ist dem Meßstrom proportional. Bei Kernmagnetmeßwerken ist durch entsprechende Formgebung ebenfalls eine linear geteilte Skala zu erreichen.

Drehspulgeräte besitzen eine gewisse Robustheit gegen Überlastungen und können mit einer hohen Empfindlichkeit zum Messen sehr kleiner Ströme (z.B. Galvanometer) ausgestattet werden. Durch Vor- und Nebenwiderstände kann man in weiten Grenzen eine Meßbereicherweiterung sowohl für Strom- als auch Spannungsbereiche vornehmen.

Das ballistische Galvanometer ist zur Messung von Strom- bzw. Spannungsschößen geeignet, während das Kriechgalvanometer die Elektrizitätsmenge eines längere Zeit dauernden Stromflusses messen kann.

2.04 Drehspulgeräte zur Messung von Wechselstrom

=====

2.041 Drehspulgeräte mit Trockengleichrichter

Drehspulmeßwerke in der bisher besprochenen Form eignen sich nur zur Messung von Gleichstrom bzw. Gleichspannung. Betrachten wir einmal ein Drehspulgerät, das seinen Nullpunkt in der Skalenmitte hat, wenn es von einem sehr langsam verlaufenden Wechselstrom durchflossen wird. Die Dauer einer Periode sei so bemessen, daß der Zeiger dem sich ändernden Strom folgen kann. Was beobachten Sie? Der Zeiger wird abwechselnd einmal nach links und einmal nach rechts ausschlagen entsprechend dem Stromverlauf. Lassen wir nun den Strom schneller seine Größe und Richtung wechseln, d.h.

erhöhen wir die Frequenz, so wird sehr bald der Zeiger infolge der Trägheit des beweglichen Systems im Gerät dem Wechsel nicht mehr folgen können. Er wird bei ständiger Erhöhung der Frequenz mit immer kleiner werdenden Ausschlägen um den Nullpunkt schwingen und wird schließlich auf dem Nullpunkt zur Ruhe kommen. Bei der üblichen Netzfrequenz von 50 Hz wird bei den meisten Drehspulgeräten keinerlei Schwingen oder Vibrieren der Zeiger mehr festzustellen sein. Der Zeigerausschlag ist also gleich Null. Das ist aber der arithmetische Mittelwert des Wechselstromes über jeweils eine ganze Periode.

Unter Verwendung von Trockengleichrichtern kann man Drehspulgeräte auch zur Messung von Wechselstrom benutzen. Vor allem eignet sich der Kupferoxydul-Gleichrichter (Bild 6) für Meßzwecke. Dieser besteht aus einer Kupferplatte, die durch Erhitzen eine Cu_2O - Schicht erhalten hat und einer gegen diese Schicht gedrückten Metallplatte als Abnahmeelektrode. Die nur einige μ starke Grenzschicht zwischen Cu und Cu_2O bewirkt die

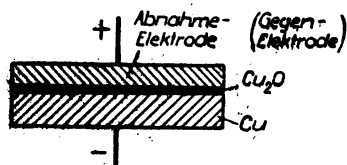


Bild 6 Kupferoxydul-Gleichrichter

Gleichrichterwirkung. Sie läßt die Elektronen wesentlich leichter vom Cu zum Cu_2O fließen als in entgegengesetzter Richtung. Es fließt demnach der größte Strom, wenn im Bild 6 oben Plus und unten Minus ist, denn die Elektronen wandern von Minus nach Plus. Vertauscht man die Polarität, dann fließt nur ein sehr geringer Strom, der sogen. Sperrstrom. Bild 7 zeigt Ihnen den Gleichrichterstrom in Abhängigkeit von der Spannung. In Sperrichtung fließt ein nur sehr kleiner Strom, in Durchlaßrichtung steigt die Stromkurve dagegen rasch an.

Aus dieser Betrachtung ergibt sich das Widerstandsverhalten des Gleichrichters. Der Widerstand in Sperrichtung ist 1000 bis 10 000 mal größer als in Durchlaßrichtung, wobei

beim Durchlaß der tatsächlich genutzte Belastungsbereich zu Grunde gelegt wird. Der Widerstand in Sperrrichtung ist mit zunehmender Spannung nicht konstant, er sinkt dabei meist etwas ab. Er interessiert in der Meßtechnik nur insoweit, als er stets für die vorkommenden Belastungen noch so groß bleibt, daß der Zeiger nicht infolge eines sogenannten Rückstromes (= Sperrstrom) ein spürbares Drehmoment in der falschen Richtung (entgegengesetzt dem normalen Ausschlag) erhält. Diese Forderung erfüllen die Gleichrichter in genügendem Maße, so daß eine eventuelle Rückstromwirkung bei der Eichung leicht mit berücksichtigt werden kann.

Sehr wichtig ist dagegen der Widerstandsverlauf in Durchlaßrichtung, denn der Durchlaßwiderstand erscheint ja als Vorwiderstand vor dem Meßwerk. Entsprechend der Stromkurve im Durchlaßbereich (Bild 7) erhält man hier für den Widerstand einen Verlauf entsprechend Bild 8.

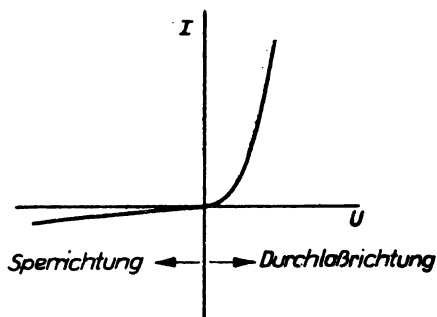


Bild 7 Strom-Spannungs-Diagramm eines Trockengleichrichters

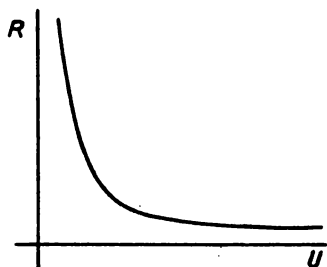


Bild 8 Verlauf des Gleichrichterdurchlaßwiderstandes

Bei kleinen Spannungen ist der Widerstand relativ groß. Der Strom ist hier so verschwindend klein, daß noch kein Zeigerausschlag erfolgen kann. Der Widerstand nimmt im Anfangsbereich stark ab, da er sehr temperaturabhängig ist. Der Temperaturkoeffizient ist negativ. Das wirkt sich auf die Skalenteilung des Drehspulgerätes (bei dem ein konstanter Luftspalt vorausgesetzt wird) so aus, daß die Teilung nicht

linear ist und sich außerdem hier sehr eng zusammendrängt. Weiterhin ist die Widerstandsabnahme bei den einzelnen Gleichrichtern etwas verschieden, da es nicht gelingt, Gleichrichter mit vollkommen übereinstimmenden Widerstandskurven herzustellen. Eine einigermaßen exakte Eichung ist an dieser Stelle kaum möglich. Aus diesem Grunde haben die Meßgeräte mit niedrigen Strom- oder Spannungsmeßbereichen am Skalenanfang eine leere Zone, die keine Skalenteilung enthält. Bild 9 zeigt Ihnen einen solchen Wechselstrommesser.

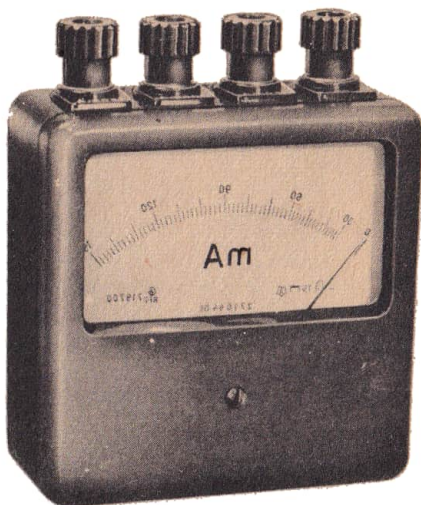


Bild 9 Strommesser für Wechselstrom

Aber auch nach dem starken Abfall geht die Kurve erst allmählich in einen angenähert waagerechten Teil über, in dem man den Widerstand als fast konstant ansehen kann. Durch diesen Verlauf erhält man eine Skalenteilung, die sich am Anfang nach der leeren Zone noch etwas zusammendrängt und sich dann zunehmend auseinanderzieht.

Um beide Halbwellen des Wechselstromes zur Messung auszunutzen, verwendet man die Zweiweggleichrichtung. Die für Meßgeräte üblichen Schaltungen sind die Gegentaktschaltung, die Graetzschaltung und die Brückenschaltung mit zwei Ventilen (Gleichrichtern).

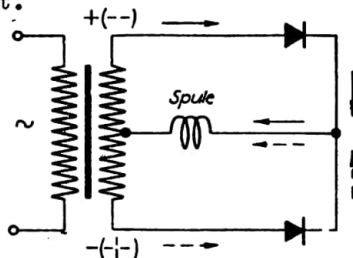


Bild 10 Gegentaktschaltung

Die Gegentaktschaltung ist in

Bild 10 wiedergegeben. Sie erfordert für jede Halbwelle nur einen Gleichrichter, so daß immer nur ein Durchlaßwiderstand vor dem Meßgerät wirksam wird. Allerdings bringt der Übertrager eine größere Frequenzabhängigkeit mit sich, als

sie ohnehin durch die Eigenkapazität des Gleichrichters gegeben ist.

Die Graetzschaltung ist eine Brückenschaltung mit insgesamt vier Gleichrichtern, wovon immer je zwei wirksam sind (Bild 11). An den Strompfeilen in den Bildern 10 und 11 sehen Sie, daß beide Halbwellen des Wechselstromes in der

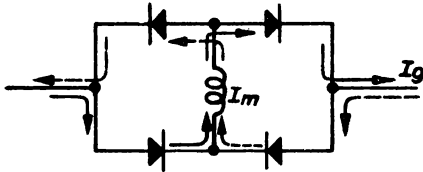


Bild 11 Graetzschaltung

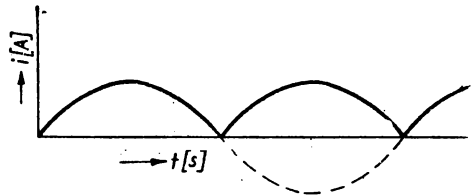


Bild 12 Gleichrichtung
des Wechselstromes

Drehspule immer die gleiche Richtung haben. Die negative Halbwelle der Stromkurve in Bild 12 erscheint durch die Gleichrichtung gewissermaßen nach oben umgeklappt. Durch die Drehspule fließt demnach ein pulsierender Gleichstrom. Wie schon angegeben, zeigt das Drehspulgerät bei nichtkonstanten, periodisch verlaufenden Strömen den arithmetischen Mittelwert an. Dieser ist natürlich hier nicht mehr Null wie beim Wechselstrom, sondern etwa gleich dem arithmetischen Mittelwert über eine halbe Periode des Wechselstromes. Da die Gleichrichtung ja entsprechend der Strom-Spannungskurve des Gleichrichters (Bild 7) nicht linear erfolgt, ist auch je nach Größe des Meßstromes und der dementsprechenden Aussteuerung des Gleichrichters die Kurvenform gegenüber dem Wechselstrom verzerrt. Wir wollen hier auf eine nähere Untersuchung dieses verzerrenden Kurvenformeinflusses verzichten und voraussetzen, daß bei sinusförmigem Wechselstrom die Halbwellen durch den Gleichrichter auch noch nahezu sinusförmig seien. Da aber der arithmetische Mittelwert kaum interessiert, so eicht man die Skala für Sinusform in Effektivwerten.

Dies ist möglich, da in diesem Falle das Verhältnis Effektivwert I /arithmetischem Mittelwert I_m konstant ist:

$$\frac{I}{I_m} = 1,11 \quad \text{für Sinusform.}$$

Hierin entspricht I dem im Meßkreis fließenden Wechselstrom I_g , in dessen Effektivwerten die Skala geeicht ist. I_m ist der im Meßwerk wirksam werdende Stromwert. Der Faktor 1,11 ist der Formfaktor, Man kann somit schreiben:

$$I_g = 1,11 \cdot I_m \quad (1)$$

Messen Sie mit einem so geeichten Meßgerät von der Sinusform abweichende Ströme (z.B. ein Tonfrequenzgemisch), dann wird die Messung falsch.

Der Graetzschaltung haftet insofern noch ein gewisser Nachteil an, als jeweils vor dem Meßwerk zwei belastungsabhängige Gleichrichterdurchlaßwiderstände liegen. Der eingangs schon erwähnte Einfluß auf die Skalenteilung ist hier schon doppelt vorhanden. Die in Bild 13 dargestellte Brückenschaltung mit nur zwei Ventilen (Gleichrichter) vermeidet das. Sie benötigt keinen Übertrager und es liegt jeweils nur ein Gleichrichterdurchlaßwiderstand (entweder $R_{G1\ 1}$ oder $R_{G1\ 2}$) vor dem Spulenwiderstand R_{Sp} des Meßwerks. Dafür sind die beiden Brückenwiderstände R_{B1} und R_{B2} erforderlich.

Betrachten wir den Verlauf der beiden Halbwellen des zu messenden Wechselstromes I_g : Von links nach rechts im Bild 13 (ausgezogene Strompfeile) verzweigt sich der Strom. Ein Teil fließt durch R_{B1} , der andere durch R_{B2} . Der Letztere wird von R_{G12} gesperrt, fließt durch R_{Sp} und vereinigt sich danach wieder mit dem ersten Teilstrom. Beide Teile fließen dann als Meßstrom durch den Gleichrichter R_{G11} . In entgegengesetzter Richtung

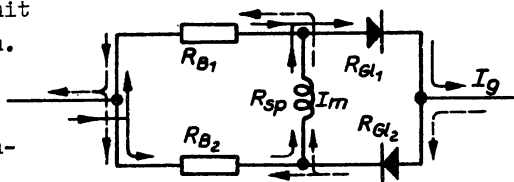


Bild 13 Brückenschaltung mit zwei Gleichrichtern

(= gestrichelte Strompfeile im Bild 13) fließt I_g zunächst durch den Gleichrichter mit R_{G12} , da der andere jetzt sperrt. Anschließend tritt wieder Stromteilung ein. Der eine Teil fließt in gleicher Richtung wie bei der vorhergehenden Halbwelle durch R_{Sp} und hinterher durch R_{B1} . Der andere Teil fließt durch R_{B2} und danach vereinigen sich beide Teile wieder zum Meßstrom I_g .

Das Meßwerk erhält also Stromhalbwellen in stets gleicher Richtung. Aber es wird nicht von dem ganzen Meßstrom, sondern nur von einem Teil berührt. Das ist an sich unrentabel und bei Gleichrichtung größerer Energien nicht zu vertreten. Da aber Drehspulgeräte eine hohe Stromempfindlichkeit besitzen, kann der Verlust in Kauf genommen werden. Die Bemessung der Widerstände R_{B1} , R_{B2} und R_{Sp} sieht nun so aus, daß stets $R_{B1} = R_{B2}$ ist und auch R_{Sp} fast oder ganz die Größe von R_{B1} oder R_{B2} hat. Ein Bemessungsbeispiel finden Sie in dem anschließenden Lehrbeispiel. Der Gleichrichterdurchlaßwiderstand liegt - oberhalb des Belastungsbereiches mit dem starken Abfall - meist etwas unter der Größe von R_{B1} bzw. R_{B2} . Für den Fall, daß $R_{B1} = R_{B2} = R_{Sp}$ ist, gilt für die Ströme:

$$\frac{1}{3} I_g = 1,11 \cdot I_m$$

da dann jeweils nur ein Drittel von I_g als I_m im Meßwerk wirksam wird. Somit ist dann

$$I_g = 3,33 \cdot I_m \quad (2)$$

Diese Schaltung (Bild 13) bewirkt aber noch immer durch den jeweils mit negativem Temperaturkoeffizienten wirkenden Gleichrichter eine gewisse Skalenverzerrung, die durch Vorschalten eines Kupferdraht-Widerstandes R_{Cu} , der ja einen positiven Temperaturkoeffizienten hat, noch etwas ausgeglichen werden kann. R_{Cu} erhält etwa die zweieinhalbfache Größe eines Gleichrichterdurchlaßwiderstandes R_{G1} . Die gesamte Brückenschaltung einschließlich R_{Cu} wollen wir zum Gerätewiderstand R_g zusammenfassen (Bild 14).

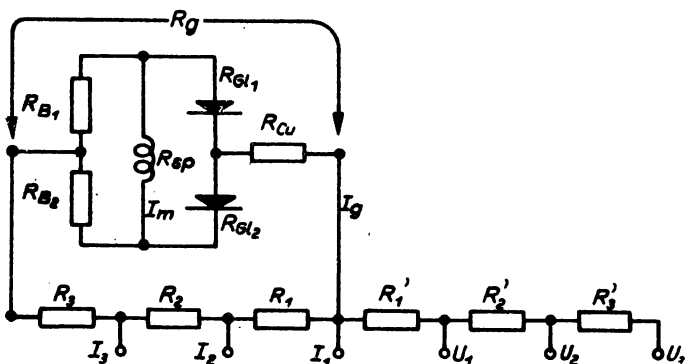


Bild 14 Wechselstrom-Vielfachmesser

Dieser bestimmt nun den Endwert des Wechselstrom- oder Wechselspannungsmeßbereiches. Das sind dann die kleinsten erreichbaren Bereiche, deren Größen etwa 3 mA bzw. 1,5 V betragen. Durch Vorschalten von Vorwiderständen oder Parallelschalten von Nebenwiderständen kann man Meßbereichserweiterungen in der in Abschnitt 2.023 besprochenen Weise vornehmen.

Bei der Spannungsmeßbereichserweiterung durch Vorwiderstände ergibt sich allerdings noch ein Umstand, der zu beachten ist. Nehmen Sie an, Sie hätten ein Wechselstrommeßgerät, bestehend aus der Gleichrichterschaltung nach Bild 13 und einem Vorwiderstand R_{Cu} , mit mehreren Spannungsbereichen zu versehen. Der Gesamtwiderstand R_g hat trotz der ausgleichenden Wirkung von R_{Cu} immer noch einen Temperaturverlauf, der einem negativen Temperaturkoeffizienten entspricht. Die schon mehrfach erwähnte Skalenverzerrung ist zwar nicht mehr so groß aber immer noch vorhanden. Je größer nun die Spannungsbereiche sind, umso größer werden auch die Vorwiderstände, die alle praktisch temperaturkonstant sind. Der gesamte Temperaturkoeffizient wird - wie Sie aus 1.23 wissen - mit zunehmender Größe der Vorwiderstände immer kleiner und nähert sich bei acht- bis neunfacher Erweiterung dem Wert Null. Das bedeutet aber, daß die Skala praktisch linear geworden ist. Das Resultat:

Für die niedrigen Bereiche ist die Skala verzerrt, für die hohen ist sie linear. Es herrscht keine Übereinstimmung. Um diese wieder herzustellen, schaltet man parallel zu R_g einen Nebenwiderstand, der zwar den Eigenverbrauch erhöht und gleichzeitig eine Strommeßbereichserweiterung darstellt, jedoch bei entsprechend empfindlichem Drehspulmeßwerk auch noch einen niedrigsten Strommeßbereich von 3 mA zuläßt. Dieser Nebenwiderstand ist kleiner als R_g . Er ist außerdem praktisch temperaturkonstant. Da er ständig - auch bei den Spannungsbereichen - in der Schaltung wirkt, bestimmt er vor allem den Skalenverlauf. Die Änderung des Skalenverlaufes durch die Vorwiderstände ist dann nur noch gering und bleibt innerhalb der durch die Güteklasse 1,5 festgelegten Fehler. Dieser Nebenwiderstand kann durch Unterteilung in der aus 2.023 bekannten Weise zur Strommeßbereichserweiterung benutzt werden. Man erhält dann schließlich einen Vielfach-Strom-Spannungsmesser für Wechselstrom (Bild 14).

Lehrbeispiel 1

Ein Wechselstrom-Vielfachmesser (Schaltung nach Bild 14) soll die Strommeßbereiche 5 mA, 50 mA und 500 mA, sowie die Spannungsbereiche 3 V, 60 V und 300 V erhalten. Das Drehspulmeßwerk hat einen Widerstand $R_{Sp} = 100 \text{ Ohm}$ und erreicht seinen Endausschlag bei 0,3 mA Gleichstrom. Die Gleichrichter haben bei 1 mA Durchlaßstrom einen Durchlaßwiderstand von $R_{Gl} = 100 \text{ Ohm}$, $R_{Cu} = 2,5 \cdot R_{Gl}$. Wie groß sind die Vor- und Nebenwiderstände für sinusförmigen Wechselstrom?

Lösung:

$$\begin{aligned}
 \text{Nach (2)} \quad I_g &= 3,33 \cdot I_m = 3,33 \cdot 0,3 \text{ mA} = 1 \text{ mA} \\
 R_{Cu} &= 2,5 \cdot R_{Gl} = 2,5 \cdot 100 \Omega = 250 \Omega \\
 R_g &\approx R_{Cu} + R_{Gl} + \frac{(R_{Sp} + R_{B1}) \cdot R_{B2}}{R_{Sp} + R_{B1} + R_{B2}} \\
 R_g &= 250 \Omega + 100 \Omega + \frac{(100 + 100) \cdot 100}{100 + 100 + 100} \Omega = 416,6 \Omega
 \end{aligned}$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = R = \frac{I_g \cdot R_g}{I_1 - I_g} = \frac{1 \text{ mA} \cdot 416,6 \, \Omega}{5 \text{ mA} - 1 \text{ mA}} = 104,15 \, \Omega$$

(nach Abschn. 2.023)

Für Bereich I_2 ist $n = \frac{I_2}{I_g} = \frac{50 \text{ mA}}{1 \text{ mA}} = 50$

Nach (7): $R_1 = R_v = \frac{104,15 \, \Omega (50-1) - 416,6 \, \Omega}{50} = 93,735 \, \Omega$
(Lbf. 1)

Für Bereich I_3 ist $n = \frac{I_3}{I_g} = \frac{500 \text{ mA}}{1 \text{ mA}} = 500$

Entspr. (8): $R_3 = R_p = \frac{416,6 \, \Omega + 104,15 \, \Omega}{500} = 1,04 \, \Omega$
(Lbf. 1)

$$R_2 = R - R_1 - R_3 = 104,15 \, \Omega - 93,735 \, \Omega - 1,04 \, \Omega = 9,375 \, \Omega$$

$$R_g' = R_g \parallel R = \frac{416,6 \, \Omega \cdot 104,15 \, \Omega}{416,6 \, \Omega + 104,15 \, \Omega} = 83,2 \, \Omega$$

$$U_g = I_1 \cdot R_g' = 5 \text{ mA} \cdot 83,2 \, \Omega = 0,416 \text{ V}$$

Für Bereich U_1 gilt nach (9) (Lbf. 1)

$$R_1' = 83,2 \, \Omega \left(\frac{3}{0,416} - 1 \right) = 517 \, \Omega$$

Bereich U_2 : $R_2' = 83,2 \, \Omega \frac{60 - 3}{0,416} = 11\,400 \, \Omega$

Bereich U_3 : $R_3' = 83,2 \, \Omega \frac{300 - 60}{0,416} = 48\,000 \, \Omega$

Die Trockengleichrichter bringen auch einen Frequenzfehler mit sich, der durch die Kapazität bedingt ist, die zwischen den leitenden Schichten mit der dazwischenliegenden Sperrschicht entsteht. Die Größe dieser Kapazität beträgt etwa $0,03 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. Sie ist zur Gleichrichterstrecke parallelgeschaltet zu denken und überbrückt mit ihrem mit zunehmender Frequenz immer kleiner werdenden Wechselstromwiderstand die Gleichrichterstrecke. Der Hersteller gibt für die normalen Gleichrichtermessgeräte bei einem Bereich oberhalb 2000 Hz bis 5000 Hz einen zusätzlichen Frequenzfehler von $\pm 1\%$ vom Endwert an. Für höhere Frequenzen muß man entweder neue Skaleneichnungen vornehmen oder bestimmte Ausgleichschaltungen anwenden. Für Hochfrequenz benutzt man im allgemeinen keine Trockengleichrichter, obwohl man mit den modernen

Germaniumdioden sicher hier noch einiges verbessern kann. Solche Geräte werden z.Zt. aber noch nicht in der Serienproduktion hergestellt.

Die durch den Gleichrichter bedingten Zusatzfehler lassen die Güteklasse der Feinmeßgeräte nicht erreichen. Der Anzeigefehler wird mit $\pm 1,5\%$ vom Bereichendwert angegeben, zu dem gegebenenfalls der obengenannte Frequenzfehler hinzukommt.

Die relativ hohe Überlastbarkeit des Drehspulmeßgerätes wird durch den Gleichrichter etwas begrenzt. In Durchlaßrichtung ist der Gleichrichter kurzzeitig recht hoch überlastbar. In Sperrichtung dagegen darf die Sperrspannung nicht überschritten werden, da sonst die Sperrschicht zerstört werden kann und damit der Gleichrichter unbrauchbar wird.

Schließlich kann man ein Drehspulmeßwerk mit mehreren Strom-Spannungsmeßbereichen für Gleich- und Wechselstrom versehen, wobei dann die Meßbereiche für Gleichstrom und Gleichspannung mit einer Temperaturfehlerkompensation nach 1.23 ausgerüstet sind und die Bereiche für Wechselstrom, sowie Wechselspannung mit der in Bild 15 gezeigten Gleichrichterschaltung und ihren vorstehend angegebenen Eigenheiten. Diese Geräte haben einen zentralen Stufenschalter, der nicht nur die einzelnen Bereiche einstellt, sondern auch über Zusatzkontakte, die von Nockenscheiben bedient werden, erforderliche Widerstandsumschaltungen am Meßwerk vornimmt. Von ihm werden auch die Gleichrichter ein- oder ausgeschaltet.

Die Schaltung eines solchen Universalmessers (Multizet II vom VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt) ist in Bild 15 dargestellt. Der Stufenschalter verbindet die Kontaktbahn mit dem jeweiligen Meßbereichanschluß. Das Einschalten der Strommeßbereiche geschieht in der Art, wie sie an Hand des Bildes 34 Lbf.1 besprochen wurde. Den niedrigsten Bereich oben in der Mitte (0,1V, 1mA) gibt es nur für Gleichstrom

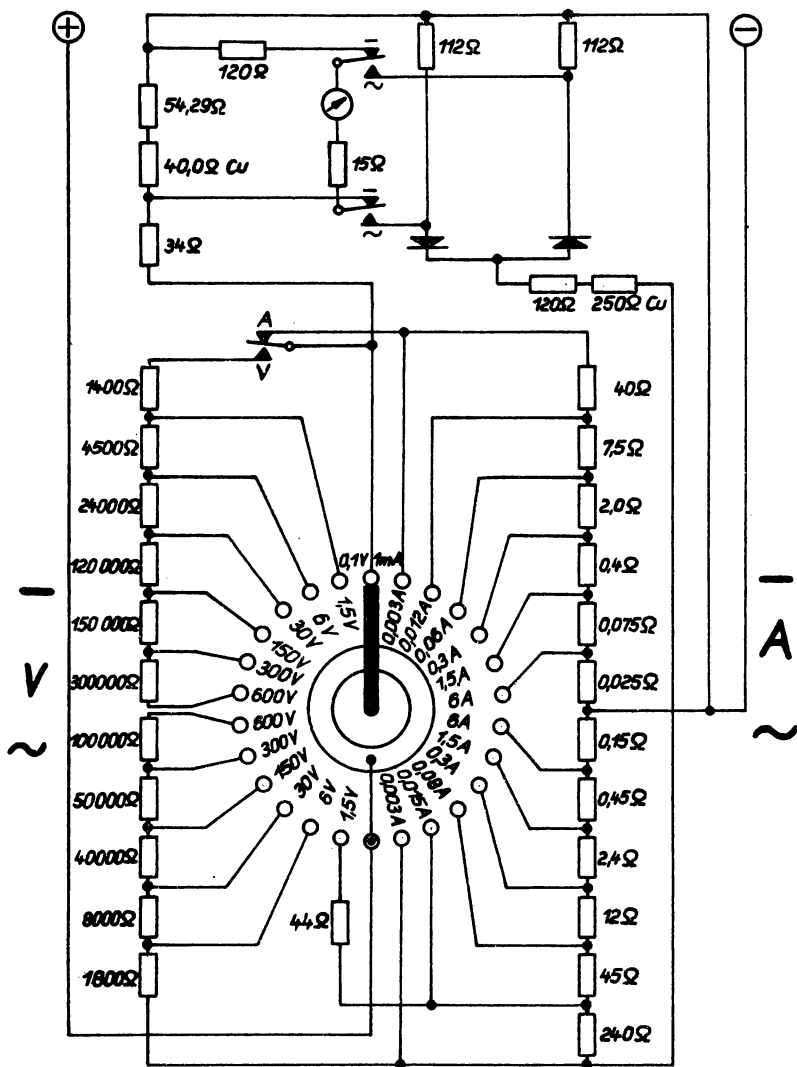


Bild 15 Vielfach-Strom- und Spannungsmesser für Gleich- und Wechselstrom
Multizet II.

Bei ihm liegt der einpolige Umschalter A ... V auf dem V-Kontakt. Im oberen Teil des Bildes sehen Sie den doppel-poligen Umschalter. Dieser schaltet einmal das Meßwerk, das in Reihe mit einem 15 Ohm-Vorwiderstand liegt, an die temperaturkompensierende Widerstandsschaltung (für die Gleichstrom- und Gleichspannungsbereiche). Die Schaltung ist von der Art der temperaturfreien Schaltung Lbf.1 Bild 20. Der veränderliche Widerstand R_{Cu} ist hier 40 Ohm groß. Zum anderen legt der Umschalter das Meßwerk an die Gleichrichterbrückenschaltung mit zwei Ventilen. Der ausgleichende Cu-Widerstand beträgt hier 250 Ohm. Das Bild 16 stellt dieses Vielfachmeßgerät in seiner äußeren Gestalt dar.

2.042 Drehspulgeräte mit Thermoumformer

Der Name deutet an, daß eine Umformung mittels Wärme stattfindet. Da es sich um ein Zusatzgerät zum Drehspul-Meßwerk handelt, können Sie sich wohl denken, daß Wechselstrom durch Vermittlung der Wärme in Gleichstrom umgeformt werden soll. Das Ihnen aus "Grundlagen der Elektrotechnik" Lehrbrief 4 bekannte Thermoelement, für das in der Meßtechnik nach VDE 0410 der Ausdruck "Thermopaar" benutzt wird, und ein von dem zu messenden Wechselstrom

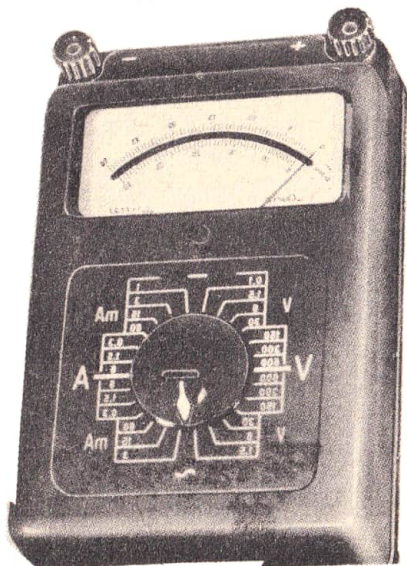


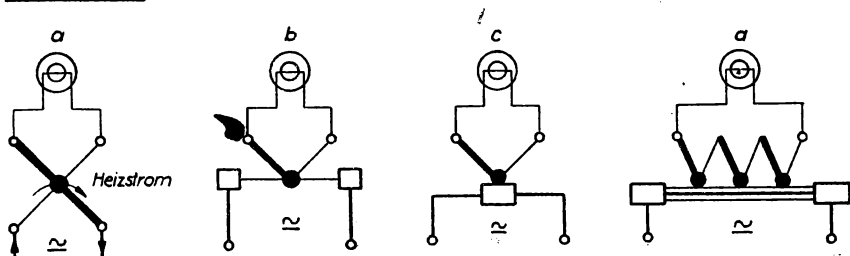
Bild 16 Vielfach-Strom- und Spannungsmesser für Gleich- und Wechselstrom

durchflossener Widerstandsdraht (Heizer genannt), der die Verbindungsstelle der Elementschenkel erwärmt, sind die Hauptteile des Thermoumformers. Die von dem Heizer erzeugte Wärmeleistung $I^2 \cdot R$ ergibt an den freien Enden des Thermopaars eine Urspannung, die vom Drehspulgerät angezeigt wird.

Sie wissen, daß Sie mit einem Thermopaar Temperaturen messen können und daß seine Ursprungsspannung praktisch verhältnismäßig mit der Temperaturdifferenz zwischen der Verbindungsstelle der beiden Metalle und ihren anderen Enden ansteigt. Sie messen also indirekt die Temperatur des Heizers, die mit dem Quadrat des Heizstroms entsprechend $I^2 \cdot R$ ansteigt, wenn keine Wärmeverluste an die Umgebung auftreten. Hätten Sie demnach bei 1 A Heizerstrom einen Zeigerausschlag von 10 Skt festgestellt, so müßte dieser bei 2 A auf den 2²-fachen Betrag, also auf 40 Skt gehen. Man sagt, der Skalenverlauf ist quadratisch. Die Skala ist am Anfang zusammengedrängt und hat gegen das Ende hin eine weiter werdende Teilung. Wärmeverluste durch Leitung, Strahlung und Luftströmung bewirken Abweichungen vom quadratischen Verlauf.

Machen Sie den Luftspalt zwischen Polschuh und Polkern abweichend von Bild 24 Lbf.1 am Anfang klein und zum Ende hin zunehmend, so können Sie eine fast gleichmäßig geteilte Skala - allerdings auf Kosten der Endempfindlichkeit - erreichen.

Da der Zeigerausschlag der erzeugten Wärme entspricht, gibt die Skala Effektivwerte an, und zwar unabhängig von der Kurvenform des Wechselstroms. Das ist ein großer Vorteil.



Bilder 17 a, b, c, d: Ausführungsformen von Thermoumformern (schematisch)

Es ist ferner klar, daß ein gleich starker Gleichstrom dieselbe Erwärmung hervorruft, so daß das Gerät mit Gleichstrom geeicht werden kann.

Der Zeigerausschlag ist zunächst direkt proportional der vom Thermopaar erzeugten Thermourspannung und damit der Erwärmung der Verbindungsstelle. Diese ist wiederum praktisch eine lineare Funktion der Leistung $N = I^2 \cdot R$ im Heizdraht. Es besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen dem Zeigerausschlag α und der Leistung N :

$$\alpha = c_1 \cdot N = c_1 \cdot R \cdot I^2$$

c_1 ist hierin ein konstanter Proportionalitätsfaktor. Das Produkt $c_1 \cdot R$ ist aber praktisch auch konstant, wenn der Heizdraht aus einem Material besteht, das nahezu temperaturkonstant ist. Setzt man für $c_1 \cdot R = c_2$, so erhält man

$$\alpha = c_2 \cdot I^2$$

Ähnlich wie schon in 2.012 beim Drehspulgerät beschrieben, stellt die Konstante c_2 die Empfindlichkeit des Gerätes mit dem Thermoumformer dar (Konstanter Luftspalt vorausgesetzt). Der Kehrwert der Empfindlichkeit ist aber die Gerätekonstante k . Wird die Gleichung danach umgeformt, so ergibt sich:

$$I^2 = k \cdot \alpha \quad (3)$$

I ist der Meßstrom, der hier im Quadrat erscheint. k ist die Gerätekonstante mit der Dimension A^2/Skt , wenn I in Ampere gemessen wird. α ist der Ausschlag in Skalenteilen.

Die Formel (3) besagt, daß der Ausschlag dem Quadrat des Meßstromes entspricht. Das würde bedeuten, daß für die Quadratwerte des Stromes die Skala linear wäre (konstanter Luftspalt vorausgesetzt). Die Skala ist natürlich nicht in Quadraten, sondern im tatsächlichen Stromwert also $\sqrt{I^2}$ geeicht. Das gibt dann eine quadratisch geteilte Skala. Der Wirkungsgrad von Thermoumformern ist recht klein. Das verwendete Drehspulgerät muß daher eine hohe Empfindlichkeit besitzen und muß mit seinem Drehspulwiderstand an den kleinen Thermopaarwiderstand angepaßt sein.

Lehrbeispiel 2

Der Skalenendwert eines Thermoumformergerätes = 400 mA.

Welcher Stromwert wird bei halbem und bei einem Viertel des gesamten Zeigerausschlages angezeigt ?

L ö s u n g :

Beim halben Ausschlag würde bei linearer Skala, die mit den quadratischen Stromwerten zu eichen wäre, die Hälfte des Quadrates vom Endwert, also $\frac{1}{2} \cdot 400^2 \text{ mA}^2$ angezeigt. Man schreibt natürlich den Wurzelwert I' an diese Stelle:

$$I' = \sqrt{\frac{400^2 \text{ mA}^2}{2}} = 283 \text{ mA}$$

Entsprechend beim Viertelausschlag :

$$I'' = \sqrt{\frac{400^2 \text{ mA}^2}{4}} = 200 \text{ mA}$$

Handelsübliche Thermoumformer haben Meßbereiche von 0,5mA bis 20 A, in Sonderausführungen sogar bis 200 A.

Bild 17 zeigt schematisch verschiedene Ausführungen von Thermoumformern. 17a ist die einfachste Form, als sogenanntes Thermokreuz. Je eine Hälfte der thermoelektrisch verschiedenen Drähte (z.B. Nickelchrom und Konstantan), die in der Mitte durch Lötung oder Schweißung verbunden sind, werden vom Heizstrom durchflossen. Dies ist die ältere Bauart. Nachteilig ist der PELTIER-Effekt: Fließt der Heizstrom vom thermoelektrisch-positiven zum thermoelektrisch-negativen Material, so erwärmt sich die Lötstelle zusätzlich, fließt er entgegengesetzt, so tritt dort Abkühlung ein. Bei Wechselstrom hebt sich der PELTIER-Effekt auf. Bei der Eichung mit Gleichstrom müssen Sie das Mittel aus zwei Ablesungen mit verschiedener Stromrichtung nehmen. Für Gleichstrom wird jedoch der Thermoumformer kaum verwendet.

17b ist die neuere Ausführung mit einem besonderen Heizer, der zwischen Anschlußklötzen liegt (Bild 18). Auf den Heizdraht, der aus Nickelchrom, Konstantan oder Platinlegierungen besteht, ist die heiße Verbindungsstelle des Thermoelements aufgelötet oder aufgeschweißt, so daß guter Wärme-

kontakt besteht. Für die Heizer sind bis 100 mA - Nennstrom Metallbänder oder Drähte von $5 \times 8 \mu\text{m}$ oder 40 bis $60 \mu\text{m}$ Durchmesser üblich. Für die Bereiche bis 1 A benutzt man Heizdrähte bis $100 \mu\text{m}$ Durchmesser. Über 1 A wird der Heizer als Band ausgeführt, bei Hochfrequenz als dünnwandiges Rohr wegen des Hauteffekts (Skin-Effekts). Unter diesem wird die Stromverdrängung nach der Leiteroberfläche verstanden, wodurch der Widerstand infolge der Querschnittsminderung mit steigender Frequenz zunimmt. Bei dünnen Drähten macht dies sehr wenig aus. Es ist daher günstiger, bei Hochfrequenz starke Ströme durch einen Stromwandler mit Massekern - oder eisenlos ab etwa 100 m Wellenlänge - auf 200 mA zu untersetzen, damit man den dünnadrächtigen Heizer verwenden kann. In jüngster Zeit hat man für die Bereiche 3 bis 200 A Thermoumformer geschaffen, die ohne Wandler bis zu Frequenzen von 25 MHz (bis 50 A) und 25 kHz (bis 200 A) benutzt werden können. Der Heizer ist hier als kreisrunde Membran ausgebildet. Der Strom wird im Mittelpunkt zugeführt und außen am Umfang konzentrisch wieder abgenommen, so daß der Heizstrom sich radial in der Heizmembran aus Nickelchrom oder Konstantan ausbreitet. Sie kann so dünn gehalten werden, daß Frequenzfehler durch Stromverdrängung innerhalb der zulässigen Grenze liegen.

Der Heizer erwärmt durch Strahlung und Leitung auch die Anschlußklötze. Der dadurch bedingte Anwärmefehler der Anzeige wird vermindert durch große Oberflächen dieser Kupferstücke, die sogar manchmal Kühlrippen bekommen (Bild 18). Vollkommen läßt sich der Fehler aber nur durch eine Kompensation beseitigen. Die Wärmeabgabe an die Raumluft wird durch Einbau des Umformers in ein Gehäuse eingeschränkt;

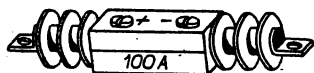


Bild 18 Thermoumformer

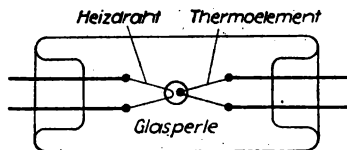


Bild 19 Thermoumformer im Vakuum mit indirekter Heizung

bei Heizern aus dünnem Draht von etwa 100 mA abwärts bringt man den Umformer in einem ausgepumpten Glaskolben unter (Bild 19). Dadurch wird die erforderliche Heizleistung kleiner, die Empfindlichkeit der Anzeige steigt erheblich. Bei Ausführung c (Bild 17) ist das Element vom Heizer elektrisch isoliert, wie auch Bild 19 zeigt. Hier ist der Isolator eine angeschmolzene Glasperle. Die Wärmeübertragung ist natürlich schlechter, aber bei Hochfrequenz stört die Kapazität gegen Erde, die das Meßgerät mit seinen Zuleitungen darstellt. Durch die Glasperle wird ein kleiner Kondensator geschaffen, so daß infolge der Reihenschaltung der Kapazitäten der Erdstrom klein gehalten wird. Das Bild 20 zeigt Ihnen die praktische Ausführung eines in einen Glaskolben eingeschmolzenen Thermoumformers.

Zwecks Steigerung der Empfindlichkeit können mehrere Thermoelemente in Reihe geschaltet werden (Bild 17). Dann ist natürlich immer eine Isolierung vom Heizer nötig, denn sonst wären die Lötstellen kurzgeschlossen. Als Isolator genügt unter Umständen eine Oxydhaut auf dem Heizer.

Das Symbol auf der Skala des Meßgeräts ist Nr.13 der Tafel 1 bei nichtisoliertem Thermoelement. Ist Nr.14 unter Nr.1 gezeichnet, dann erhalten Sie ein Gerät mit isoliertem Umformer.

Spannungsmesser erhalten immer einen eingebauten Umformer, Strommesser bis etwa 10 A darüber werden die Umformer getrennt aufgestellt. Für tragbare Instrumente gibt es auch für die kleinsten Meßbereiche getrennte Umformer. Zur Spannungsmessung kann der H. zdraht für etwa 1V bemessen werden, für höhere Spannungen werden Vorwiderstände vorgeschaltet. Eine heute übliche Ausführung eines solchen Gerätes sehen Sie im Bild 21. Die Skala des Drehspulmeßgerätes ist hier linear geteilt, dafür enthält der anklemmbare Thermoumformer eine bildliche Skaleneichung auf seinem Gehäuse.

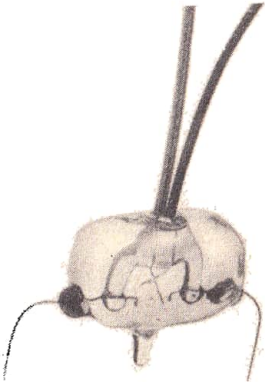


Bild 20 Praktische Ausführung eines Vakuum-Thermoumformers

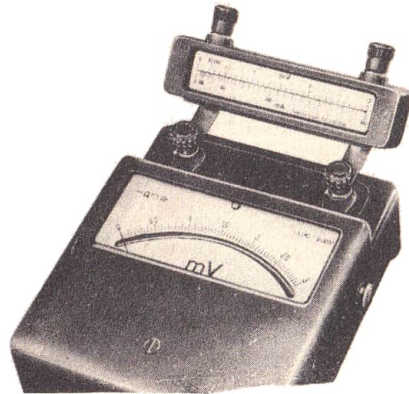


Bild 21 Meßgerät mit Thermoumformer

Die Leistungsaufnahme des Heizers liegt beim Spannungsmesser und beim Strommesser bis 100 mA (Umformer im ausgepumpten Glaskolben) zwischen 10^{-3} und 10^{-2} W, über 100 mA bis etwa 200 A mit Umformern in Luft zwischen etwa 0,1 und 12 W.

Die Urspannung des offenen Thermoelements ist bei Nennstrom des Heizers (Heizer-Temperaturen 200 ... 300°C) zwischen 7 und 12 mV. Bei Bereichen unter 5 mA: 2,5 ... 5 mV.

Nachteilig ist die geringe Überlastbarkeit des Heizers, die kurzzeitig höchstens 100% betragen darf.

Aus den vorhergehenden Zahlenangaben sollen Sie eine Vorstellung von der Ausführung der Meßbereiche und von den Verlusten durch den Heizer gewinnen. Sie sollen die Daten jedoch nicht auswendig lernen.

Die Meßgenauigkeit der Güteklassen 0,2 und 0,5, wie sie für das Drehspul-Meßwerk allein leicht erreicht wird, ist wegen des vorgeschalteten Thermoumformers nicht zu erzielen. Dessen Fehler sind bedingt durch den genannten Anwärmefehler und durch die mit steigender Frequenz zunehmende Stromverdrängung sowie durch die ebenfalls zunehmenden Einflüsse von Kapazität und Selbstinduktion des Umformers und der Leitungen. Thermische Strommesser können in den Klassen 1 bis 2,5 hergestellt werden. Anwendbar sind die Geräte allgemein bis zu Frequenzen von etwa 10^8 Hz, Umformer mit

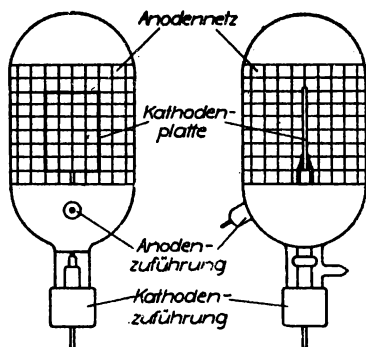
0,6 mA Bereich sogar bis 10^9 Hz.

Das Hitzdrahtinstrument, das Sie in "Grundlagen der Elektrotechnik" Lehrbrief 1 kennengelernt haben, ist heute vom Thermoumformer mit Drehspulgerät verdrängt worden. Die Mängel des alten Hitzdrahtinstruments sind vor allem: die geringe Stromempfindlichkeit und der hohe Leistungsbedarf, besonders beim Spannungsmesser, sowie das Wandern der Nullstellung des Zeigers bei Temperaturschwankungen. Es soll daher hier nicht weiter besprochen werden.

2.043 Drehspulgeräte mit Fotoumformer

Wenn Sie im Kino sehen, daß die Lampen vor Beginn der Vorstellung langsam dunkler werden, dann wissen Sie als Techniker, daß der Lampenstrom heruntergeregelt wird, daß also die Beleuchtungsstärke vom Strom abhängig ist, der durch den Glühfaden fließt. Also muß die Stromstärke durch Messung der Beleuchtungsstärke ermittelt werden können. Wie messen Sie die Beleuchtungsstärke? Sie denken vielleicht an das Gebiet Optik der Physik und erinnern sich an das Fettfleckfotometer von Bunsen. Es sind auch rein optische Meßverfahren zur Messung der Stromstärke entwickelt worden. Hier soll aber elektrisch gemessen werden, und dazu braucht man das "elektrische Auge", das vor allem vom Tonfilm her als Fotozelle bekannt ist.

Im engeren Sinn sind Fotozellen evakuierte oder gasgefüllte Glaskolben mit einer Metallkatode, die (für sichtbares Licht) in hauchdünner Schicht eines der Alkalimetalle Natrium, Kalium, Rubidium oder Caesium trägt, und einer Metallanode (Bild



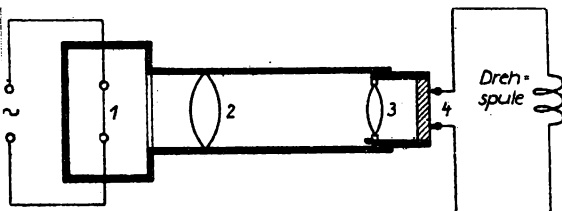
22). Trifft Licht auf Bild 22 Fotozelle mit Zentralkatode

die Katode, dann werden aus dem Alkalimetall Elektronen gelöst, die teilweise aus der Oberfläche austreten und zur Anode fliegen, wenn Sie eine Gleichspannung zwischen Anode und Katode gelegt haben. Zur Messung des Elektronenstromes dient ein zwischengeschaltetes empfindliches Drehspulgerät (Strom etwa 10^{-6} A groß).

Der Vergleich mit der Radioröhre drängt sich Ihnen auf. Bei der Fotozelle steigt der Elektronenstrom mit dem auf die Katode fallenden Lichtstrom. Außerdem steigt er mit zunehmender Anodenspannung (Saugspannung).

Die Bezeichnung Fotozelle kennzeichnet ein lichtelektrisches Entladungsgefäß mit Katode und Anode, das eine Saugspannung braucht.

Das Fotoelement (genauer: Sperrschicht-Fotoelement, Bild 23) ist grundsätzlich so aufgebaut wie der beschriebene Trockengleichrichter.



Es gibt Kupferoxydul- und Selenfotoelemente. Das Bild 23 Fotoelement

Cu_2O -Element besteht aus einer meist kreisförmigen Kupferplatte (6 ... 60 mm Durchmesser, etwa 1 mm stark) mit der dünnen Cu_2O -Schicht und einer darauf aufgestäubten lichtdurchlässigen Gegenelektrode ($0,005\mu\text{m}$ dünn) aus Silber, Gold oder Platin, darauf ein Metallring zur Stromabnahme.

Durch Absorption des Lichtes werden im Cu_2O in der Nähe der Sperrschicht Elektronen (Fotoelektronen) gelöst. Infolge der zugeführten Lichtenergie können einige die Sperrschicht durchdringen und in die Kupferplatte übertreten. Es entsteht hier also ein Elektronenüberschuß gegenüber der Gegenelektrode und somit eine Potentialdifferenz zwischen beiden. Der Ausgleich geschieht zu einem Teil über den äußeren Stromkreis, zum anderen über den parallel geschalteten inneren Widerstand (Cu_2O) zur Gegenelektrode, da die Sperr-

schicht in dieser Richtung durchlässig ist. Sie müssen sich den Unterschied klarmachen: Der Trockengleichrichter ist nur ein Ventil, ein Widerstand, dessen Ohmwert am kleinsten ist, wenn Plus an die Gegenelektrode angeschlossen wird; dann fließen die Elektronen in der Durchlaßrichtung. Das Fotoelement hingegen ist ein Spannungserzeuger wie ein galvanisches Element, und die nutzbaren Elektronen für den äußeren Stromkreis fließen in der Sperrichtung. Trotz dieser geringen Zahl von Elektronen spricht ein empfindliches Instrument an ($300 \dots 400 \mu\text{A/lm}$). Die Einheit des Lichtstromes ist Lumen (lm). Der Zweigstrom durch den inneren Widerstand des Fotoelements wirkt störend, weil dadurch der gemessene Strom nicht genau verhältnißgleich dem Lichtstrom wird. Man muß daher den Meßwerkwiderstand klein gegenüber dem inneren Widerstand machen.

Selen-Fotoelemente haben statt der Kupferscheibe eine solche aus Eisen, auf die Selen aufgetragen ist. Sonst ist der Aufbau der gleiche. Dieses Element hat eine höhere Stromausbeute.

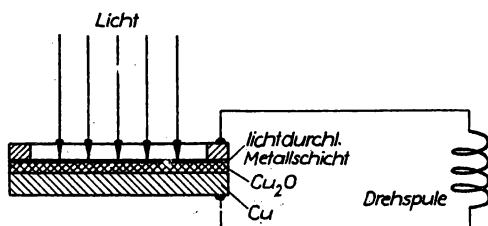


Bild 24 Fotoumformer

Bei den Sperrschicht-Fotoelementen wird die Lichtenergie unmittelbar in elektrische Energie umgesetzt. Der Fotostrom entsteht ohne Saugspannung.

Dieses Gerät mit seinem stabilen Aufbau und niedrigen Gewicht wird meistens mit dem Drehspulmeßwerk in einem Gehäuse zusammengebaut als tragbarer Beleuchtungsmesser, wobei die Skala in der Einheit der Beleuchtungsstärke Lux geeicht ist. Wenn Sie sich für die Fotografie interessieren, kennen Sie vermutlich auch diese kleinen Belichtungsmesser, bei denen die Skala in Sekunden Belichtungszeit geeicht ist.

Es gibt noch zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten von Fotozellen und Fotoelementen, die hier nicht zum Thema gehören. Der Begriff Fotoumformer lt. Überschrift soll bedeuten, daß Wechselstrom durch Vermittlung des Lichtes mit dem Gleichstrom-Instrument gemessen werden kann, während beim Thermoumformer die Wärme als Vermittlerin auftritt. Bild 24 gibt Ihnen das Schema der Messung. Der Wechselstrom bringt einen Widerstandsdraht 1 auf Glühtemperatur. Das Licht wird durch die Optik 2 und 3 derart gerichtet, daß die wirk-same Fläche des Fotoelementes 4 gleichmäßig beleuchtet ist. Der entstehende Fotostrom ist ein Maß für die Stärke des Wechselstroms (siehe Kinobeispiel am Anfang). Die Eichung des Drehspul-Meßwerks erfolgt mit Gleichstrom.

Die Meßgenauigkeit dieses Verfahrens ist sehr groß. Sie können damit den Frequenzfehler eines Thermoumformers be-stimmen.

Zusammenfassung =====

Um das Drehspul-Meßwerk, welches das empfindlichste von allen anzeigenden Geräten ist, auch für Wechselstrom be-nutzen zu können, haben Sie zur Auswahl folgende Zusatze-geräte:

Den Trockengleichrichter verwenden Sie zur Messung von Niederfrequenz und Mittelfrequenz bis etwa 500 Hz sowie bei Frequenzfehler-Kompensation im Meßwerk für Tonfrequen-zen bis etwa 10^4 Hz. Bei verzerrter Kurve zeigt das Instru-ment einen falschen Effektivwert.

Der Thermoumformer beruht auf der Temperaturmessung eines vom Wechselstrom erwärmten Drahtes oder Bandes mit einem oder mehreren Thermoelementen. Die erzeugte Spannung ist ein Maß für den Effektivwert des Wechselstroms, unabhängig von der Kurvenform. Die Geräte sind für Gleich- und Wech-selstrommessung geeignet und werden insbesondere für Hoch-frequenz verwendet.

Der Fotoumformer mißt die Beleuchtungsstärke, die ein vom Wechselstrom zum Glühen erhitzter Draht auf der Fläche eines Fotoelements erzeugt. Er dient zu genauen Strommessungen bei höchsten Frequenzen.

Ü b u n g e n

1. Wodurch erklären Sie die große Empfindlichkeit des Drehspulmeßwerks ?
2. Wodurch erhalten Sie die gleichmäßig geteilte Skala ?
3. Zeigen die beiden Spannungsmesser der Schaltung Bild 18 Lbf.1 denselben Wert an ?
4. Welchen Strom mißt der Strommesser der Schaltung Bild 18 in Lbf.1 ?
5. Für eine Elektrolyseanlage brauchen Sie einen Strommesser für 1000 A und wählen ein Drehspulgerät für 60 mV nebst zugehörigem Nebenwiderstand für 1000 A Nennstrom. Wie groß ist der Verlust im Nebenwiderstand bei Nennstrom ?
6. Warum hat ein Galvanometer kein Spulenrähmchen ?
7. Warum ist das Spiegelgalvanometer elektrisch besonders empfindlich ?
8. Wodurch unterscheidet sich das ballistische vom normalen Galvanometer ?
9. Können Sie mit dem Drehspulmeßwerk Wechselstrom messen ?
10. Für welches Gerät spielt die Kurvenform des Wechselstroms bei der Messung eine Rolle ?
11. Verwenden Sie das Gerät mit Trockengleichrichter auch bei Hochfrequenz ?
12. Warum können Sie das Gerät mit Thermoumformer mit Gleichstrom eichen ?

13. Erläutern Sie kurz den Begriff "Fotoelement".
14. Berechnen Sie alle Vor- und Nebenwiderstände eines Vielfachmeßgerätes n.Bild 37 Lbf.1. Das Drehspulmeßwerk erreicht seinen Endausschlag bei 5 mA. Der Meßwerkwiderstand ist $R_g = 10 \text{ Ohm}$. Der Temperaturkompensationswiderstand soll das Vierfache des Meßwerkswiderstandes betragen. Das Gerät soll folgende Meßbereiche erhalten: 7 mA, 70 mA, 700 mA, 7 V und 70 V. Berechnen Sie außerdem die maximale Leistung mit der jeder einzelne Widerstand belastet wird.
15. Wie groß ist der Meßwerkswiderstand in der Schaltung nach Bild 15 ? Anleitung: Benutzen Sie hierzu den Gleichstrombereich 0,1 V, 1 mA !
16. Der kleinste Wechselstrommeßbereich eines Drehspulgerätes mit Gleichrichter nach Bild 14 ist zugleich sein kleinster Wechselspannungsbereich für 1,5V Endausschlag. Der diesem Bereich parallel geschaltete Gesamtwiderstand (=Summe aller Strombereichwiderstände) beträgt 750 Ohm. Das Drehspulmeßwerk benötigt zum Endausschlag 0,3 mA Gleichstrom. Wie groß ist der maximale Eigenverbrauch des Gerätes bei diesem 1,5 V-Wechselspannungsbereich ?
17. Ein Thermoumformer für einen Meßbereich von 10 mA benötigt bei Endausschlag eine Heizleistung von 7,5 mW. Das Drehspulmeßwerk, das zum Endausschlag 1 mA Gleichstrom benötigt, ist über einen Vorwiderstand R_v an das Thermoelement des indirekt geheizten Umformers angeschlossen. Es hat einen Widerstand von $R_g = 4 \text{ Ohm}$. Der Widerstand des Thermoelementes R_{Th} ist 3,3 Ohm groß. Zwischen den Widerständen besteht die Beziehung: $R_v + R_{Th} = 2,3 R_g$. Bei welcher Temperatur der Verbindungsstelle des Konstantan-Chromnickel-Thermoelementes wird Endausschlag erzielt, wenn nach Tabellenangaben Konstantan gegen Kupfer eine Thermourspannung von -4,16 mV bei 100 grd Erwärmung erzeugt und Nickel-

chrom unter den gleichen Bedingungen +1,44 mV ? Die Raumtemperatur ist 22°C.

2.1 Drehmagnetmeßgerät

2.11 Nadelgalvanometer.

=====

Beim Drehspulmeßwerk des vorigen Kapitels steht der Magnet fest, und die Spule dreht sich in seinem Feld; die umgekehrte Anordnung muß auch möglich sein. Sie könnten nach dem Gelernten einwenden, daß der schwere Dauermagnet für die Lagerung ungünstig ist und daß das Trägheitsmoment zu groß wird. Das ist richtig, und wenn man den Magneten kleiner macht, dann braucht man zur Erzeugung des Drehmoments mehr Amperewindungen ($I \cdot w$) für die Spule oder ein ganz kleines Richtmoment. Die ältesten Galvanometer für Gleichstrom waren auch nach diesem Gedanken als Nadelgalvanometer gebaut. Eine Magnetnadel ruht wie beim Kompaß auf einer Spitze oder hängt an einem dünnen Faden über einer Skala und wird durch das Feld einer festen, stromdurchflossenen Spule aus der Nord-Süd-Richtung abgelenkt. Der Erdmagnetismus liefert hier die Richtkraft, bei der Fadenaufhängung außerdem noch die Verdrehung des Fadens. Diese Bauart als Galvanometer ist für Gleichstrom aufgegeben worden, denn das Drehspulmeßwerk ist empfindlicher.

2.12 Drehmagnetgerät

=====

Dieses Gerät stellt eine Umkehrung des Drehspulmeßwerks dar. Ein kleiner Magnet bewegt sich im Innern der vom Meßstrom durchflossenen Spule und wird von deren Magnetfeld aus seiner Ruhelage abgelenkt. Die Richtkraft erzeugt ein zweiter feststehender Magnet. Die beiden Ansichten des Bildes 25

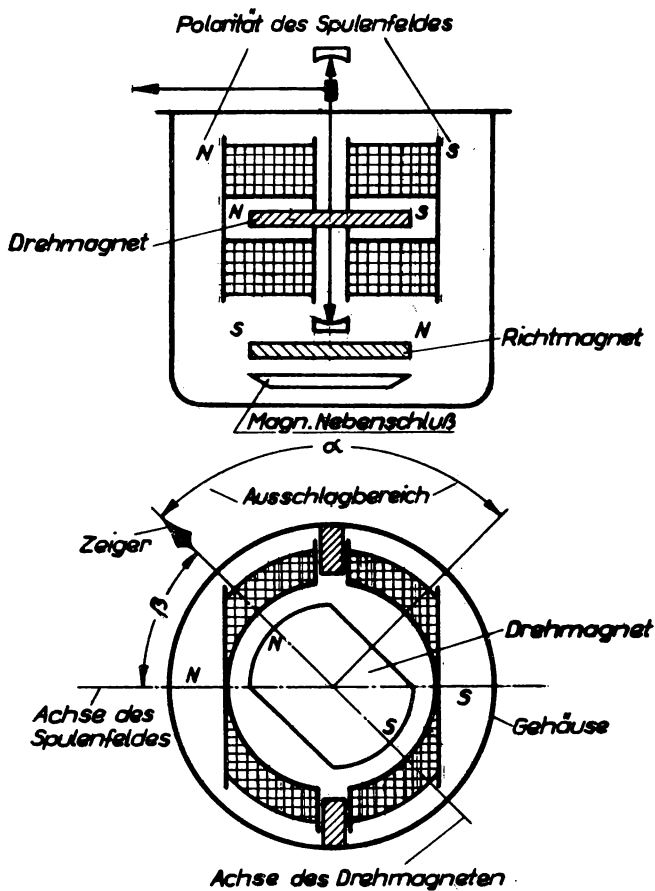


Bild 25 Drehmagnetgerät

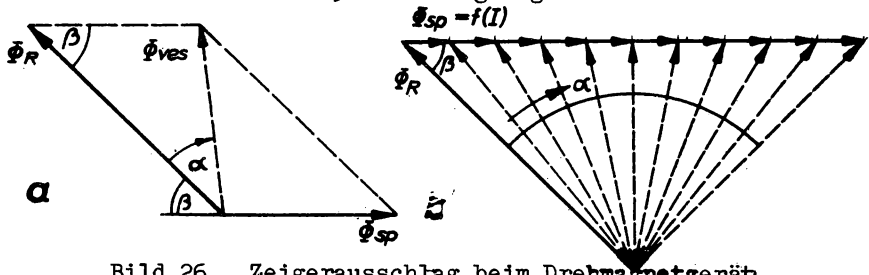


Bild 26 Zeigerausschlag beim Drehmagnetgerät

zeigen den Geräteaufbau. Die Spule ist aus konstruktiven Gründen in zwei gleichsinnig wirkende Teile geteilt. In ihrem Innern ist der Drehmagnet angeordnet, der trotz seiner Kleinheit ein ausreichend kräftiges Magnetfeld erzeugt. Man verwendet hierzu eine Cu-Ni-Fe-Legierung, die den gestellten Anforderungen genügt. Der feststehende Richtmagnet, der unterhalb der Spule angeordnet ist, hat die gleiche Form wie der Drehmagnet und nimmt richtungsmäßig die gleiche Lage ein, wie in der Ausgangsstellung. In der Draufsicht des Bildes 25 ist diese Stellung gezeichnet. Die magnetische Polarität des Richtmagneten muß natürlich der des in der Ausgangslage befindlichen Drehmagneten entgegengesetzt sein. Solange die Spule stromlos ist, wird der Drehmagnet vom Feld des Richtmagneten in dieser Stellung gehalten bzw. nach der Messung hierhin zurückgedreht.

Fließt nun durch die Spule ein Gleichstrom, so entsteht (bei richtiger Polung) ein Spulenmagnetfeld mit der in Bild 25 angegebenen Richtung. Der Drehmagnet, an dessen Achse der Zeiger angebracht ist, stellt sich nun in Richtung des vom Richtmagneten und der Spule gebildeten resultierenden Feldes. Der resultierende Fluß Φ_{res} hat die gleiche Richtung wie der Zeiger. Aus dem Diagramm des Bildes 26 a ist ersichtlich, daß für das schiefwinklige Dreieck aus den Flüssen Φ_R des Richtmagneten, Φ_{Sp} der Spule und Φ_{res} gilt:

$$\text{Nach dem Sinussatz } \frac{\Phi_{res}}{\Phi_{Sp}} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} \text{ und}$$

$$\frac{\Phi_{res}}{R} = \frac{\sin \beta}{\sin [180^\circ - (\alpha + \beta)]}$$

Durch Umformung beider Gleichungen nach Φ_{res} und Gleichsetzung erhält man:

$$\Phi_{Sp} \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \Phi_R \frac{\sin \beta}{\sin [180^\circ - (\alpha + \beta)]} = \Phi_R \frac{\sin \beta}{\sin (\alpha + \beta)}$$

weiterhin ergibt sich:

$$\frac{\Phi_R}{\Phi_{Sp}} \sin \alpha = \sin (\alpha + \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\frac{\Phi_R}{\Phi_{Sp}} = \cos\beta + \cot\alpha \cdot \sin\beta$$

$$\text{oder } \cot\alpha \cdot \sin\beta = \frac{\Phi_R}{\Phi_{Sp}} - \cos\beta, \text{ somit } \cot\alpha = \frac{\frac{\Phi_R}{\Phi_{Sp}} - \cos\beta}{\sin\beta}$$

$$\text{bzw.} \quad \tan\alpha = \frac{\sin\beta}{\frac{\Phi_R}{\Phi_{Sp}} - \cos\beta} \quad (4)$$

=====

Der Ausschlag α wird somit von der konstanten Größe Φ_R des Richtmagneten, dem Spulenfluß Φ_{Sp} und ihrem Kreuzungswinkel β bestimmt. Der Spulenfluß ist seinerseits wieder proportional dem Meßstrom I , wobei man praktisch eine lineare Proportionalität zugrunde legen kann.

In Bild 26 b ist für einen Winkel $\beta = 45^\circ$ die Skalenteilung grafisch ermittelt worden. Der Ausschlagbereich beträgt $\alpha = 90^\circ$. Der Spulenfluß Φ_{Sp} ist in zehn gleiche Teile geteilt. (Das könnte z.B. einer Stromteilung von 10 ... 100 mA entsprechen.) Die sich ergebende Skalenteilung ist symmetrisch und drängt sich am Anfang und Ende etwas zusammen. Bei kleinerem β drängt sich die Skalenteilung am Anfang stärker zusammen und weitet sich gegen Ende. Bei $\beta > 45^\circ$ tritt das Umgekehrte ein.

In der Seitenansicht des Bildes 25 ist unterhalb des Richtmagneten noch ein verstellbarer magnetischer Nebenschluß in Form einer tellerförmigen Eisenscheibe angegeben. Durch Nähern oder Entfernen dieser Scheibe läßt sich zu Abgleichzwecken die Größe des Richtmomentes und damit die Empfindlichkeit in Grenzen von $\pm 15\%$ verstellen. Außerdem bewirkt ein Verdrehen des Richtmagneten eine Nullpunktskorrektur. Das Gerät ist naturgemäß empfindlicher gegen magnetische Fremdfelder als ein Drehspulgerät. Deshalb besitzt es ein Gehäuse aus weichmagnetischem Material mit geringer Koerzitivkraft (Mu-Metall). Dieses Gehäuse bildet gleichzeitig einen magnetischen Rückschluß für das Spulenfeld, was den magnetischen Widerstand dieses mag-

netischen Kreises herabsetzt.

Das Meßwerk, das mit einer Luftdämpfung versehen ist, kann infolge seines einfachen konstruktiven Aufbaus billiger hergestellt werden als das Drehspulgerät. Es entfällt z.B. die Stromzuführung zum beweglichen Organ. Durch seine größere Robustheit ist es gut geeignet zum Einbau in Kraftfahrzeuge. Der Eigenverbrauch ist zwar höher als der des Drehspulgerätes (etwa 10 ... 100 mW), liegt aber noch wesentlich unter dem ebenfalls billigen Dreheisengerät. Solche Geräte werden in der Klasse 1,5 mit den Strommeßbereichen 1 mA ... 25 A und den Spannungsbereichen 60 mV ... 600 V hergestellt.

Lehrbeispiel 3

Ein Drehmagnetgerät, dessen Spule je 1,5 Amperewindungen einen Fluß von 10 nVs erzeugt, soll einen Meßbereich von 100 mA erhalten. Der Flußkreuzungswinkel ist $\beta = 45^\circ$, der Ausschlagbereich umfaßt 90° . Der Fluß des Richtmagneten beträgt 700 nVs. Wie groß ist die Windungszahl der Spule ?

Lösung :

Aus Formel (4) erhält man nach Umformung: $\Phi_{Sp} = \frac{\Phi_R}{\frac{\sin \beta}{\tan \alpha} + \cos \beta}$,

Werte eingesetzt ergibt:

$$\Phi_{Sp} = \frac{700 \text{ nVs}}{\frac{\sin 45^\circ}{\tan 90^\circ} + \cos 45^\circ} = 990 \text{ nVs} \quad I \cdot w = \frac{990 \text{ nVs}}{10 \text{ nVs}/1,5 \text{ Aw}} = 148,5 \text{ Aw}$$

$$w = \frac{148,5 \text{ Aw}}{0,1 \text{ A}} = 1485 \text{ Wdg}$$

Zusammenfassung

=====

Die Bauart fest stehende Spule und drehbarer Magnet bietet Vorteile hinsichtlich Robustheit und Billigkeit und gewinnt besonders als Schalttafelgerät an Bedeutung.

2.2 Kreuzspul - Meßgerät (Quotientenmesser)

2.21 Aufbau und Wirkungsweise.

=====

Sinnbild auf der Skala Nr.2 der Tafel 1. Sie erkennen aus der Skizze (Bild 27), daß es sich wieder um das Drehspul-Meßwerk handelt, aber der erste, auffällige Unterschied ist der, daß jetzt zwei Drehspulen auf der Achse befestigt sind. Der Winkel, den sie bilden, ist fest, schwankt aber bei den verschiedenen Ausführungen zwischen 5° und 90° .

Die eine Spule S_1 ist die normale Meßspule. Sie wird von dem Strom durchflossen, den Sie messen wollen. Die zweite, S_2 , ersetzt die Spiralfedern, die das Richtmoment liefern. Die Stromzuführung zu den Spulen besorgen dünne, praktisch richtkraftlose Bändchen aus Bronze. Die Spule S_2 soll also das Gegenmoment erzeugen, soll, wie man sagt, als elektrische Feder dienen. Darum erhält sie aus einer Batterie konstanten Strom und wird so gepolt, daß sie gegen die Spule S_1 dreht. Sie denken vielleicht: welch ein Aufwand, wenn Spiralfedern die gleiche Wirkung haben. Das hat aber einen Sinn, wie Sie bald sehen werden.

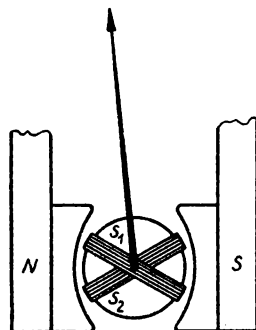


Bild 27
Kreuzspul-Meßwerk

Zunächst müssen Sie überlegen: Wenn die Spule S_2 konstanten Strom bekommt, dann ist auch ihr Drehmoment konstant, solange der Luftspalt konstant ist (2.01). Das darf nicht sein, sondern das Drehmoment muß wie bei der Spiralfeder größer werden, wenn der Zeiger ausschlägt. Der stabile Einstellungspunkt ist dann gegeben, wenn das rechtsdrehende Moment gleich dem linksdrehenden ist (Prinzip der Waage).

Nehmen Sie an, daß die Spule S_2 , die Richtspule, entgegen dem Uhrzeigersinn ein Drehmoment von 5 pcm konstant im ganzen Drehbereich liefert. Erzeugen Sie nun mit der

Spule S_1 , der Meßspule, ein Drehmoment im Uhrzeigersinn, dann wird sich der Zeiger erst bewegen, wenn das Drehmoment der Meßspule größer als 5 pcm wird, und dann gleich bis zum Ende der Skala gehen. Daraus folgt, daß der Luftspalt nicht konstant sein darf. In Bild 27 sehen Sie eine Polschuhform, die bei heutigen Geräten wegen einfacher Herstellung üblich ist. Der Polschuh hat innen eine Zylinderfläche, deren Krümmungsradius seinen Drehpunkt außerhalb der Spulennachse hat.

In Bild 28 sehen Sie die Spulenseiten von S_1 und S_2 im Luftspalt. S_2 zieht nach links, S_1 nach rechts, wie Sie aus den eingezeichneten Stromrichtungen ableiten können. S_1 soll im gezeichneten Moment infolge der Höhe des Meßstroms das Übergewicht haben, die Kreuzspule dreht sich also im Uhrzeigersinn. Nachdem sich das Spulenpaar an der Polschuhmitte vorbeibewegt hat, kommt S_1 in den Bereich kleiner werdender Induktion, weil der Luftspalt sich nach den Polspitzen zu vergrößert; demnach nimmt das Drehmoment der Meßspule ab. Umgekehrt nimmt das Drehmoment der Richtspule zu, die "elektrische Feder" wird gespannt. Sie erkennen, daß der Zeiger nun seine stabile Einstellung bekommt, wenn die Summe der Drehmomente Null ist.

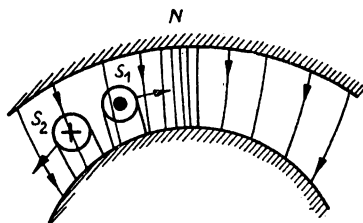


Bild 28 Kraftwirkung im Luftspalt

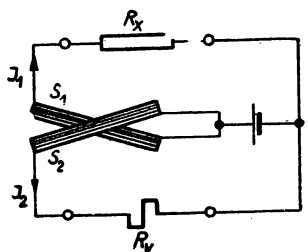


Bild 29 Schaltung als Ohmmeter

Das Drehmoment jeder Spule ist $\sim \mathcal{L} \cdot I \cdot w$. Bei Gleichheit beider Momente ist

$$\mathcal{L}_1 \cdot I_1 \cdot w_1 = \mathcal{L}_2 \cdot I_2 \cdot w_2 \quad \text{oder}$$

$$\frac{I_1 \cdot w_1}{I_2 \cdot w_2} = \frac{\mathcal{L}_2}{\mathcal{L}_1} \quad \mathcal{L}_2/\mathcal{L}_1 \text{ ist nach der Konstruktion}$$

des Luftspalts eine Funktion des Drehwinkels α , also auch

$$\frac{I_1 \cdot w_1}{I_2 \cdot w_2} \quad \text{oder auch} \quad I_1/I_2 = f(\alpha), \text{ d.h.,}$$

das Verhältnis der Spulenströme ist eine Funktion des Zeigerausschlags. Da das Gerät diesen Quotienten mißt, heißt es Quotientenmesser. Speisen Sie beide Spulen aus derselben Spannungsquelle, so ändern sich bei Schwankungen der Spannung die Spulenströme im gleichen Maß; ihr Verhältnis bleibt dasselbe, also ist der Zeigerausschlag von Spannungsschwankungen unabhängig. Sie können mit einer zulässigen Spannungsschwankung von etwa $\pm 20\%$ rechnen. Bei zu niedriger Spannung wird die Einstellsicherheit zu klein (1.22), bei zu hoher Spannung wird die Erwärmung zu hoch.

Bild 29 ist ein vereinfachtes Schaltbeispiel: Eine Batterie speist beide Spulen, die Richtspule über den Manganinwiderstand R_V , die Meßspule über einen äußeren Widerstand R_X . Sie wissen nun, daß das Instrument den Quotienten I_1/I_2 mißt. Da beide Stromkreise an derselben Spannung U liegen, mißt es auch das Verhältnis ihrer Widerstände. Vernachlässigt man den Innenwiderstand der Spannungsquelle, dann kann man für die Schaltung nach Bild 29 schreiben:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{S2} + R_V}{R_{S1} + R_X} = f(\alpha) \quad (5)$$

R_V ist als Meßwiderstand konstant, das Verhältnis der Spulenwiderstände ebenfalls. Demnach entspricht der Zeigerausschlag dem Wert von R_X . Sie können also die Skala direkt in Ohm eichen und sind in obigen Grenzen unabhängig von der Höhe der Batteriespannung.

L e h r b e i s p i e l 4

Bei einem Kreuzspulmeßwerk ist das Stromverhältnis I_1/I_2 am Skalenanfang = 2 und am Skalenende = 0,5. Die Spulenwiderstände sind $R_{S1} = R_{S2} = 100 \text{ Ohm}$. Das Gerät soll 2 Widerstandsmößbereiche erhalten. Der erste beginnt mit Skalenanfangswert 0. (Schaltung nach Bild 29).

Wie groß ist der Skalenendwert und der Widerstand R_V des ersten Bereiches und wie groß sind diese Werte für den zweiten Bereich, wenn R_V hier den siebenfachen Wert des ersten Bereiches hat ?

L ö s u n g :

Nach Formel (5') gilt: $R_V = (R_X + R_{S1}) \frac{I_1}{I_2} - R_{S2}$

$$R_X = (R_V + R_{S2}) \frac{I_2}{I_1} - R_{S1}$$

Demnach ergibt sich für den ersten Bereich ($R_X = 0$) unter Verwendung des Skalenanfangswertes:

$$R_V = (0 + 100) \cdot 2 - 100 = 100 \text{ Ohm}$$

Mit dem Skalenendwert ist $R_X = (100+100) \frac{1}{0,5} - 100 = 300 \text{ Ohm}$

Beim zweiten Bereich ist $R_V = 100 \cdot 7 = 700 \text{ Ohm}$.

Demnach R_X am Skalenanfang = $(700 + 100) \frac{1}{2} - 100 = 300 \text{ Ohm}$

R_X am Skalenende = $(700 + 100) \frac{1}{0,5} - 100 = 1500 \text{ Ohm}$

Eine etwas veränderte Ausführung eines Quotientenmessers ist in Bild 30 dargestellt.

Hier bewegt sich die Meßspule S_1 über den Anzeigebereich in einem konstanten Luftspalt mit radial-homogenem Magnetfeld. Demnach ist für diese Spule die magnetische Induktion \mathcal{L}_1 konstant. Die Richtspule dagegen bewegt sich in einem Magnetfeld, dessen Induktion \mathcal{L}_2 mit zunehmendem

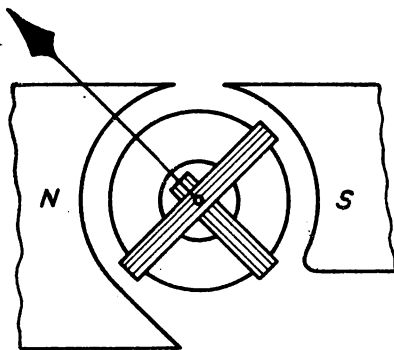


Bild 30 T - Spulmeßwerk

Ausschlag ebenfalls größer wird. Man kann durch entsprechende Formgebung erreichen, daß die Zunahme des Gegendrehmomentes (konstanten Strom I_2 vorausgesetzt)

linear ist. Dann bekommt man die gleichen Verhältnisse wie bei einem normalen Drehspulgerät. Eine Skalenteilung für I_1 würde dann linear sein. Die Ohmskala ist es natürlich nicht. Es besteht aber die Möglichkeit, auch die Ohmskala bei dementsprechender Luftspaltgestaltung praktisch linear zu gestalten.

Etwas müssen Sie noch bedenken: Die "elektrische Feder" braucht Strom. Wenn nun bei der Messung der Strom durch eine Unterbrechung wegbleibt, dann bleibt der Zeiger stehen und geht nicht auf Null zurück, weil es keine Feder gibt. Sie könnten dann eine Fehlmessung machen. Häufig ist daher eine Zeigerrückführung bei Stromlosigkeit vorgesehen. Entweder erhalten die Stromzuführungsbänder eine ganz schwache Richtkraft, die den Zeiger auf eine rote Marke links vom Skalenanfang zurückführt oder es ist ein kleines Relais eingebaut, das bei zu niedriger Spannung eine Rückholfeder freigibt. Durch die mehr oder weniger starke Änderung des Luftspaltes kann man die Verhältnisempfindlichkeit ändern, ebenso durch die Wahl des Winkels zwischen beiden Spulen, so daß die Skalenteilung beeinflußt werden kann. Man kann ferner das Stromverhältnis der Spulen durch Vor- oder Nebenwiderstände verändern.

2.22 Die Anwendung =====

Sie ergibt sich aus dem vorhergehenden Schaltbeispiel, aus dem Sie erkannt haben, daß sich der Aufwand für die elektrische Feder wegen der Unabhängigkeit der Messung von Spannungsschwankungen lohnt. Dieses Beispiel ergibt einen direkt zeigenden Widerstandsmesser. Nehmen Sie für R_x einen stark temperaturabhängigen Widerstandswerkstoff (z.B. Nickel), dann ist sein Ohmwert ein Maß für seine Temperatur. Sie können also die Skala statt in Ohm gleich in Grad Celsius eichen und die Temperatur eines Stoffes mit diesem Widerstandsthermometer fernmessen.

Sie können das Gerät auch zu Fernübertragung von Zeigerstellungen benutzen. Machen Sie R_x feinstufig regelbar und lassen Sie z.B. die Einstellung durch ein Manometer betätigen, so können Sie seine Zeigerstellung auf der Skala des entsprechend geeichten Kreuzspulgeräts ablesen.

Zusammenfassung

=====

Das Kreuzspulgerät mit Dauermagnet ist eine Abart des normalen Drehspulgeräts (2.01). Außer der Meßspule ist eine Richtspule vorhanden, die an Stelle der Spiralfedern als "elektrische Feder" das Richtmoment liefert. Beide Spulen liegen gekreuzt auf gemeinsamer Achse und bewegen sich in einem ungleichmäßigen Luftspalt, wodurch sich die stabile Einstellung ergibt. Gemessen wird das Verhältnis der beiden gegeneinander gerichteten Drehmomente, das dem Verhältnis der Spulenströme entspricht (Quotientenmesser). Die Anzeige ist in weiten Grenzen spannungsunabhängig, was eine vorteilhafte Anwendung als Widerstandsmesser (Ohmmeter), als Temperaturanzeigegerät (Widerstandsthermometer) und zur Fernübertragung von Meßgrößen ermöglicht.

Übungen

=====

18. Welches sind die baulichen Kennzeichen des Kreuzspulmeßwerks mit Dauermagnet ?
19. Was erreicht man mit der Kreuzspulbauart ?
20. Welche Anwendungen des Kreuzspulmeßwerks kennen Sie ?

2.3 Dreheisen - Meßwerk

2.31 Aufbau und Wirkungsweise

=====

Sie wissen, daß eine stromdurchflossene Spule wie ein Magnet wirkt und ein bewegliches Eisenstück anzieht. Bei der in Bild 31 dargestellten Anordnung versucht die vom Meßstrom durchflossene Spule, das an einer Schraubenfeder hängende Eisenstück in ihr Inneres zu ziehen. Versieht man die Anordnung mit einem Zeiger und einer Skala, so können damit Ströme angezeigt und nach Eichung der Skala auch gemessen werden.

Die Feder erzeugt dabei die Rückkraft und führt den Zeiger nach Abschaltung des Meßstromes in die Ausgangslage zurück. Dieser Stromzeiger funktioniert bei Gleich- und Wechselstrom, denn auch ein magnetisches Wechselfeld der Spule zieht das Eisenstück an. Man muß nur verhindern, daß das Eisenstück dabei im Takte des Wechselfeldes zu schwingen beginnt. Die Schwin-

gung wird vermieden, wenn die mechanische Trägheit des beweglichen Systems (Feder-Eisenstück) groß ist gegenüber der Häufigkeit des Polwechsels vom Magnetfeld. Dies ist aber schon bei 50 Hz-Wechselstrom mit 100-fachem Magnetpolwechsel leicht zu erreichen, ohne daß die Zeigerbewegung bei der Anzeige zu träge erscheint. Bild 31 zeigt die älteste Form eines solchen Stromzeigers, die heute jedoch durch die Dreheisen-Bauart - wie sie in den nachstehenden Absätzen beschrieben wird - überholt ist. Das Sinnbild auf der Skala heutiger Geräte (Nr.3 der Tafel 1 Lbf.1) weist noch auf die frühere Bauart hin.

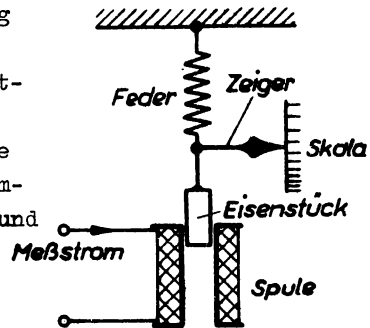
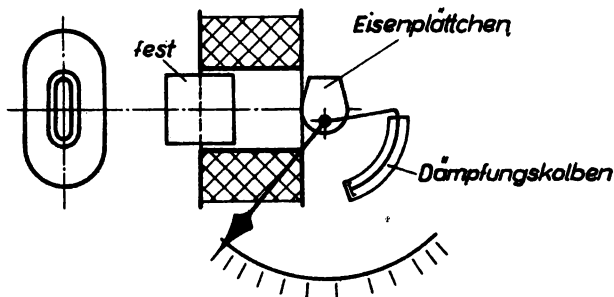


Bild 31 Stromzeigeranordnung

2.311 Flachspul-Meßwerk

Wie das Bild 32 wiedergibt, wird bei dieser Bauart ein exzentrisch gelagertes drehbares Eisenplättchen vom Magnetfeld



gegen die Wirkung einer

Bild 32 Flachspulmeßwerk

Gegenkraft (= Richtkraft) in die feststehende Flachspule hineingedreht. Die Gegenkraft wird heute meist von einer Spiralfeder (im Bild 32 nicht mitgezeichnet) ausgeübt. Der Spulenkörper ist aus Isolierstoff. Die Drehachse des Eisenplättchens trägt den Zeiger, der sich über einer Skala bewegt, damit eine Ablesung des Zeigerausschlages erfolgen kann. Die auf das Eisenplättchen ausgeübte Anziehungskraft wird bestimmt nach einer Formel, die Ihnen aus den Lehrbriefen "Grundlagen der Elektrotechnik" als Näherungsformel bekannt ist:

$$P = \left(\frac{B}{5000} \right)^2 F.$$

Hierin ergibt sich P in kp, wenn F in cm² und B in der absoluten Einheit Gauß eingesetzt werden. Die Einheit Gauß ist neuerdings gesetzlich nicht mehr zulässig. Setzt man B in Vs/cm² ein und formt die Gleichung so um, daß man die Kraft P in p erhält (F weiterhin in cm² eingesetzt), so ergibt sich $P \approx 4000 \cdot B^2 \cdot F$. Die Anziehungskraft ist also abhängig von der Magnetflußdichte B und dem Querschnitt des Magnetflusses F. Die Flußdichte B ist für eisenlose Spulen

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot w}{l}.$$

Sie ist also, da μ_0 und w konstante Größen sind, proportional dem Meßstrom I, wenn man zunächst vom Einfluß der

mittleren Kraftlinienlänge l absieht. Somit ist in erster Näherung die Kraft P und damit auch das zugehörige Drehmoment proportional I^2 . Da aber das Gegendrehmoment der Spiralfeder praktisch linear proportional dem Ausschlag ist, so besteht bei Gleichheit der Drehmomente (= ablesbare Zeigereinstellung) Proportionalität zwischen dem Ausschlag α und dem Quadrat des Meßstromes I^2 . Hieraus geht auch hervor, daß die Anzeige auch bei Wechselstrom erfolgt, denn das Stromquadrat ist stets positiv.

Daraus darf man aber nicht schließen, daß die Skala eine exakt quadratische Teilung besitzt. Das Spulenfeld ist nicht homogen. Das Drehmoment ändert sich mit der Lage des Eisenplättchens und hängt weiterhin ab von der Form und den Abmessungen desselben. Dabei spielt noch die Magnetisierung des Eisenplättchens und somit seine Magnetisierungskurve eine Rolle. Man kann für den Ausschlag folgende Beziehung aufstellen:

$$\alpha = c \cdot f(I^2) \quad (6)$$

Hierin ist c eine Konstante, die von den Abmessungen der Spule bestimmt wird. $f(I^2)$ ist eine zunächst unbekannte Funktion des Stromquadrates. Da man mit der Form des Eisenplättchens den Skalenverlauf beeinflussen kann, strebt man durch entsprechende Formgebung häufig eine möglichst lineare Skalenteilung an, die jedoch nur annähernd erreicht wird. Es ist möglich, das Feld der Spule durch einen zweiten festen Eisenkern zu verstärken und damit die Empfindlichkeit zu erhöhen. Durch Verschieben dieses Kernes ergibt sich eine gewisse Empfindlichkeitsregelung. Allerdings wird auch von diesem Kern der Skalenverlauf beeinflusst.

Damit der Zeiger bei der Anzeige nicht unzulässig oft um den Meßwert schwingt, versieht man die Geräte mit einer Luftdämpfung. Diese kann mit Hilfe eines Dämpfungskolbens (Bild 32) oder eines Dämpfungsflügels (Bild 33) geschehen.

2.312 Rundspul-Meßwerk

Während bei dem oben beschriebenen Flachspultyp die Zeigerbewegung durch magnetische Anziehung erfolgt, geschieht dies beim Rundspultyp durch magnetische Abstoßung. Das Magnetfeld wird vom Meßstrom in einer feststehenden runden Spule, die im Bild 33 aufgeschnitten

dargestellt ist, erzeugt. In ihrem Innern sind zwei Eisenbleche k_1 und k_2 angeordnet. Davon ist das Blech k_2 fest an der Innenwand des Spulenkörpers angebracht.

Das Blech k_1 dagegen kann sich um die Zeigerachse drehen. Es ist mit ihr fest verbunden. Durch das Magnetfeld werden beide Eisenbleche gleichpolig magnetisiert und stoßen sich gegenseitig ab.

Dadurch dreht sich das bewegliche Blech mit der Zeigerachse soweit, bis das Gegendrehmoment der Spiralfeder f gleich dem von der Abstoßung erzeugten geworden ist. Der Spulenkörper besteht aus Isolierstoff. Es kommt aber mitunter vor, daß aus konstruktiven Gründen

und um die mechanische Empfindlichkeit des Gerätes herabzusetzen, die Bleche k_1 und k_2 im Innern eines Metallzylinders aus Messing oder Aluminium untergebracht sind, um den dann die Spule außen herum-

liegt. Ein solcher Metallzylinder ist zur Vermeidung von Wirbelströmen mit Längsschlitz versehen, oder seine Längsseiten überlappen sich, wobei zwischen der Überlappung ein dünnes Blatt aus Isolierstoff liegt. Das erzeugte Drehmoment ist abhängig vom Produkt der Polstärken, beider Eisenbleche, ihrer Form, ihrer gegenseitigen Lage im Magnetfeld und schließlich von der Feldverteilung, die wiederum von den Magnetisierungseigenschaften der Bleche beeinflusst wird.

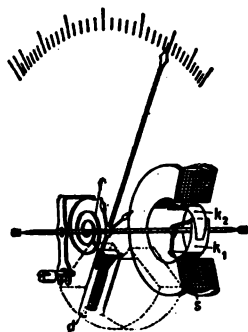


Bild 33 Rundspul-Meßwerk

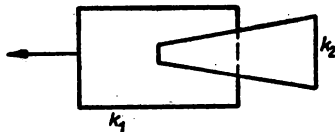


Bild 34 Eisenbleche des Rundspul-Meßwerkes

Man kommt für den Ausschlagwinkel zur gleichen Beziehung wie beim Flachspulstyp: $\alpha = c \cdot f (I^2)$. Wie schon erwähnt, wird die Dämpfung mittels eines Dämpferflügels d bewirkt. Da die Form der Eisenbleche den Skalenverlauf beeinflusst, ist das bewegliche Blech k_2 meist keilförmig gestaltet (vgl. Bild 34).

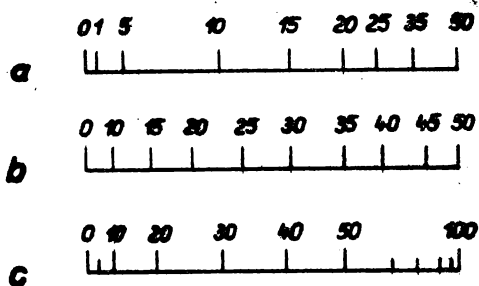
2.32 Eigenschaften der Dreheisengeräte

und ihre Fehlergrößen.

2.321 Skalenverlauf

Der Verlauf des Drehmomentes und der Skalenteilung lassen sich praktisch nicht vorausberechnen. Man findet die Skalenteilung empirisch.

Durch Wahl der Eisensorte und entsprechende Formgebung versieht man je nach Verwendungszweck die Geräte mit entsprechenden Skalenteilungen. Bei Schalt-



tafelgeräten ist Bild 35 Skalen von Dreheisengeräten die Skala ganz am

Anfang meist zusammengedrängt, wird dann weiter und drängt sich gegen Ende wieder etwas zusammen. Ihr erster ablesbarer Anfangswert beträgt etwa 3% des Endwertes (Bild 35a). Labor- und Prüffeldgeräte haben ab 20% des Endwertes eine annähernd lineare Skala (Bild 35). Schließlich gibt es noch die Skala der überstromsicheren Geräte, die mit etwa 10 ... 20% des Endwertes beginnt, dann annähernd linear verläuft und am Ende einen zusammengedrängten Überlastbereich hat (Bild 35c). Von der Überlastbarkeit ist weiter unten noch die Rede.

2.322 Eigenverbrauch

Da hier nur das vom Meßstrom hervorgerufene Magnetfeld wirksam wird, ist der Eigenverbrauch recht groß. Er beträgt 0,5 ... 1 VA. Das ist das 10^5 - bis 10^6 -fache gegenüber einem Drehspulgerät. Das Dreheisengerät kann daher in energiearmen Stromkreisen nicht zur Anwendung kommen, da es die zu messende Größe hier stark verändert. Für den Endausschlag benötigt ein Dreheisenmeßwerk eine durch die mechanischen Eigenschaften des beweglichen Systems bedingte magnetische Durchflutung $H = I \cdot w$. Ihre Größe liegt für die handelsüblichen Geräte bei 250 bis 300 Amperewindungen. Damit sind auch der kleinste und der größte Meßbereich der Meßwerke gegeben. Die untere Grenze ist bedingt durch den praktisch noch verwendbaren kleinsten Drahtdurchmesser und die obere Grenze vor allem durch die Felder der Zuleitungen, denn die Meßwerke mit sehr großem Strommeßbereich haben nur noch eine Windung aus sehr starkem Draht. Die Strommeßbereiche gehen von 50 mA bis etwa 300 A und die Spannungsbereiche liegen zwischen 5 V und 600 V. In der Regel haben die Spulen der Strommesser geringere Windungszahlen als die Spannungsmesser.

2.323 Fehlergrößen

Daß das Dreheisengerät für Gleich- und Wechselstrom zu verwenden ist, war schon klar gestellt. Wie sieht es aber mit der Skalenteilung und deren Abweichung zwischen beiden Stromarten bei sonst gleichem Meßbereich aus ? Bei Wechselstrom wird zur Anzeige im Meßwerk der Effektivwert wirksam und der Gerätwiderstand erhöht sich gegenüber Gleichstrom um den induktiven Blindwiderstand der Spule. Setzt man voraus, daß der Wechselstrom sinusförmig ist, so ergibt sich durch die Hysterese-Schleife des Eisens (Bild 36) folgende Wirkung: Messen Sie eine Meßreihe zunächst bei steigendem, dann bei fallendem Gleichstrom, deren Werte (durch ein Drehspulfeinmeßgerät kontrolliert) auf- wie

abwärts gleich sind, so stellen Sie fest, daß die Anzeigewerte im letzten Fall höher liegen. Die Ursache liegt in der Remanenz des Eisens. Dieser Hysteresefehler zeigt sich bei Gleichstrom durch die angegebenen Unterschiede bei Aufwärts- und Ab-

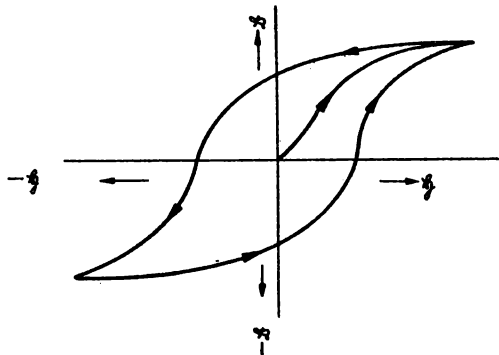


Bild 36 Hystereseschleife

wärtseichnung und er bedingt auch Unterschiede zwischen der Gleichstromanzeige und der Wechselstromanzeige. Bei Wechselstrom fällt dagegen der Einfluß der Remanenz weg. Sie können bei der Eichung mit Gleichstrom den Mittelwert von beiden Stromrichtungen nehmen und dadurch den Fehler verkleinern. Eine wirksame Verringerung gelang aber erst, nachdem man die remanenzarmen Nickel-Eisen-Legierungen für die Eisenkerne zur Verfügung hatte. Mit dem einfachen und robusten Dreheisen-Meßwerk kann man heute für Prüffeld und Labor Feinmeßgeräte bis zur Klasse 0,5 und bei besonderer Sorgfalt auch Klasse 0,2 herstellen.

Für den Temperatureinfluß gilt dasselbe wie bei dem Drehspulgerät; allerdings müssen Sie bedenken, daß der Verbrauch der Feldspule erheblich höher ist (etwa 1 W). Überlegen Sie, woran das liegt, denken Sie an die Bauart !

Der Frequenzfehler macht sich am wenigsten beim Strommesser bemerkbar, denn die Selbstinduktion der Spule mit ihren verhältnismäßig wenigen Windungen ist gering. Die in den Eisenplättchen und den evtl. nahe liegenden Metallteilen induzierten Wirbelströme hingegen fälschen die Anzeige durch die entmagnetisierende Wirkung. Beim Spannungsmesser kommt dazu die Wirkung des an sich schon höheren induktiven Widerstandes ωL der Spule, der im Gegensatz zum Strommesser bei steigendem ω die Stromaufnahme verringert und damit einen Rückgang der Spannung vortäuscht. Die Ab-

hilfe durch Kompensation haben Sie in Lehrbrief 1 kennengelernt.

Die Kurvenform bei Abweichung von der bei der Eichung zugrunde gelegten Sinusform verursacht Minusfehler. Eine verzerrte Kurve bedeutet, daß der Sinuskurve der Grundwelle Oberwellen überlagert sind. Infolgedessen tritt der Frequenzfehler auf. Durch einen hohen Scheitelwert der verzerrten Kurve kann das Sättigungsgebiet des Eisens erreicht werden. Nehmen Sie an, Sie wären bei Nennstrom und reiner Sinuslinie bei ihrem Scheitelwert $I \cdot \sqrt{2}$ gerade noch auf dem geradlinigen Teil der Magnetisierungskurve, dann muß bei der verzerrten, etwa nach Bild 37 auftretenden Kurve die Induktion im Eisen bereits auf dem flachen Teil der Magnetisierungskurve liegen, wenn der Strom den Scheitelwert der Sinuslinie überschreitet. Das bedeutet, daß die Magnetisierung der Eisenplättchen schwächer wird, als es dem Stromanstieg entspricht, d.h., der Zeigerausschlag wird zu klein. Man kann diesen Fehler vermeiden, wenn man mit der Maximalinduktion bei Sinusstrom nicht zu hoch geht.



Bild 37 Sinuskurve und verzerrte Kurve

Der Fremdfeldeinfluß ist wegen des verhältnismäßig kleinen Spulenfeldes groß. (Feldlinien verlaufen größtenteils in Luft!) Darauf müssen Sie bei der Messung achten! Wollen Sie Fehlanzeigen durch starke Fremdfelder vermeiden, dann kommen nur die in Lehrbrief 1 (1.23) genannten Hilfsmittel in Frage: Astasierung, oder Abschirmung des Meßwerkes oder beides zusammen, falls Sie nicht in genügender Entfernung vom Störfeld messen können.

Den Aufbau eines astatistischen Dreheisenegerätes erkennen Sie aus Bild 38, das einen Schnitt durch ein solches Gerät wiedergibt. Das Bild 39 zeigt Ihnen die prinzipielle Wirkungsweise: Es sind zwei Flachspulsysteme übereinander

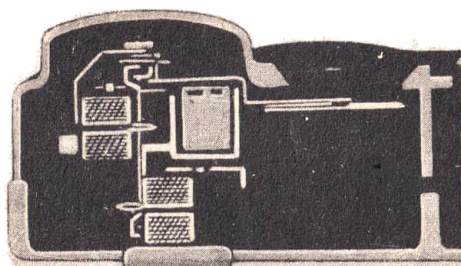


Bild 38 Schnitt durch ein astatisches Meßwerk

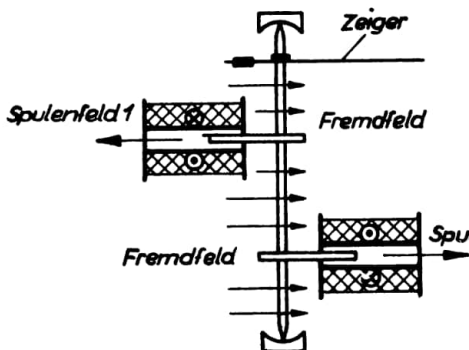


Bild 39 Astatisches Dreheisenengerät (Flachspulentyt)

angeordnet. Die beiden Eisenplättchen sitzen so auf der Zeigerachse, daß bei Stromfluß durch beide Spulen die Drehbewegung beider in gleicher Richtung verläuft. Die Ströme durch die Spulen fließen dabei wie im Bild 39 angegeben, so daß die Spulenfelder 1 und 2 einander entgegengesetzte Richtung aufweisen. Ein magnetisches Fremdfeld wirkt, wenn es den angegebenen Verlauf hat, in der Spule 1 ausschlagverkleinernd, da Spulenfeld 1 und das Fremdfeld entgegengesetzte Richtung haben. In der Spule 2 wirkt das Fremdfeld infolge gleicher Richtung mit dem Spulenfeld 2 ausschlagvergrößernd. Der Fremdfeldeinfluß wird aber dadurch nicht vollständig beseitigt. Die Geräte der Klasse 0,2 erhalten noch eine wirksame Abschirmung aus 0,5 bis 1 mm starken Blechen aus hochpermeabler Legierung. Es ist natürlich auch möglich, ein astatisches Gerät aus zwei Rundspulensystemen aufzubauen.

2.324 Überlastbarkeit.

Die Überlastbarkeit von Dreheisenengeräten ist höher als bei Drehspulgeräten. Sie brauchen nicht Rücksicht auf stromführende Spiralfedern zu nehmen und hinsichtlich der mechanischen Beanspruchung des beweglichen Organs bei Überstrom ist die Sättigung des Eisens vorteilhaft. Überstromsichere

Strommesser mit enger Teilung am Skalenende (vgl. Bild 35c) kann man sogar so bauen, daß der Zeigerausschlag von einem bestimmten Überstromwert ab wieder etwas zurückgeht. Wenn Sie die Zeigerachse ein wenig aus der Spulenmitte heraus verlagern, so daß sich das bewegliche Eisen bei der Drehung mehr und mehr nach der Spulenmitte zu bewegt, dann bleibt der Zeiger schließlich stehen und kehrt bei weiterer Stromsteigerung um. Das bewegliche Eisen wird nämlich vom Spulenrand angezogen, weil dort die Feldstärke größer ist als in der Spulenmitte. Dadurch entsteht ein zunehmend linksdrehendes Moment, während das rechtsdrehende im Sättigungsgebiet nur noch wenig ansteigt. Die Summe beider Drehmomente ergibt die beschriebene Wirkung.

2.33 Meßbereicherweiterung

=====

2.331 Übersicht

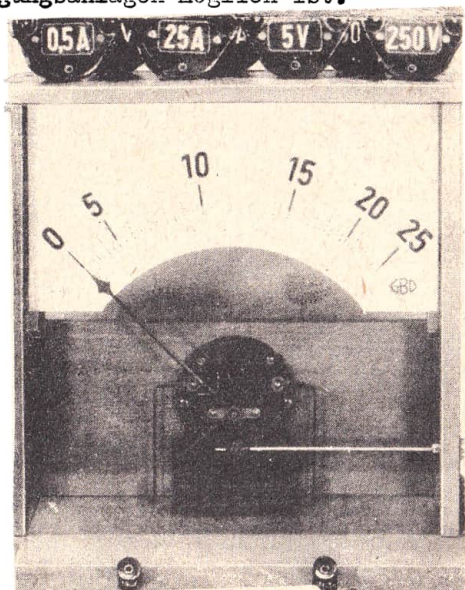
Grundsätzlich hat man beim Dreheisengerät die gleichen Möglichkeiten der Bereichserweiterung wie beim Drehspulgerät. Dabei ist jedoch zu beachten, daß der Eigenverbrauch der Dreheisenmeßwerke sehr viel größer ist als der von Drehspulgeräten. Eine Bereicherweiterung mit Hilfe von Vor- und Nebenwiderständen wird daher besonders bei größeren Erweiterungen unwirtschaftlich. Nehmen Sie einmal für den Endausschlag eines Gerätes eine Leistungsaufnahme von 1 W an, so steigt z.B. bei 40-facher Erweiterung der Eigenverbrauch auf 40 W (!) an. Weiterhin entsteht bei Strommessern durch Nebenwiderstände eine starke Frequenzabhängigkeit der Anzeige infolge des Unterschiedes der Phasenwinkel vom Nebenwiderstand, der nahezu Null ist und dem Scheinwiderstand der Spule, die eine verhältnismäßig große Phasenverschiebung erzeugt. Man verzichtet deshalb auf die Verwendung von Nebenwiderständen und unterteilt die Spule, deren Teile parallel oder in Reihe geschaltet werden (vergl. Bild 42). In diesem Falle kann man sogar erreichen, daß die Leistungsaufnahme für jeden Bereich gleich

ist, also trotz Strommeßbereicherweiterung nicht ansteigt. Oder man versieht die Spule mit mehreren Anzapfungen, deren einzelne Teile dann häufig mit unterschiedlichen Drahtstärken gewickelt sind, um unzulässige Erwärmungen zu vermeiden und andererseits die Spule nicht zu groß werden zu lassen (Bild 41).

Bei Spannungsmessern kann man ebenfalls durch Teilung der Spule die Bereiche verändern. Es wird allerdings manchmal auch ein praktisch temperaturkonstanter und wegen des Frequenzeinflusses bei Wechselstrom induktionsfreier Vorwiderstand genommen. Denn hier macht sich durch Erwärmung eine Erhöhung des Spulenwiderstandes bemerkbar, was zu Anzeigegehlern führt. Ein Vorwiderstand wirkt kompensierend. Außerdem setzt bei der Herstellung der kleinste noch verwendbare Drahtdurchmesser und die höchste noch zulässige Wickelkörpergröße manchmal eine Grenze nach oben, die mit einem Vorwiderstand überschritten werden kann. Allerdings muß dann der erhöhte Eigenverbrauch in Kauf genommen werden, was z.B. in Energieversorgungsanlagen möglich ist.

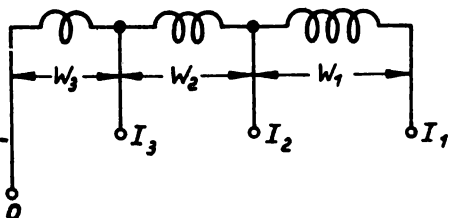
Bei Meßgerätemodellen für Unterrichts- und Demonstrationszwecke wird meist die ganze Spule gegen eine andere ausgetauscht, die man auf einen die Eisenplättchen umschließenden Hohlzylinder aufschiebt. Naturgemäß kann hierbei die Genauigkeit nicht besonders groß sein, denn die Eichung der Skala kann nur annähernd für alle Spulen stimmen. Das Bild 40 zeigt Ihnen ein solches Dreheisendemonstrationsgerät

Bild 40 Dreheisendemonstrationsgerät



2.332 Strommesser

Bei der Berechnung der Windungszahlen von unterteilten Strommesserspulen geht man von der bereits erwähnten Tatsache aus, daß für ein bestimmtes Meßwerk die für den Endausschlag erforderliche



Amperewindungszahl festliegt, ganz gleich welchen Strommeß-

Bild 41 Dreheisenstrom-

bereich das Gerät erhält. Das heißt, daß das Produkt aus dem Bereichendwert und der jeweiligen Windungszahl für jeden Bereich dieses Gerätes dasselbe ist:

$$\textcircled{H} = I \cdot w = \text{konst.} \quad (7)$$

Nachstehendes Beispiel soll Ihnen dies erläutern.

Lehrbeispiel 5

Für den nach Bild 41 geschalteten Dreheisenstrommesser gilt entsprechend Formel (7)

$$\textcircled{H} = I_3 \cdot w_3 = I_2 \cdot (w_2 + w_3) = I_1 \cdot (w_1 + w_2 + w_3) \quad (7a)$$

Der Strommesser soll die Gleichstrombereiche 0,3 A, 1,5 A und 6 A erhalten. Die Stromdichte darf 1,5 A/mm² nicht übersteigen. Die für Endausschlag benötigte Durchflutung beträgt 270 Aw. Wie groß sind die Windungszahlen der Wicklungsteile w_1 , w_2 , w_3 und mit welchen Drahtdurchmessern sind diese zu wickeln?

Lösung:

Aus (7a) erhält man $w_3 = \frac{\textcircled{H}}{I_3} = \frac{270 \text{ Aw}}{6 \text{ A}} = 45 \text{ Wdg}$

entsprechend $w_2 = \frac{270 \text{ Aw}}{1,5 \text{ A}} - 45 \text{ Wdg} = 135 \text{ Wdg}$

$$w_1 = \frac{270 \text{ Aw}}{0,3 \text{ A}} - 45 \text{ Wdg} - 135 \text{ Wdg} = 720 \text{ Wdg}$$

Die Drahtquerschnitte erhält man aus den Bereichendwerten und der maximalen Stromdichte, aus ihnen ergeben sich die berechneten Durchmesser:

$$F_3 = \frac{I_3}{s_3} = \frac{6 \text{ A}}{1,5 \text{ A/mm}^2} = 4 \text{ mm}^2 \hat{=} 2,257 \text{ mm Durchmesser}$$

$$F_2 = \frac{1,5 \text{ A}}{1,5 \text{ A/mm}^2} = 1 \text{ mm}^2 \hat{=} 1,128 \text{ mm Durchmesser}$$

$$F_1 = \frac{0,3 \text{ A}}{1,5 \text{ A/mm}^2} = 0,2 \text{ mm}^2 \hat{=} 0,505 \text{ mm Durchmesser}$$

Zum Wickeln wählt man den jeweils nächstgrößeren Normdurchmesser nach DIN 46 431:

$$d_1 = 0,55 \text{ mm} \quad \text{mit } F_1 = 0,238 \text{ mm}^2$$

$$d_2 = 1,15 \text{ mm} \quad \text{mit } F_2 = 1,04 \text{ mm}^2$$

$$d_3 = 2,3 \text{ mm} \quad \text{mit } F_3 = 4,16 \text{ mm}^2$$

Interessant ist es nun, den Eigenverbrauch dieses Meßgerätes zu untersuchen. Wie schon erwähnt, zeigt dieses Gerät ein anderes Verhalten als bei der Bereicherweiterung durch Nebenwiderstände. Betrachten Sie nachstehendes Lehrbeispiel!

Lehrbeispiel 6

Berechnen Sie für jeden Meßbereich des Gerätes nach Lehrbeispiel 5 die Leistungsaufnahme bei Endausschlag ! Die mittleren Windungsdurchmesser betragen:

für Wicklungsteil w_1 : $d_{m1} = 60 \text{ mm}$	Die Wicklungen bestehen aus Kupferdraht mit $\rho = 0,0178 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
für Wicklungsteil w_2 : $d_{m2} = 40 \text{ mm}$	
für Wicklungsteil w_3 : $d_{m3} = 20 \text{ mm}$	

L ö s u n g :

Die Längen der Wicklungsteile sind:

$$l_1 = d_{m1} \cdot \pi \cdot w_1 = 60 \text{ mm} \cdot \pi \cdot 720 = 136 \text{ m}$$

entsprechend

$$l_2 = 40 \text{ mm} \cdot \pi \cdot 135 = 17 \text{ m} ,$$

$$l_3 = 20 \text{ mm} \cdot \pi \cdot 45 = 2,83 \text{ m}.$$

Die Widerstände der Wicklungsteile ergeben sich wie folgt:

$$R_1 = \frac{l_1 \cdot \rho}{F_1} = \frac{136 \text{ m} \cdot 0,0178 \Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}}{0,238 \text{ mm}^2} = 10,2 \Omega$$

entsprechend

$$R_2 = \frac{17 \cdot 0,0178}{1,04} = 0,291 \Omega$$

$$R_3 = \frac{2,83 \cdot 0,0178}{4,16} = 0,0121 \Omega$$

Aus den Strömen und den Widerständen erhält man die Leistungen:

Für den 0,3 A-Meßbereich mit der Wicklung $w_1 + w_2 + w_3$ ist

$$N_1 = 0,3^2 \text{ A}^2 (10,2 + 0,291 + 0,0121) \Omega = 0,946 \text{ W},$$

für den 1,5 A-Bereich mit der Wicklung $w_2 + w_3$ ist

$$N_2 = 1,5^2 (0,291 + 0,0121) \Omega = 0,683 \text{ W},$$

und für den 6 A-Bereich mit der Wicklung w_3 ist

$$N_3 = 6^2 \cdot 0,0121 \Omega = 0,436 \text{ W}.$$

Sie erkennen hieraus, daß im Gegensatz zur Meßbereichserweiterung durch Nebenwiderstände der Eigenverbrauch nicht mit zunehmender Erweiterung ansteigt. In obigem Beispiel sinkt er sogar ab.

2.333 Spannungsmesser

Die Berechnung der Spule eines Spannungsmessers geht praktisch genau so vor sich wie beim Strommesser, nur daß aus dem Strom bei Endausschlag und dem Widerstand R sich nach dem Ohmschen Gesetz der Spannungsbereich ergibt. (Bei Wechselstrom ist natürlich der Betrag des Scheinwiderstandes einzusetzen.) Da Spannungsmesser einen möglichst großen Eigenwiderstand besitzen sollen, wird die Spule aus möglichst dünnem Draht mit großer Windungszahl gewickelt sein. Hinzu kommt - je nach Meßbereichgröße - noch ein Vorwiderstand, der ebenfalls für mehrere Bereiche unterteilt sein kann.

Lehrbeispiel 7

Mit wieviel Windungen und welchem Wickeldrahtdurchmesser ist die Spule eines Dreheisenspannungsmessers zu wickeln, dessen Meßbereich 70 V betragen soll ? Die erforderliche Durchflutung ist 300 Aw groß und der Eigenverbrauch soll 0,77 W betragen. Die Berechnung ist für Gleichspannung auszuführen, wobei die Stromdichte $1,5 \text{ A/mm}^2$ zugrunde liegen soll. Berechnen Sie außerdem den Temperaturfehler der Spule, die aus Cu-Draht gewickelt ist, für eine Erwärmung von 15 grd !

L ö s u n g :

$$I = \frac{0,77 \text{ W}}{70 \text{ V}} = 0,011 \text{ A} \quad w = \frac{300 \text{ Aw}}{0,011 \text{ A}} = 27 \ 250 \text{ Wdg}$$

$$F = \frac{0,011 \text{ A}}{1,4 \text{ A/mm}^2} = 0,00785 \text{ mm}^2 \quad \hat{=} 0,1 \text{ mm Durchmesser}$$

Der Temperaturfehler $F_T = \alpha \cdot \Delta \theta$, wobei hier $\alpha = \alpha_{\text{Cu}}$

= $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/grd}$ ist. Somit

$$F_T = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/grd} \cdot 15 \text{ grd} = 5,85 \cdot 10^{-2} = 5,85 \%$$

Nach Erwärmung um 15 grd ist also der Anzeigefehler um 5,85% größer geworden.

Lehrbeispiel 8

Der Spannungsmesser des vorstehenden Beispiels soll durch einen Vorwiderstand R_V , der als praktisch temperaturkonstant angesehen werden soll, auf einen Meßbereich von 280 V erweitert werden. Wie groß ist R_V und wie groß wird jetzt der Temperaturfehler für eine Erwärmung von 15 grd ?

L ö s u n g :

Hier kann die aus Lehrbrief 1 bekannte Formel (6) angewendet werden:

$$R_V = R_g (n - 1)$$

$$n = \frac{280 \text{ V}}{70 \text{ V}} = 4 \quad R_g = \frac{70 \text{ V}}{0,011 \text{ A}} = 6363 \Omega$$

$$R_v = 6363 \Omega (4 - 1) = 19\,089 \Omega$$

$$\text{Der Temperaturfehler } F_T = \alpha \cdot \Delta t$$

Nach der Formel (2) des Lehrbriefes 1 erhält man α mit den hier verwendeten Formelbuchstaben wie folgt:

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{Cu}} \cdot R_g + \alpha_v \cdot R_v}{R_g + R_v}$$

Da R_v als temperaturkonstant angesehen werden soll, ist

$\alpha_v = \text{Null}$ zu setzen.

$$\alpha_{\text{Cu}} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/grd.} \quad \text{Somit ist}$$

$$\alpha = \frac{3,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/grd} \cdot 6363 \Omega + 0}{(6363 + 19089) \Omega} = 0,975 \cdot 10^{-3} \text{ 1/grd}$$

Nun ist der Temperaturfehler:

$$F_T = 0,975 \cdot 10^{-3} \text{ 1/grd} \cdot 15 \text{ grd} = 1,46 \cdot 10^{-2} = 1,46\%$$

Der Temperaturfehler ist gegenüber dem vorhergehenden Beispiel von 5,85% auf 1,46% gesunken.

Untersucht man noch den Eigenverbrauch des erweiterten Meßgerätes, so kommt man auf den Wert

$$N = 280 \text{ V} \cdot 0,011 \text{ A} = 3,08 \text{ W.}$$

Das ist aber das 4-fache des Eigenverbrauchs, den das Gerät vor der Erweiterung hatte. Man hätte den Eigenverbrauch N auch durch Multiplikation des vorherigen Leistungswertes mit dem Erweiterungsfaktor n erhalten:

$$N = 0,77 \text{ W} \cdot 4 = 3,08 \text{ W.}$$

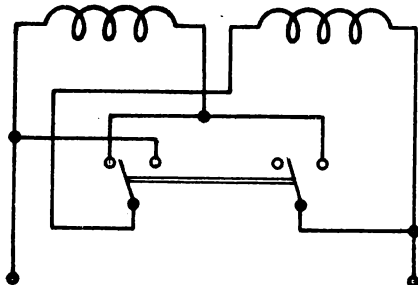


Bild 42 Dreheisengerät mit umschaltbaren Spulenteilen

2.334 Meßbereicherweiterung durch Wandler.

Bei Wechselstrom lassen sich alle möglichen Meßbereiche durch Meßwandler erreichen. Wandler sind speziell für Meßwerke gebaute Transformatoren, die eine weitgehende Anpassung von Meßinstrumenten an erforderliche Meßbereiche ermöglichen. Der Vielfach-Stromwandler (Bild 43) ist solch ein Meßwandler zur Messung hoher Ströme mit einem einzigen Strommesser für 5 A. Die Meßwandler werden im späteren Lehrbrief behandelt. Zum Verständnis der Anwendung sei hier nur gesagt:

Sie schalten die Primärwicklung in den Stromkreis und das Instrument an die Sekundärklemmen. Ist das Umsetzungsverhältnis des Stromwandlers z.B. 100 A : 5 A, dann fließen bei 100 A primär durch das Instrument 5 A. Bei diesem Vielfach-Wandler (Bild 43) können Sie mehrere Umsetzungsverhältnisse durch verschiedene primäre Windungszahlen herstellen. Zwei Primärwicklungen (für

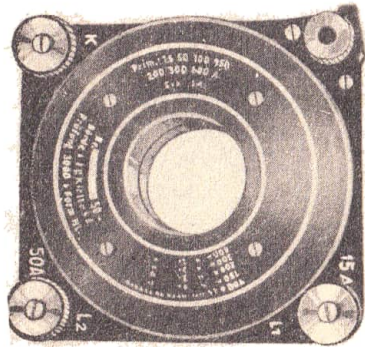


Bild 43 Präzisions-Vielfach-Stromwandler

15 A und 50 A) befinden sich auf dem ringförmigen Kerneisen, abgedeckt durch das Isolierstoffgehäuse; für 100 A, 150 A, 200 A und 300 A Nennstrom primär stellen Sie die Wicklung vor der Messung selbst her, indem Sie mitgelieferte Kabel durch das Loch des Gehäuses um den Kern wickeln. Dabei ist jeweils die Windungszahl vorgeschrieben, die im Loch gezählt wird. Bei 600 A wird nur ein gerader Leiter durch das Loch gesteckt, der eine halbe Primärwindung darstellt. Dasselbe haben Sie bei dem sog. DIETZE-Anleger (Bild 44). Meßgerät und Stromwandler sind zusammengebaut. Der Eisenkern des Stromwandlers besteht aus zwei Teilen, die, durch Isoliergriffe zangen-

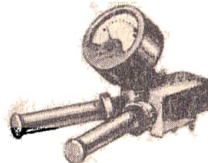


Bild 44 DIETZE-Anleger

artig geöffnet, über den Primärleiter geschoben und dann geschlossen werden. Zur Messung in Hochspannungsanlagen sind die Isoliergriffe entsprechend lang ausgeführt.

Meßwandler für Spannungsmesser sind die Spannungswandler, die bei Anlagen über 500 V vorgeschrieben sind, damit die Meßgeräte Niederspannung erhalten. Dieser Wandler ist ein Umspanner kleiner Leistung, aber mit großer Genauigkeit bezüglich des Verhältnisses Ober- zu Unterspannung. Bei diesen Geräten werden die Primärklemmen an die Hochspannung und die Sekundärklemmen an das Instrument angeschlossen. Seine Anzeige mit dem Untersetzungsverhältnis des Wandlers multipliziert ergibt die Primärspannung. Bei Schalttafelgeräten ist die Skala gleich nach der Hochspannung geeicht. Für Labor und Prüffeld gibt es umschaltbare Spannungswandler für mehrere Meßbereiche. Die Sekundärspannung der Wandler ist auf 100 V genormt, bei älteren Anlagen haben Sie noch 110 V und dementsprechend auch die Instrumente für 110 V bei der Nenn-Oberspannung.

Zusammenfassung

=====

Beim Dreheisen-Meßwerk wird ein bewegliches Eisenstück durch das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule abgelenkt.

Die Rundspul- und die Flachspultype unterscheiden sich sowohl durch die Spulenform als auch durch die Form und die Anordnung des festen und beweglichen Eisens.

Der Ausschlag ist grundsätzlich dem Quadrat des Stromes proportional. Der Skalenverlauf kann durch die Form und durch die Lage der Eisenkerne zueinander dem praktischen Bedürfnis weitgehend angepaßt werden. Das Meßwerk ist für Gleich- und Wechselstrom geeignet. Durch das Vorhandensein von Eisen im magnetischen Feld macht sich der Hysteresefehler bemerkbar.

Bei Wechselstrommessungen tritt der Frequenzfehler auf.

Abweichung von der Sinusform bedingt den Kurvenformfehler, der erhebliche Fehlanzeigen ergibt, wenn durch Stromspitzen das Sättigungsgebiet des Eisens erreicht wird.

Gegen Fremdfelder schützt nur Astasierung, noch besser magnetische Abschirmung.

Den Meßbereich können Sie beim Spannungsmesser durch Vorwiderstände oder (nur bei Wechselstrom) durch Spannungswandler erweitern; beim Strommesser wären zwar Nebenwiderstände außer bei Hochspannung möglich, aber wegen der Verluste unwirtschaftlich. Daher: Für wenige Meßbereiche Umschaltung der unterteilten Feldspule bei tragbaren Meßgeräten, brauchbar für Gleich- und Wechselstrom. Für Wechselstrommessungen allein ist der Anschluß an einen Vielfach-Stromwandler vorteilhaft, der wesentlich mehr Meßbereiche ermöglicht.

Übungen

=====

21. Warum ist die Empfindlichkeit des Dreheisen-Meßwerkes wesentlich kleiner als die des Drehspulgerätes ?
22. Warum wird durch Sättigung des Kerneisens die Skala am oberen Ende zusammengedrängt ?
23. Sie messen die Stromaufnahme einer Glühlampe mit Wechselstrom und mit Gleichstrom, jedesmal mit konstanter Spannung 220 V. Das benutzte Dreheisengerät zeigt aber verschiedene Werte an. Woran liegt das ?
24. Jemand will einen Dreheisen-Spannungsmesser für 50 Hz an eine Spannung von 500 Hz anschließen und erbittet Ihre Meinung. Was erklären Sie ?
25. Warum ist das Dreheisenmeßwerk gegen Fremdfeldeinfluß empfindlicher als das Drehspulgerät ?
26. Ein Dreheisenmeßwerk benötigt zum vollen Zeigerausschlag 280 Aw. Es soll einen Gleichspannungsbereich

von 300 V erhalten. Um eine gute Temperaturfehlerkompensation zu erreichen, ist vor die Spule ein Manganinwiderstand zu schalten, der 9 mal so groß ist wie der Spulenwiderstand. Der gesamte Leistungsverbrauch des Gerätes einschließlich Vorwiderstand soll 12 W betragen. Wie groß sind Spulenwiderstand, Vorwiderstand und die Windungszahl der Spule und wie groß ist der Temperaturfehler für eine Erwärmung von 15 grd ? Die Temperaturkoeffizienten sind $\alpha_M = 4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/grd}$, $\alpha_{Cu} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/grd}$.

27. Welche Gleichstrommeßbereiche lassen sich mit einem Dreheisengerät erzielen, das nach der Schaltung gemäß Bild 42 aufgebaut ist ? Das Meßwerk benötigt zum Endausschlag 268 Aw. Die Widerstände der beiden gleichen Wicklungsteile $w_1 = w_2$ sind $R_1 = R_2 = 5 \Omega$ und die mittleren Windungsdurchmesser sind $d_{m1} = d_{m2} = 50 \text{ mm}$ groß. Die Spule besteht aus Cu-Draht ($\rho = 0,0178 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$) in dem bei Endausschlag eine Stromdichte von $1,2 \text{ A/mm}^2$ herrscht.

Antworten und Lösungen

=====

1. Im engen Luftspalt läßt sich durch den starken Magnet eine hohe Induktion erzielen. Das Drehmoment M ist proportional der Induktion \mathcal{L} mal dem Strom I , so daß eine hohe Empfindlichkeit erzielt wird.
2. Durch den im Bereich des Ausschlags konstanten Luftspalt, also durch konstantes \mathcal{L} , so daß M eine lineare Funktion von I ist.
3. Die Spannung an der Lampe ist niedriger, nämlich um den Spannungsabfall durch den Regler, durch die Leitungen und durch den Strommesser.

4. Die Summe der beiden Lampenströme und des rechten Spannungsmessers.
5. $1000\text{A} \cdot 0,060\text{ V} = 60\text{ W}$.
6. Das Röhrrchen würde zu stark dämpfen und das Trägheitsmoment erhöhen.
7. Kleine Richtkraft, langer Lichtzeiger.
8. Hohes Trägheitsmoment des beweglichen Organs durch Zusatzmasse.
9. Nicht direkt, sondern nur nach Umformung in Gleichstrom durch Zusatzgeräte (Gleichrichter, Thermo- und Fotoumformer).
10. Beim Drehspulmeßwerk mit Gleichrichter, das den arithmetischen Mittelwert des Wechselstroms mißt, während die Skala aber den Effektivwert der Sinuskurve angibt.
11. Nein, der Frequenzfehler durch die Kapazität des Gleichrichters wird zu groß.
12. Der Ausschlag entspricht der durch den Meßstrom erzeugten Wärmemenge. Ein Gleichstrom erzeugt dieselbe Wärmemenge wie ein Wechselstrom mit gleichem Effektivwert. Beim Thermokreuz jedoch muß wegen des PELTIER-Effekts das Mittel aus zwei Gleichstromeichungen genommen werden.
13. Durch Absorption von Licht in einer auf ein Kupfer- oder Eisenblech aufgetragenen Kupfer (I)-oxyd- bzw. Selenschicht werden Elektronen aus dieser Schicht in das Metall getrieben. Dadurch entsteht eine Urspannung zwischen diesem Metall und der lichtdurchlässigen metallenen Gegenelektrode über der Halbleiterschicht.
14. $R_T = 4 \cdot 10\ \Omega = 40\ \Omega$ $R = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{5\text{ mA} (10+40)\ \Omega}{7\text{ mA} - 5\text{ mA}} = 125\ \Omega$

Für Bereich I_2 ist $R_1 = R_V$ nach (7):

$$R_1 = \frac{125\ \Omega (14-1) - 50\ \Omega}{14} = 112,5\ \Omega$$

denn hierin ist $n = \frac{70\text{ mA}}{5\text{ mA}} = 14$

Für Bereich I_3 ist $R_3 = R_p \quad n = \frac{700 \text{ mA}}{5 \text{ mA}} = 140$
 $R_3 = \frac{50 \Omega + 125 \Omega}{140} = 1,25 \Omega$

$$R_2 = 125 \Omega - 112,5 \Omega - 1,25 \Omega = 11,25 \Omega$$

$$(R_g + R_T) \parallel R = \frac{50 \Omega \cdot 125 \Omega}{50 \Omega + 125 \Omega} = 35,7 \Omega$$

$$R_1' = 35,7 \Omega \left(\frac{7 \text{ V}}{0,25 \text{ V}} - 1 \right) = 965 \Omega$$

$$R_2' = 35,7 \Omega \frac{70 \text{ V} - 7 \text{ V}}{0,25 \text{ V}} = 9000 \Omega$$

$$N_T = (5 \text{ mA})^2 \cdot 40 \Omega = 1 \text{ mW}$$

$$N_1 = (5 \text{ mA})^2 \cdot 112,5 \Omega = 2,81 \text{ mW}$$

Beachten Sie: Der Maximalstrom durch $R_1 = 5 \text{ mA}$!

$$N_2 = (65 \text{ mA})^2 \cdot 11,25 \Omega = 47,5 \text{ mW}$$

$$N_3 = (695 \text{ mA})^2 \cdot 1,25 \Omega = 0,605 \text{ W}$$

$$N_1' = (7 \text{ mA})^2 \cdot 965 \Omega = 47,3 \text{ mW}$$

$$N_2' = (7 \text{ mA})^2 \cdot 9000 \Omega = 0,442 \text{ W}$$

15. $0,1 \text{ V} : 1 \text{ mA} = 100 \Omega$

$$100 \Omega = 34 \Omega + \frac{(15 \Omega + R_g + 120 \Omega)(40 \Omega + 54,29 \Omega)}{15 \Omega + R_g + 120 \Omega + 40 \Omega + 54,29 \Omega} \quad R_g = 85 \Omega$$

16. Nach (2) ist $I_g = 3,33 \cdot 0,3 \text{ mA} = 1 \text{ mA}$

$$R_g = \frac{1,5 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 1,5 \text{ k} \Omega$$

$$\text{aus } R_n = \frac{I_g \cdot R_g}{I - I_g} \text{ erhält man } I = \frac{1 \text{ mA} \cdot 1,5 \text{ k} \Omega}{750 \Omega} + 1 \text{ mA}$$

$$= 3 \text{ mA} \quad N = 3 \text{ mA} \cdot 1,5 \text{ V} = 4,5 \text{ mW}$$

17. $R_V = 2,3 \cdot 4 \Omega - 3,3 = 5,9 \Omega$ Die Thermourspannung muß betragen: $E = 1 \text{ mA} (4 + 5,9 + 3,3) \Omega = 13,2 \text{ mV}$

Bei 100 grad Erwärmung erzeugt das Thermoelement

$$4,16 + 1,44 = 5,6 \text{ mV}$$

$$= \frac{13,2 \text{ mV}}{5,6 \text{ mV}/100 \text{ grad}} = 236 \text{ grad} \quad \text{Temperatur} = 22^\circ \text{C} + 236 \text{ grad}$$

$$= 258^\circ \text{C}$$

18. Zwei gekreuzte Spulen sitzen fest auf derselben Achse, eine Meß- und eine Richtspule (als elektrische Feder wirkend), beide drehen sich zusammen in einem inhomogenen Feld (Luftspalt nicht konstant). Es genügt aber auch, wenn sich nur die Richtspule im inhomogenen Feld bewegt.
19. Es wird das Verhältnis zweier Ströme gemessen, das weitgehend von der Spannung unabhängig ist.
20. Widerstandsmesser, Widerstandsthermometer, Fernübertragung von Stellungsanzeigen.
21. Das magnetische Feld geht größtenteils durch Luft, so daß mehr A_w zur Drehmoment-Erzeugung nötig sind.
22. Im flachen Teil der Magnetisierungskurve steigt die Magnetisierung des Eisens mit wachsendem Strom nur wenig; das bedeutet Abnahme der Empfindlichkeit.
23. Allein an der Remanenz des Kerneisens, wenn die Spannungskurve praktisch sinusförmig ist.
24. Das für 50 Hz geeichte Gerät hat bei 500 Hz einen größeren Scheinwiderstand und erhöhte Wirbelstromverluste, daher Minusfehler.
25. Die durch die Feldspule erzeugte Induktion ist kleiner.
26. Der Spulenwiderstand beträgt 750 Ω , der Vorwiderstand 6750 Ohm. Die Spule hat 7000 Windungen. Der Temperaturfehler beträgt $0,64 \cdot 10^{-2} = 0,64 \%$.

27. $R = \frac{1 \cdot \varphi}{F}$. Hierin ist einzusetzen:

$$1 = dm \cdot \pi \cdot w$$

$$F = \frac{I}{s} , \text{ wobei noch für } w \text{ einzusetzen ist:}$$

$$w = \frac{s \cdot (4)}{I}$$

Die Gleichung umgeformt nach I ergibt :

$$I = \sqrt{\frac{dm \cdot \pi \cdot \varphi \cdot s \cdot (4)}{R}}$$

Bei Reihenschaltung gilt $R_1 + R_2 = 10 \text{ Ohm}$, somit ist der Meßbereich $I_r = 0,3 \text{ A}$. Die Windungszahl eines

Spulenteils ist dann $w_1 = w_2 = \frac{268 \text{ Aw}}{2 \cdot 0,3 \text{ A}} = 447 \text{ Wdg.}$
 Bei Parallelschaltung gilt $268 \text{ Aw} = 0,3 \text{ A} \cdot 447 \text{ Wdg.}$
 $+ 0,3 \text{ A} \cdot 447 \text{ Wdg.}$ Durch beide Spulenteile fließen
 je $0,3 \text{ A}$. Der Gesamtstrom und damit der zweite Meßbe-
 reich $= I_p = 0,6 \text{ A}$.

Quellenverzeichnis der Bilder =====

Werkfoto VEB Gerätewerk Karl-Marx-Stadt

Bild 9, 15, 16

Werkfoto VEB EAW Berlin-Treptow

Bild 20, 21

Zeitschrift "Deutsche Elektrotechnik" Heft 10/1955 S.360

Bild 25

Weickert, Hochspannungsanlagen, 7.Auflage,

Fachbuchverlag, Leipzig 1951:

Bild 33

Prospektfoto der Firma Gebrüder Bässler, Radebeul 1,

Ernst-Thälmann-Str.12-19 , Druckblatt Nr. L 6,

Bild 40

Varduhn-Nell , Handbuch der Elektrotechnik, Band II,

2.Auflage, Fachbuchverlag Leipzig 1951:

Bild 44

INGENIEUR
FERNSTUDIUM

5016—03/60

S C H R Ö D E R

**MESSTECHNIK
FÜR
ELEKTROTECHNIKER**

3

H E R A U S G E B E R
ZENTRALABTEILUNG FACHSCHULFERN-
UND ABENDSTUDIUM DES
MASCHINENBAUES DRESDEN

Herausgeber:
Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues Dresden

Meßtechnik für Elektrotechniker

Lehrbrief 3

5. Auflage

von

Dipl.-Ing. Walter Schröder

1960

Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues, Dresden

Bestell -Nr. 5016 – 03 /60

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur -Fernstudium

Ag 616/ 23 /60

VORWORT

Ich habe mich in den Lehrbriefen 1 und 2 eingehend mit den Grundformen elektrischer Meßwerke beschäftigt.

Ich gebe Ihnen der Zeiger aber nur den Meßwert im Augenblick der Ablesung an. Wollen Sie wissen, wie er sich mit der Zeit ändert, dann müssen Sie wohl oder übel mit der Uhr in der Hand die Skala beobachten und die Meßwerte in bestimmten Zeitabschnitten notieren. Das setzt voraus, daß die Schwankungen langsam genug sind, um richtig ablesen zu können. Dann können Sie auf Grund der notierten Werte eine Kurve zeichnen, die die Meßgröße abhängig von der Zeit darstellt.

Wenn aber die Kurve täglich zur laufenden Betriebskontrolle vorliegen muß oder wenn es sich um Schwingungen handelt, denen das Auge nicht folgen kann, dann muß das Meßgerät selber die Kurve zeichnen.

Handelt es sich um die Aufzeichnung der betriebsmäßig vorkommenden Schwankungen eines Effektivwertes oder arithmetischen Mittelwertes, also um die Meßgrößen, die ein zeigendes Instrument infolge der Trägheit des beweglichen Organs anzeigen kann, dann brauchen Sie die Ihnen bekannten Meßwerke nur noch mit einer zusätzlichen Schreibeinrichtung zu versehen. Die grundsätzlich möglichen Ausführungen der *schreibenden Meßgeräte* werden Sie im folgenden kennenlernen.

Wenn Sie jedoch die schnellen Änderungen eines Wechselstromes genau als gezeichnete Kurve sehen wollen, dann muß das bewegliche Organ eine so geringe Masse haben, daß es den ihm aufgezwungenen Schwingungen folgen kann. Das Aufzeichnen muß der trägheitslose Lichtstrahl besorgen. Wir kommen somit zu den *Momentanwert-Messern*, den *Oszillographen*. Die wichtigsten Angaben über diese Meßgeräte finden Sie in diesem Kapitel.

Schließlich werden die *Meßwandler* zur Herabsetzung hoher Ströme und Spannungen für Meßzwecke, die in Lehrbrief 2 nur erwähnt wurden, behandelt.

Teil III: Schreibende Meßgeräte

1. Kapitel: Schreibverfahren

11 Tinte und Feder. Die Aufzeichnung eines veränderlichen Meßwertes scheint kein Problem zu sein: Sie befestigen am Zeiger eine Bleistiftmine und lassen darunter ein Papier mit konstanter Geschwindigkeit ablaufen. So einfach geht es aber doch nicht.

Erstens schreibt die Zeigerspitze mit dem Bleistift einen Kreisbogen auf das Papier. Sie erhalten demnach das Diagramm nicht in rechtwinkligen Koordinaten, da die Ordinate bogenförmig und die Abszisse (der Zeitmaßstab) geradlinig ist. Das erschwert die Übersichtlichkeit und die Auswertung der geschriebenen Kurve. Wie dem abgeholfen wird, werden Sie später sehen.

Was meinen Sie zu der Bleistiftmine? Vorteile wären die Einfachheit, die geringe Masse und die hohe Schreibgeschwindigkeit, ohne daß der Strich dünner wird oder gar aussetzt. Ein schwerwiegender Nachteil ist die große Reibung auf dem Papier, die doch vom Meßwerk ein höheres Drehmoment verlangt und die Empfindlichkeit herabsetzt. Außerdem wird der Strich zu dick. Eine Mine mit einem entsprechenden Durchmesser von 0,1 bis 0,2 mm wäre zu zerbrechlich.

Von einer guten Schreibvorrichtung muß man demnach fordern: Geringe Reibung, dünner, aber gut sichtbarer Strich auch bei der höchsten vorkommenden Schreibgeschwindigkeit und geringes Gewicht, damit das Trägheitsmoment des beweglichen Organs nicht zu sehr erhöht wird.

Die Aufzeichnung durch eine Feder mit kleinem Tintenvorrat (Bild 1) hat sich gut bewährt, wenn dem Meßwerk genügend Strom zugeführt werden kann, um das wegen der Reibung erhöhte Drehmoment zu erzeugen. Wenn Sie aber der Stromquelle den erhöhten Verbrauch, der häufig das Zehnfache der Aufnahme eines nur anzeigenden Gerätes ist,

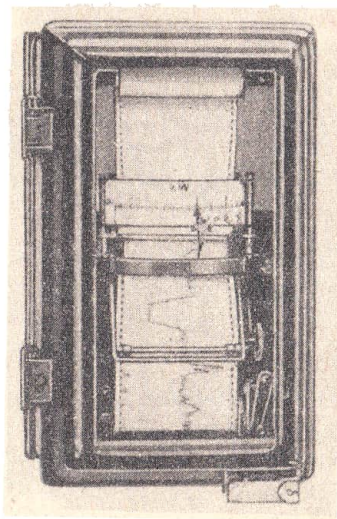
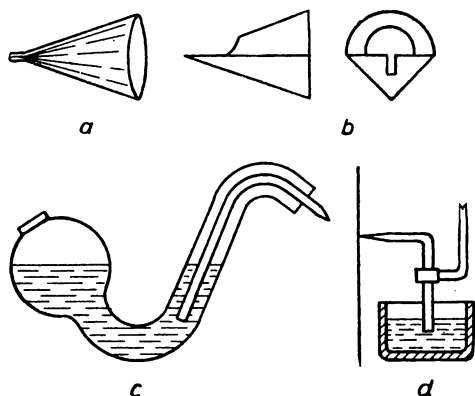


Bild 1. Tintenschreiber
für Schalttafelauflaufbau

nicht zumuten können, dann müssen Sie eine reibungslose Methode anwenden, die später beschrieben wird. Das ist z. B. der Fall bei den kleinen Strömen, die ein Thermoelement liefern kann.

Bild 2 zeigt einige Formen von Schreibfedern für eine senkrecht ablaufende Papierbahn. Die Feder ist an dem Zeiger mit einer Klemmvorrichtung befestigt, so daß sie leicht zur Reinigung und zur Füllung mit Tinte abgenommen werden kann. 2a ist die Skizze der *Kegelfeder*, eines



Hohlkegels mit einer Öffnung von etwa 0,07 mm \varnothing an der Spitze. Mit einer Pipette können Sie etwa 0,5 g Tinte einfüllen, die durch Adhäsion festgehalten wird und beim Schreiben durch die feine Öffnung nach Bedarf auf das Papier austritt. Dadurch ist eine Schreibgeschwindigkeit bis zu 1 m/s möglich, ohne daß der Strich aussetzt. Allerdings ist er nicht unter 0,2 mm dick und verbraucht mehr Tinte als die bei 2b dargestellte *Schlitzfeder*, deren Form Sie aus der Seiten-

Bild 2. Schreibfedern für schreibende Meßgeräte

ansicht und der Vorderansicht erkennen. Sie hat vorn einen Schlitz, etwa wie bei der Feder eines Füllhalters, und liefert einen feineren Strich, der aber bei schnellen Schwankungen leicht aussetzen kann. Daraus ergibt sich die Anwendung:

Die *Kegelfeder* nehmen Sie, wenn mit starken Schwankungen der Meßgröße zu rechnen ist, damit die Kurve sicher ohne Unterbrechung geschrieben wird. Dabei müssen Sie den Papiervorschub so groß wählen, daß die Linien nicht ineinanderlaufen.

Die *Schlitzfeder* ist dagegen mit ihrem feineren Strich bei langsamen Änderungen geeignet. Sie schreibt mit dem gleichen Tintenvorrat länger. Dieser kann wegen des Gewichtes der Tinte nur beschränkt sein, reicht aber bei einem Papiervorschub von 30 oder 20 mm/h etwa ein bis zwei Wochen. Erzeugt das Meßwerk ein starkes Drehmoment, wie z. B. das FERRARIS-Meßwerk (Lbf. 2, 8. Kapitel), dann kann der Vorrat vergrößert werden.

Bild 2c ist die Skizze einer gläsernen *Kapillarfeder mit Vorratskugel*. Ein anderer Weg ist bei der Ausführung nach 2d beschrieben. Sie sehen eine

gläserne *Kapillarfeder mit feststehendem Tintentrog*, der quer über die Papierbahn reicht. Bewegt wird also nur das Kapillarröhrchen, das mit der fein ausgezogenen Spitze das Papier berührt und die Tinte hochsaugt. Allerdings tritt im Trog Flüssigkeitsreibung auf. Die Röhrchen werden in verschiedenen Größen zur Auswahl der erforderlichen Strichstärke hergestellt.

Die Tinte ist nicht etwa gewöhnliche Füllhaltertinte, die eintrocknen würde, sondern ist im wesentlichen ein Gemisch von Glyzerin mit Wasser und Alkohol, dem Methylviolett als Farbe zugesetzt ist. Diese blaue Tinte hat sich am besten bewährt. Für kurzzeitige Versuche können Sie schwarze Tinte nehmen, falls Sie Pausen vom Diagramm machen wollen, denn die blaue Tinte gibt keine guten Pausen.

Zur Reinigung der Federn wird ein geeignetes Gerät mitgeliefert.

[1] Punktierung durch Fallbügel. Die Nachteile der Aufzeichnung mit Feder und Tinte, nämlich vor allem die Vergrößerung des Zeigergewichts und der Reibung, können Sie vermeiden durch das im Schema (Bild 3) dargestellte Verfahren. Der Fallbügel drückt periodisch, in Abständen von 10, 20 oder 30 %, den Zeiger auf das Papier, wobei durch ein zwischengeschaltetes Farbband ein Punkt auf dem Papier markiert wird. Bei einer anderen Konstruktion läuft das Papier unter dem Zeiger nicht über die gezeichnete Rolle, sondern über eine von dem Farbband bedeckte gerade Kante. Der Punkt kommt dadurch auf die Unterseite des Papiers, das durchscheinend ist, so daß der Punkt auch auf der Vorderseite sichtbar wird.

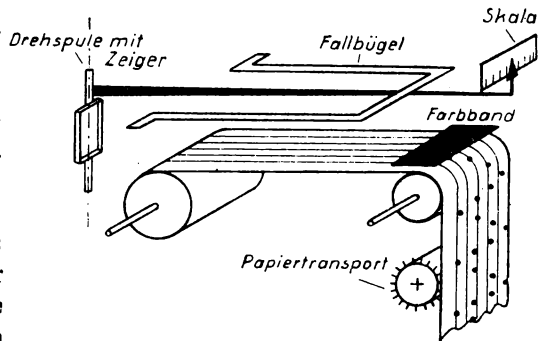


Bild 3. Fallbügel-Schreibgerät

Das Meßwerk ist also von der Schreibarbeit entlastet. Der Zeiger bewegt sich wie bei einem anzeigenden Gerät frei über dem Papier. Die Kraft für die Markierung des Punktes liefert der Antrieb, der auch den Papieranschub besorgen muß. Natürlich ist das Zeigerende verstärkt und unten scharfkantig ausgeführt.

Sofort nach der Aufzeichnung des Punktes hebt sich der Fallbügel und gibt den Zeiger wieder frei, so daß er sich auf den jetzt gültigen Meßwert einstellen kann. Sie können diese Markierung mit dem Anschlag der Schreibmaschinentaste, die den Punkt schreibt, vergleichen. Nach normalerweise 20 s folgt ein neuer Niederschlag des Fallbügels. So entsteht auf dem Papier eine *Folge von Punkten*, die Sie zu einer Linie ergänzen können.

Sie erkennen daraus, daß dieses Verfahren *bei starken Schwankungen der Meßgröße ungeeignet* ist, da die Aufzeichnung nur in zeitlichen Abständen erfolgt. Sie werden es daher nur wählen, wenn sich die Meßgröße langsam ändert und für das Meßwerk nur kleine Leistungen zur Verfügung stehen. Das ist z. B. bei wärmetechnischen Meßgeräten der Fall. Denken Sie an die Messung der Temperatur in einem Ofen mit einem Thermoelement. Dort ist die Wärmeträgheit so groß, daß die Temperatur sich sicher nicht sprunghaft ändern wird. Deshalb kommen Sie auch meistens mit einem stündlichen Papiervorschub von 20 mm aus. 1 mm Vorschub entspricht dann 3 min, bei einer Punktfolge von 20 s werden in 3 min 9 Punkte markiert. Sie haben also auf 1 mm Streifenlänge 9 Punkte. Das ergibt bei nicht zu großen Schwankungen das Bild einer zusammenhängenden Linie. Einen besonderen Vorteil haben Sie aber bei diesem Verfahren durch die Möglichkeit, auf dem Papierstreifen mehrere Meßgrößen von demselben Meßwerk aufzeichnen zu lassen. Das führt zu dem nächsten Abschnitt.

[3] Mehrfarbensreiber. Sie wollen z. B. die Temperaturen mehrerer Öfen überwachen. Bis zu 6 Meßstellen können Sie dann mit einem einzigen Instrument registrieren. Sobald ein Punkt geschrieben ist, wird das Meßwerk durch einen *eingebauten Umschalter* selbsttätig auf eine andere Meßstelle umgeschaltet. Beim nächsten Niedergang des Fallbügels wird also der von dieser Meßstelle kommende Wert auf dem Papier als Punkt markiert. Zur besseren Unterscheidung wird dabei *selbsttätig ein anderes Farbband* unter den Zeiger geschoben. Auf diese Weise haben Sie beim Sechsfarbensreiber 6 verschiedenfarbige Punktreihen, z. B. in den Farben Schwarz, Violett, Blau, Grün, Braun und Rot. Bild 4 erläutert schematisch die Wirkungsweise. Ein Synchronmotor besorgt über ein Getriebe den zeitgerechten Papiervorschub, wenn die Frequenz des Netzes nach der Uhrzeit geregelt wird oder wenn die Frequenzschwankungen unerheblich sind. Über die anderen Antriebsmöglichkeiten wird noch berichtet werden. Sie sehen die Kurvenscheibe, die den Fallbügel periodisch hebt und senkt. Auf dieser Welle sitzt rechts der Kurbeltrieb für das Malteserkreuz auf der darunter befindlichen Welle. Wenn Sie sich mit der Kinetik etwas beschäftigt haben, wissen Sie vermutlich, daß man mit diesem Getriebe

das schrittweise Vorrücken der Filmbildchen erzielt. Hier werden damit die zwei Meßstellen-Umschalter auf den beiden Wellenenden betätigt, wenn der Zeiger durch den Fallbügel festgehalten wird. Gleich darauf wird der Zeiger freigegeben, so daß er sich sofort auf den Meßwert der neuen Meßstelle einstellen kann. In diesem Moment wird auch ein anderes Farbband mittels der Kurvenscheibe vorgeschoben. In der Skizze ist nur ein Farbband auf dem Farbbandhalter eingezeichnet. Durch die mit den Ziffern 1 bis 6 beschriftete Scheibe können Sie von außen erkennen, welche Meßstelle gerade eingeschaltet ist.

Sie haben vielleicht Bedenken, daß der Meßstellen-Umschalter keinen einwandfreien Kontakt gibt. Sie hätten nicht unrecht, denn Kontakte sind am ehesten eine Störungsquelle, besonders hier, weil durch Oxydbildung und Verschmutzung Übergangswiderstände geschaffen werden können, die Fehlmessungen hervorrufen. Die Schalter werden daher besonders sorgfältig und mit *Kontakten aus Edelmetall* ausgeführt. Sie müssen auch die Beanspruchung des *Zeigers* bedenken, der periodisch auf Biegung durch den Fallbügel beansprucht wird. Auch die normale Spitzenlagerung der Drehspule würde das auf die Dauer nicht aushalten.

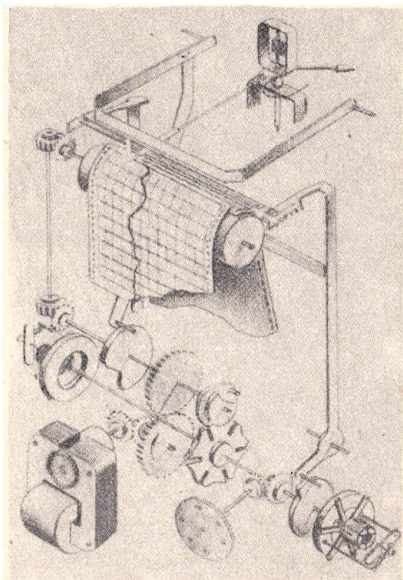


Bild 4. Wirkungsweise eines Mehrfarben-Punktschreibers

Das *bewegliche Organ* hängt daher nach Bild 5 an einem Band, das die Klüfte aufnimmt. Die außerdem vorgesehenen Steinlager dienen zur Zentrierung. Anstelle dieser gibt es auch hier die Ihnen bekannte Konstruktion, bei der die Drehspule zwischen zwei Spanndrähten angeordnet ist.

Die Mehrfarbenschreiber werden übrigens nicht nur für sechs Farben geliefert. Es gibt auch billigere Geräte für zwei oder drei Farben. Für mehr als sechs Farben werden die Schreiber jedenfalls nicht gebaut, denn man könnte die Farben dann nicht mehr gut unterscheiden. Je mehr Kurven Sie auf dem Papierstreifen haben, um so größer wird außerdem der Punkt-*abstand* je Kurve. Schon bei zehnssekundlicher Anzeige hätten Sie bei sechs Meßstellen einen Punkt je Minute für jede Kurve.

[4] **Fotografische Aufzeichnung.** Wenn sich die Meßgröße sehr schnell ändert, kommen Sie mit den bisher beschriebenen Schreibverfahren nicht mehr aus. Die Linienschreiber mit Feder und Tinte sind wegen der Masse der beweglichen Teile zu träge, und außerdem setzt der Tintenfluß bei zu hoher Schreibgeschwindigkeit aus. Das Verfahren der punktweisen Aufzeichnung ist, wie Sie gesehen haben, seiner Natur nach schon gar nicht für rasch verlaufende Vorgänge geeignet.

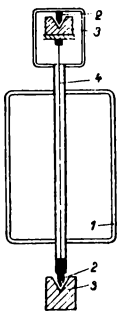


Bild 5. Band-
aufgehängtes
Meßwerk

- 1 Rähmchen
- 2 Hilfsspitzen
- 3 Hilfssteine
- 4 Bandaufhängung

In diesem Fall haben Sie nun die Möglichkeit, den masselosen *Lichtstrahl* wie bei dem Ihnen schon bekannten Spiegelgalvanometer als Zeiger zu verwenden, der *auf einer lichtempfindlichen Schicht* (Bromsilberpapier) die Kurve aufzeichnet. Das bewegliche Organ des Meßwerks wird dadurch von dem Ballast des körperlichen Zeigers befreit, kann leichter ausgeführt werden und braucht nur den Spiegel mit seinem geringen Trägheitsmoment zu bewegen.

Wohlgemerkt, es handelt sich jetzt immer noch um die normalen Meßwerke (Lbf. 1 und 2), die einen arithmetischen oder quadratischen Mittelwert anzeigen. Sie können sich aber wohl den Fall denken, daß z. B. der Effektivwert eines Wechselstromes so stark veränderlich ist, daß man ihn nur durch die fotografische Aufzeichnung sichtbar machen kann. Bei den eigentlichen Schwingungsschreibern, den Oszillographen, ist zwar das Prinzip dieser Aufzeichnung das gleiche, sie sind aber im Meßwerk wesentlich durch die Forderung gekennzeichnet, daß das bewegliche Organ möglichst trägheitslos sei, damit es den *Augenblickswerten* des zu messenden Stromes folgen kann.

Wenn Sie eine klar erkennbare Kurve haben wollen, muß bei einer schwachen Lichtquelle die Fotoschicht entsprechend empfindlich sein. Es kommt ebenfalls auf die Schreibgeschwindigkeit an, denn je größer diese ist, um so kürzer ist die Belichtungszeit. Bei $10 \cdots 20$ m/s Schreibgeschwindigkeit (nicht Papiervorschub) kommen Sie mit einer Auto-Scheinwerferlampe aus. Die erzielbare Geschwindigkeit steigt bei Verwendung von Lichtquellen hoher Leuchtdichte (Lichtstärke je cm^2 der leuchtenden Fläche). Bei höherer Leuchtdichte steigt der Anteil der blauen und ultravioletten Strahlung, für die die Fotoschicht besonders empfindlich ist. Aus diesem Grunde werden bei Oszillographen die Glühlampen häufig durch Überlastung auf höhere Leuchtdichte auf Kosten ihrer Lebensdauer gebracht. Das ist zu vertreten, denn es handelt sich doch dabei um kurzzeitige Aufnahmen. Besonders reich an aktiven Strahlen sind die Bogenlampe und

die Quecksilberdampfampe. Mit diesen Lichtquellen und höchstempfindlichem Film oder Bromsilberpapier werden Schreibgeschwindigkeiten von über 5000 m/s erreicht.

Nehmen Sie zu folgendem Rechenbeispiel eine Strichstärke von 1 mm an. Das ist viel, denn mit *guter Optik* läßt sich eine *Strichstärke* von nur 0,02 mm erzielen. Ein feiner Strich ist nötig bei Aufnahmen auf Kleinformat (Kinofilm), die dann im vergrößerten Maßstab ausgewertet werden. Eilt also der Lichtpunkt von 1 mm Ø mit 5000 m/s gleich $5 \cdot 10^6$ mm/s über die Fotoschicht, dann belichtet er eine lichtempfindliche Fläche von 1 mm Ø in $1/5 \cdot 1/10^6$ s, d. i. $1/5$ Mikrosekunde!

Sie erkennen also, daß für so hohe Schreibgeschwindigkeiten wegen der kurzen Belichtungszeit starke Lichtquellen nötig sind. Die Grenze der Leistungsfähigkeit der Fotoschicht ist aber damit noch nicht erreicht, nur die *Ablaufgeschwindigkeit der Schicht* senkrecht zur Schreibbewegung ist *aus mechanischen Gründen begrenzt*. Bei den meisten Geräten ist die Ablaufgeschwindigkeit des Films oder des lichtempfindlichen Papiers $5 \cdots 10$ m/s, bei Sonderausführungen *bis 50 m/s*. Je höher die Frequenz des Schwingungsvorganges ist, um so schneller muß die Schicht laufen, damit die Kurve in der Zeitrichtung genügend weit auseinandergezogen („aufgelöst“) wird.

Nehmen wir an, daß eine Kurve nach Bild 6 noch als erkennbar aufgelöst gelten soll, wenn die Striche auf der Nulllinie um die Strichstärke s [mm] voneinander entfernt sind. Auf eine Periode kommen lav' Skizze vier Strichstärken. Bei f [Per/s] ist die Zeit für eine Periode $1/f$ [s], und in dieser Zeit muß mindestens der Weg 4 s zurückgelegt werden. Also ist die kleinste Geschwindigkeit des ablaufenden Streifens

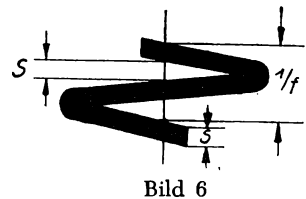


Bild 6

$$v_{\min} = \frac{4s}{\frac{1}{f}} = 4 \cdot s \cdot f \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] \quad (1)$$

Bei einer Frequenz von z. B. 5000 Hz und einer Strichstärke $s = 0,1$ mm hätten Sie hiernach als Mindestgeschwindigkeit einzustellen

$$v_{\min} = 4 \cdot 0,1 \cdot 5000 = 2000 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = \underline{\underline{2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

Bei einigermaßen großer Amplitude werden dann allerdings noch die Striche rechts und links der Nulllinie ineinanderlaufen, so daß dementsprechend die Geschwindigkeit zu erhöhen ist.

Wenn zur Auflösung der Schwingung Geschwindigkeiten über die oben genannten Grenzen hinaus nötig werden, dann kommt der *Katodenstrahl-Oszillograph* mit *ruhender* Fotoschicht und elektrischer Zeitablenkung in Betracht, so daß die Bewegung der Fotoschicht entfällt. Da der Katodenstrahl fotografisch sehr aktiv ist, lassen sich mit ihm Schreibgeschwindigkeiten bis zu 50 000 km/s erreichen.

Es gibt zwei Möglichkeiten der Aufzeichnung. Beim *Lichtzeigerverfahren* wird ein *Lichtpunkt* über die Fotoschicht geführt. Sie sehen dann auf der entwickelten Schicht den Kurvenzug *als schwarze Linie auf weißem Grund*. Dieses Verfahren ist vorherrschend bei technischen Geräten. Im Schema Bild 7 strahlt die Lichtquelle 1 durch die Kondensorlinse¹ 2 und durch die fein einstellbare Spaltblende 3 auf den Drehspiegel 4. Die Zylinder-

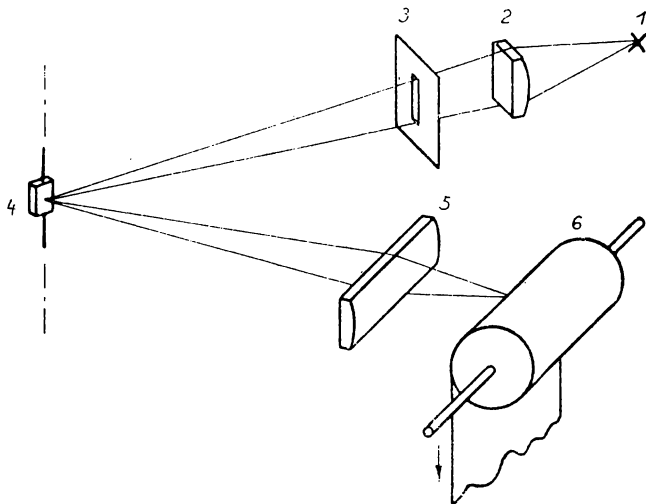


Bild 7. Lichtzeigerverfahren

linse 5 zieht den vom Spiegel reflektierten Lichtstreifen in der Ablaufrichtung der Fotoschicht 6 zu einem Punkt auf der Schicht zusammen. Die Linsenlänge in der Schwingungsebene ist so groß, daß der Lichtpunkt über die nutzbare Schichtbreite wandern kann. Diese Zylinderlinse ist wie das Objektiv eines Fotoapparates maßgebend für die Helligkeit und die Schärfe des Lichtpunktes und wird bei den hohen Ansprüchen, die man in dieser Beziehung stellen muß, verhältnismäßig teuer.

¹ Beleuchtungslinse, bestehend aus mehreren Linsen, die die von der Lichtquelle ausgehenden Strahlen auf den zu beleuchtenden Gegenstand konzentrieren.

Das *Schattenzeigerverfahren* wird angewendet, wenn die kleinen Auslenkungen einer Saite (Saiten-Elektrometer und Saiten-Galvanometer, Lbf. 2) fotografisch registriert werden sollen. Die Lichtquelle 1 (Bild 8) erzeugt auf der Fotoschicht durch die Spaltblende 3 in Richtung der Schwingungsebene einen Lichtstrich, der durch den Schattenpunkt der

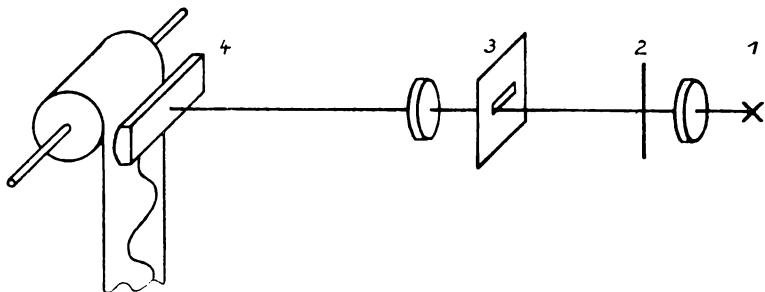


Bild 8. Schattenzeigerverfahren

Saite 2 unterbrochen wird. Die Zylinderlinse besorgt wieder die Schärfe und die Helligkeit der Abbildung. Die Fotoschicht wird hier gleichmäßig bis auf die Schattenlagen der schwingenden Saite geschwärzt. Das Ergebnis ist *eine weiße Kurve auf dunklem Grund*.

Sie haben noch einen Vorteil bei der fotografischen Aufzeichnung: Sie können auf *einem* Streifen gleichzeitig mehrere Kurven nebeneinander aufnehmen. Die Anzahl ist nur durch die Breite der Fotoschicht begrenzt, denn für die zugehörigen Meßwerke haben Sie nicht die Platzbeschränkung wie bei mechanisch schreibenden Geräten, weil die Lichtstrahlen beliebig durch Spiegel oder Prismen gelenkt werden können. So können Sie z. B. gleichzeitig den Verlauf von Spannung, Strom und Leistung schreiben lassen.

Nachteilig sind das unbequeme Entwickeln, Fixieren und Trocknen des Films oder des Papiers, bevor man an die Auswertung des Diagramms gehen kann, und die Notwendigkeit, alles Nebenlicht von der hochempfindlichen Schicht fernzuhalten. Der Schreibvorgang muß sich also in einem *lichtdichten* Raum wie bei einem Fotoapparat abspielen.

Früh wurde das Negativ eines Fotobildes auf sogenanntes *Tageslichtpapier* kopiert, um das Positiv zu erhalten. Diese Schicht enthält hauptsächlich das viel weniger lichtempfindliche *Chlorsilber*, das durch die Einwirkung des Tageslichtes nach längerer Zeit zu schwärzlichem Silber reduziert wird. Dies dauert Minuten bis Stunden je nach der Lichtstärke und der Schichtempfindlichkeit, die man durch geeignete Zusammen-

setzung bei der Herstellung verändern kann. Die Schwärzung erscheint also *ohne Entwicklung*, die bei der Bromsilberschicht nötig ist. Soll aber das Bild dann am Licht unveränderlich sein, so muß das unbelichtete Chlorsilber ebenfalls im Fixierbad ausgelöst werden.

Wenn Sie mit niedrigen Schreibgeschwindigkeiten auskommen (bis zu 300 mm/s) und eine Lichtquelle mit hochaktiver Strahlung verwenden, können Sie mit solchem Papier die Kurve ohne lichtdichten Einbau bei Tageslicht schreiben lassen.

Beim *Lichtlinienschreiber* nach STABE wird ein Papierstreifen mit den Abmessungen des normalen Kinofilms benutzt, der eine gegen Tageslicht sehr wenig empfindliche Schicht trägt, die erst bei stundenlanger Belichtung in der Sonne leicht geschwärzt wird. Als Lichtquelle dient eine moderne Quecksilber-Höchstdrucklampe. Diese hat bei hoher Ultraviolett-Leistung sehr geringe Abmessungen. Sie stellt ein Röhrchen von 10 mm Ø und 70 mm Länge dar. Der Lichtstrahl schreibt eine sofort sichtbare schwarze Linie auf das Papier, das wie bei einem mechanischen Tintenschreiber frei abläuft. Die Kurve ist bei 300 mm/s noch erkennbar, und hier liegt die Grenze der Anwendbarkeit.

Das *Fotografieren von Zeigerstellungen* gehört im weiteren Sinne zur fotografischen Aufzeichnung von Meßwerten. Nehmen Sie an, Sie hätten eine Betriebsmessung durchzuführen, bei der zu bestimmten Zeitpunkten gleichzeitig verschiedene Instrumente abzulesen sind: Spannungen, Ströme, Leistung, Drehzahl, Temperaturen, Uhrzeit u. a. m. Schreibende Instrumente sind nicht immer für jeden Meßwert vorhanden. Es kommt dann darauf an, die anzeigenden Meßgeräte zur gleichen Uhrzeit abzulesen. Sie allein können das nicht ausführen, und die Angaben mehrerer Beobachter sind nicht immer verläßlich, besonders wenn Messungen in kurzen Zeitintervallen gemacht werden müssen. In diesem Fall können Sie die Zeigerstellung fotografieren, und zwar möglichst so, daß Sie auf *einem* Bild alle Meßgeräte einschließlich der Uhren ablesen können. Wenn die Meßwerte schnell veränderlich sind, werden *Reihenbilder mit der Kinokamera* gemacht.

Die nun folgenden Verfahren werden bei elektrischen Meßgeräten selten angewendet und sollen nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

[5] **Ritzen.** Der Zeiger ritzt mit einer feinen Spitze die Kurve in ein weiches Material ein. Sie haben also auch hierbei mit der Masse des Schreibergans und mit der Reibung zu rechnen, so daß das Verfahren für höhere Frequenzen nicht geeignet ist.

Das Schreiben auf einer hauchdünnen *berußten Fläche* wurde schon frühzeitig angewendet. Es hat den Vorteil, daß man bei geringster Reibung ein Diagramm mit feinen Linien von einigen Hundertstel Millimeter Stärke erzielen kann. Da die Rußschicht leicht verwischbar ist, müssen Sie das fertige Diagramm *fixieren*, wenn es aufbewahrt werden soll oder wenn Sie Lichtpausen davon machen wollen, wofür es sich sehr gut eignet. Sie fixieren die Rußschicht durch Aufsprühen einer Lösung von Schellack in Spiritus. Dieses Schreibverfahren kann wertvoll sein für kurzzeitige Messungen unter Verwendung eines dafür hergerichteten Tintenschreibers, wenn Sie sonst befürchten müssen, daß Ihnen durch die Aufzeichnung mit Tinte wichtige Feinheiten der Kurve verlorengehen.

Das Ritzen auf *Wachspapier* ist dem Rußverfahren ähnlich. Auf ein farbiges Papier wird eine Wachsschicht aufgebracht, die so hauchdünn ist, daß die Papierfarbe gerade noch überdeckt wird. Durch das Ritzen kommt dann die Papierfarbe zum Vorschein. Sie erhalten ebenfalls sehr feine Linien und haben den Vorteil, daß die Schicht nicht wie der Ruß leicht verwischbar ist. Allerdings können Sie vom Diagramm direkt keine guten Pausen herstellen, sondern nur indirekt durch Fotografieren.

Das Wachspapier gestattet auch eine *reibungslose Aufzeichnung*, wenn der Zeiger eine kleine elektrisch geheizte Spitze trägt, die ganz dicht über die Wachsschicht geführt wird und aus dieser die Kurve herausschmilzt. Die mögliche Schreibgeschwindigkeit ist ebenso groß wie bei Tintenschrift.

Ritzbare Schichten sind noch auf andere Weise zu erzielen. Man kann auf Glas, bei ebener Schreibfläche oder bei einer Trommelschreibfläche, *eine Metallschicht von wenigen Tausendstel Millimeter* aufdampfen oder auf einen Film eine ebenso dünne ritzbare Farbschicht aufbringen.

Man hat den Zeiger auch mit einem kleinen *Diamanten* als Ritzwerkzeug versehen und ritzt direkt in Glas oder Zellon *ohne* Schichtüberzug.

Da man bei obigen Verfahren eine Strichstärke von nur 2 μm erzielen kann, ist der Kraftaufwand zum Ritzen gering. Gut sichtbar wird die Kurve allerdings dann erst bei Vergrößerung. Deswegen haben sich die Ritzverfahren bei elektrischen Meßgeräten nicht eingeführt. Hier liefert der Lichtstrahl bessere Ergebnisse, wenn mit der Tintenschrift nicht mehr auszukommen ist. Sie haben dann immer die Möglichkeit, mechanische Erschütterungen vom Drehspiegel fernzuhalten, damit die geschriebene Kurve nicht gefälscht wird.

Anders ist es bei *mechanischen* Meßgeräten, die z. B. schnelle Druckänderungen am laufenden Band schreiben. Die Umwandlung der Druckschwankungen in Spannungsschwankungen, die Sie mit Lichtschreibern

messen können, bedingt einen beträchtlichen Aufwand. Bei nicht zu hohen Frequenzen kommt dann das Ritzverfahren wegen des dünnen Striches in Frage. Wenn Sie das Diagramm 200fach linear vergrößern bei einer geschriebenen Strichstärke von 0,002 mm, erscheint er vergrößert erst

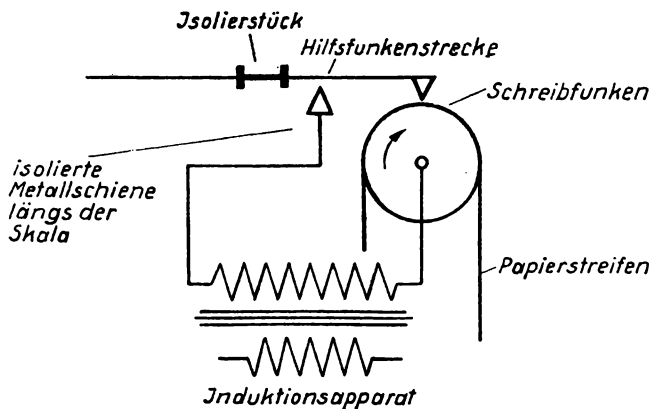


Bild 9. Funkenschreibgerät

0,4 mm stark. Dementsprechend wird auch die Schwingungsweite vergrößert, so daß der Schreibhebel nur Ausschläge von weniger als 1 mm zu machen braucht. Dadurch wird er kurz mit wenig Masse, was hohe Eigenfrequenz bedeutet. Die Vergrößerung dieser *Mikrodiagramme* muß zwar in Kauf genommen werden, dafür ist aber der Verbrauch von Schreibfläche sehr gering.

Zu erwähnen ist noch das Schreiben mit *Silberstift auf Barytpapier*, ein weißes, hochglänzendes, besonders präpariertes Papier, über das der Stift mit leichtem Druck geführt wird, wodurch eine feine dunkle Linie entsteht. Die Reibung auf dem Papier ist größer als die bei Tintenstift. Das Verfahren wird bei den Indikatoren, den Druckschreibern an den Zylindern der Kolbenmaschinen, angewendet.

[6] Aufzeichnung durch Funken. Wenn Sie zwischen der Zeigerspitze und der metallenen Schreibtrommel regelmäßig Funken überspringen lassen, so wird das Papier unterhalb der Zeigerspitze angesengt. Es wird demnach durch Zeiger- und Papierbewegung *reibungslos* eine Kurve auf dem Papier markiert. Die Anordnung zeigt schematisch Bild 9. Den Funkenstrom erzeugt ein Funkeninduktor. Der Zeiger ist durch ein Zwischenstück aus

Glas von der Drehspule isoliert, um eine elektrostatische Beeinflussung des Meßwerkes auszuschalten.

Man könnte meinen, das sei *die* Lösung des Problems der reibungslosen Aufzeichnung. Aber in der Praxis ergeben sich auch hier wieder Nachteile. Die einzelnen Funkendurchschläge zeigen sich auf dem Papier als eine *Folge von Brandpunkten*, die bei schneller Bewegung Einzelheiten des zu messenden Vorgangs nicht wiedergeben, d. h., Sie haben auch nur einen Punktschreiber. Außerdem läßt sich die Brandspur nur bei Betrachtung gegen das Licht gut erkennen, die *Sichtbarkeit* bei auffallendem Licht ist *ungenügend*. Lassen Sie aber die Funken schneller aufeinanderfolgen, dann wird das Papier an den Stellen langsamer Bewegung in einem breiten Streifen versengt und kann auch ganz verbrannt werden, so daß es hier auseinanderfällt. Ferner weicht der Funke bei den unvermeidlichen *Ungleichmäßigkeiten des Papiers* aus; es kommen *Fehlanzeigen* bis zu $\frac{1}{2}$ mm vor. Aus diesen Gründen wird der Funkenschreiber heute kaum noch verwendet.

Zusammenfassung zu [1] bis [6]

Die Aufzeichnung mit Tinte ist das am häufigsten angewendete Schreibverfahren für Betriebsinstrumente, die als Tinten- oder Linienschreiber bezeichnet werden. Wenn der Meßwertgeber nur schwache Ströme liefert, die für einen Tintenschreiber nicht ausreichen, ist der Punktschreiber mit Fallbügel geeignet, sofern sich die Meßgröße langsam ändert, so daß die punktweise Aufzeichnung in Abständen von $10 \cdots 60$ s genügt.

In diesem Fall können bis zu sechs Meßstellen mit einem Punktschreiber als Mehrfarbenschreiber registriert werden.

Die fotografische Aufzeichnung mit dem masselosen Licht- oder Elektronenstrahl wird insbesondere angewendet für Schwingungsvorgänge hoher Frequenzen bei den Oszillographen. Das Schreiben mit dem Lichtzeiger ist aber auch vorteilhaft bei Betriebs-Meßgeräten mit leicht beweglicher Drehspule für schnell veränderliche Vorgänge.

Das Aufzeichnen durch Ritzen oder Funken hat für elektrische Geräte keine Bedeutung.

Übungen

1. Warum hat ein Tintenschreiber eine höhere Leistungsaufnahme als ein anzeigendes Meßwerk gleicher Art?
2. Beim Punktschreiber fällt die Papierreibung fort. Warum baut man dann noch Tintenschreiber?

3. Welche Vorteile bietet der Punktschreiber gegenüber dem Tintenschreiber?
4. Können Sie mit Tintenstift auch die Momentanwerte eines Wechselstroms aufnehmen?
5. Wieso hat die Schreibgeschwindigkeit einen Einfluß auf die Tintenschrift?
6. Können Sie jede beliebige Tinte verwenden?
7. Worin besteht der Unterschied zwischen dem Lichtzeiger- und dem Schattenzeigerverfahren der fotografischen Aufzeichnung?
8. Die Stärke der Schwärzung ist abhängig von der Belichtungsdauer und der Beleuchtungsstärke auf der Schicht. Was ergibt sich daraus für die Aufnahme?
9. Ist es möglich, die Lichtspur sofort — ohne nachfolgende Entwicklung — bleibend sichtbar zu machen?

2. Kapitel: Schreibfläche, Antrieb, Zeigerführung

[?] **Anordnung und Form der Schreibfläche.** Das Material der Schreibfläche ist meistens Papier, bei fotografischer Aufzeichnung auch Film, wie Sie bereits im vorigen Kapitel gelesen haben.

Sie finden bei schreibenden Betriebsgeräten meistens den *ablaufenden Streifen* mit einseitiger oder doppelseitiger Lochung am Rand (Perforation), in die ein Stiftenrad bzw. zwei Stiftenräder zum Papiervorschub eingreifen. Gewöhnlich läuft der Streifen von einer Vorrattstrommel von oben nach unten ab und wird unten wieder auf eine Trommel aufgewickelt oder läuft sich zusammenrollend in eine Büchse ein.

Die *Abmessungen* sind bezüglich der Breite und der Perforation des Streifens sowie der aufgedruckten Teilungen in der Längs- und Querrichtung *genormt*. Normale Maßstäbe in der Längsrichtung sind 10, 20, 30, 60, 120 oder 240 mm/h mit den Stundenzahlen von 1 bis 24. Die Umfangsgeschwindigkeit des Stiftenrades, das den Streifen transportiert, müssen Sie der gewählten Stundenteilung anpassen. Durch auswechselbare Zahnräder können Sie das richtige Übersetzungsverhältnis zwischen Antrieb und Stiftenrad herstellen.

Die gebräuchlichen nutzbaren Papierbreiten, also die aufgedruckten Skalenlängen, sind 70 mm für kleine oder 120 mm für große Tinten- oder Punktschreiber.

Bei fotografischer Aufzeichnung wird die Fotoschicht in der Regel ohne eine aufgedruckte Teilung verwendet. Da es sich hierbei um schnell veränderliche Vorgänge handelt, ist es mit Rücksicht auf die Genauigkeit des Zeitmaßstabes besser, die Zeitmarkierung *gleichzeitig* mit der Aufnahme der Kurve vorzunehmen. Sie können die Fotoschicht durch einen engen Schlitz, der über die Schichtbreite geht, in bekannten regelmäßigen Zeitabschnitten kurzzeitig belichten; dann erhalten Sie nach der Entwicklung lauter parallele Linien auf dem Film oder Papier als Zeiteinteilung. Die Einteilung in der Richtung des Zeigerausschlages läßt sich auch bei der Aufnahme auf die Schicht kopieren. Dieses Verfahren bietet Vorteile bei der Aufzeichnung schnell veränderlicher Effektivwerte. Meßfehler infolge nachträglicher Längenänderung des bedruckten Papiers (Feuchtigkeit!) werden vermieden.

Bei den hohen Ablaufgeschwindigkeiten der Fotoschicht, die bei *Momentanwert-Schreibern* (Oszillographen) zur Auflösung der Schwingung nötig sind, wird die Schwingung einer *geeichten Stimmgabel* mit einem kleinen Spiegel, der auf einen ihrer Schenkel aufgekittet ist und in die Optik eingeschaltet wird, als *Sinuslinie am Rand der Schicht* aufgezeichnet. Da die Schwingungszahl f [Per/s] der Stimmgabel bekannt ist, entspricht die Wellenlänge der Sinuskurve der Zeit $1/f$ [s/Per], und damit haben Sie den Zeitmaßstab.

Lehrbeispiel 1

Der Filmvorschub sei 5 m/s, die gewünschte Wellenlänge der Sinuslinie 5 mm. Welche Schwingungszahl muß der schwingende Spiegel der Stimmgabel haben?

Lösung:

In einer Sekunde laufen 5000 mm der Fotoschicht ab, in der Zeit $1/f$ [s/Per] also $5000 \text{ mm/s} \cdot 1/f$ [s/Per] = 5 mm/Per. Daraus

$$f = \frac{5000 \frac{\text{mm}}{\text{s}}}{5 \frac{\text{mm}}{\text{Per}}} = 1000 \text{ Hz} \quad 1$$

Wenn Sie keine hohe Genauigkeit der Zeitmarkierung verlangen, dann genügt statt der geeichten Stimmgabel eine Stahlzunge als Träger des Spiegels, die durch einen Wechselstrommagnet mit Netzfrequenz erregt wird wie beim Zungen-Frequenzmesser. Ohne Vormagnetisierung schwingt die Zunge bekanntlich mit der doppelten Netzfrequenz.

Bei der *Trommelaufzeichnung* wird ein Papier- oder Filmstreifen um eine Trommel gelegt und festgeklemt. Auch für diese Trommelschreiber gibt es genormte gedruckte Papierblätter mit nutzbaren Schreibbreiten von 70, 100, 120, 200 mm und für Vorschübe von 10, 20 oder 40 mm/h.

Für elektrische Betriebsmeßgeräte wird die Trommelaufzeichnung kaum verwendet. Nachteilig ist die kleine Diagrammlänge, die durch den Umfang der Trommel gegeben ist. Sie können dabei nur einen kleinen Teil des aufgezeichneten Diagramms durch die Glasscheibe hindurch sehen im Gegensatz zu den Schreibern mit ablaufendem Streifen, und Sie müssen das beschriebene Blatt nach einem Trommelumlauf auswechseln, also normalerweise nach 24 h. Sie finden die Trommelaufzeichnung häufiger bei mechanischen Meßgeräten wie Barographen, Thermographen, schreibenden Wassermengen-Messern u. ä., bei denen meistens ein kleiner Papiervorschub ausreicht, so daß das Papier wöchentlich ausgewechselt werden kann. Die Vorteile des geringen Platzbedarfs und der Möglichkeit, das Uhrwerk schwächer zu bemessen, fallen dann ebenfalls ins Gewicht.

Bei Oszillogrammen braucht man meistens nur eine kurze Diagrammlänge. Daher ist bei Oszillographen die Trommel verwendbar und neben dem ablaufenden Streifen gebräuchlich. Mit der Trommel lassen sich höhere Ablaufgeschwindigkeiten erzielen, denn die Schwierigkeit des einwandfreien Papiertransportes entfällt.

Ein *Papierblatt als Kreisscheibe*, die um ihren Mittelpunkt einen Umlauf macht (Bild 10), ist für elektrische Geräte nicht üblich. Zwar ist das Dia-

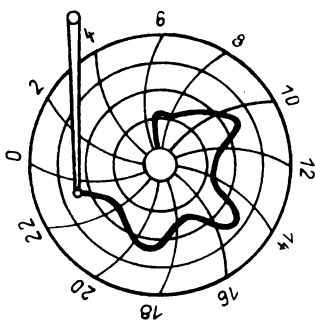


Bild 10. Polardiagramm

gramm vollständig sichtbar, aber da es als *Polardiagramm* geschrieben wird (Meßgröße vom Mittelpunkt aus veränderlich als Funktion des Drehwinkels), ist es nicht so übersichtlich wie bei rechtwinkligen Koordinaten und außerdem schlecht auszuwerten, falls Sie z. B. den Mittelwert feststellen wollen, weil die *Meßgröße bogenförmig* vom Zeiger geschrieben wird. Gelegentlich wird diese Form der Schreibfläche bei mechanischen Meßgeräten verwendet. Vielleicht haben Sie Ausführungen in Ihrem Betrieb gesehen, z. B. als Druck-, Temperatur- oder Mengenschreiber mit Tintenstift oder in Wachspapier ritzend.

Die *ebene ruhende Schreibfläche* wird in Sonderfällen verwendet. Hierbei muß ein Lichtstrahl (beim Katodenstrahl-Oszillograph der Elektronenstrahl) die Bewegung in Richtung der Abszisse *und* die in Richtung der Ordinate

ausführen, um die Kurve zu schreiben. Die feststehende Schreibfläche ist eine *Fotoschicht* oder zur sofortigen Beobachtung eine *Mattscheibe* beim Lichtstrahl, oder sie ist ein *Fluoreszenzschirm* (Leuchtmass) beim Elektronenstrahl, da dieser nicht sichtbar ist.

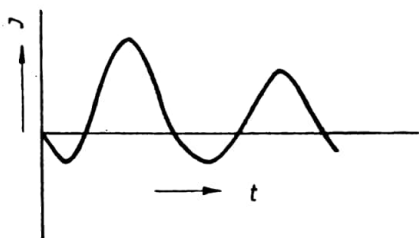


Bild 11. Stromkurve

Warum aber läßt man die Schreibfläche stillstehen? Die Ablenkung des schreibenden Strahles in der Resultierenden beider Koordinaten ist doch komplizierter?

Die Bewegung setzt sich zusammen (Bild 11) aus dem der Meßgröße I proportionalen Ausschlag und der mit konstanter Geschwindigkeit erfolgenden Ablenkung in der Zeitrichtung t .

Sie erkennen den Grund für diese Lösung aus Formel (1) und dem Lehrbeispiel: Bei den hohen Frequenzen und Schreibgeschwindigkeiten, für die der Katodenstrahl-Oszillograph benutzt werden muß, läßt sich die Schreibfläche nicht mehr mit der nötigen Geschwindigkeit einwandfrei bewegen, um die Schwingung aufzulösen. Die Zeitablenkung hierbei wird später erläutert.

Aber auch bei langsam ablaufenden Vorgängen kommt die ruhende Fläche in Frage. Bedenken Sie, daß bei den bisherigen Schreibverfahren immer die *Abhängigkeit* einer Meßgröße *von der Zeit* aufgezeichnet wird. Ist sie nun von einer anderen Größe als der Zeit abhängig, z. B. der Anodenstrom einer Elektronenröhre abhängig von der Anodenspannung, der Widerstand

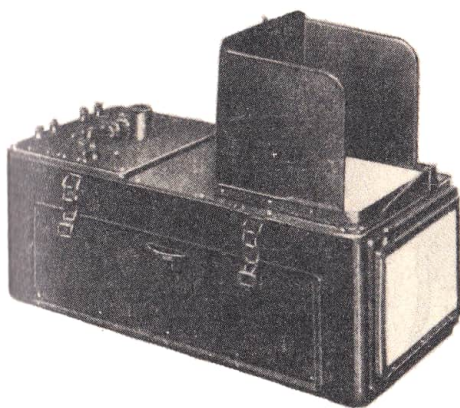


Bild 12. Koordinatenschreiber

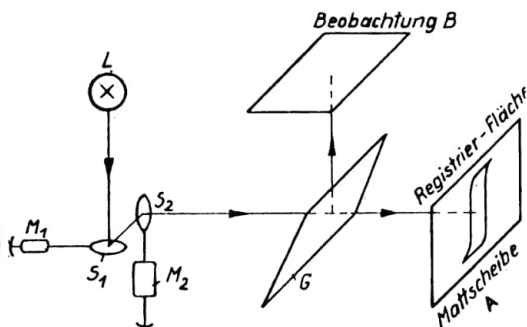


Bild 13. Schema

eines Leiters abhängig von der Temperatur usw., dann erhalten Sie in üblicher Weise Punkte der Kurve durch Einzelmessungen. Sie können aber auch die Kurve stetig schreiben lassen durch ein Gerät, das als *Koordinatenschreiber* (Bild 12 und 13, Bauart Siemens) oder *Vektorschreiber* bezeichnet wird. Sind die beiden Veränderlichen keine elektrischen, sondern mechanische Größen, so müssen Sie diese in elektrische umformen.

Bild 13 zeigt schematisch den Aufbau. Der von der Lampe gelieferte und durch eine Optik gerichtete Lichtstrahl fällt auf den Spiegel S_1 des Meßwerkes M_1 , von dort auf den Spiegel S_2 des Meßwerkes M_2 , dessen Achse *genau senkrecht* zur Achse von M_1 steht, und dann auf die Mattscheibe A , die gegen eine Kassette mit lichtempfindlicher Schicht ausgewechselt werden kann. Die Glasplatte G reflektiert einen Teil des Lichtes auf die Beobachtungsscheibe B aus rotem Glas, um den Vorgang während des Fotografierens beobachten zu können. Der Schreibvorgang ist folgender: M_1 mißt die Meßgröße der Ordinate, M_2 die der Abszisse; der Lichtpunkt folgt der Resultierenden.

[8] Antriebsarten für den Papiervorschub. Der Antrieb hat bei Tintenschreibern den zeitgerechten Papiervorschub zu besorgen, bei Punktschreibern außerdem die Betätigung des Fallbügels und des Meßstellenumschalters bei Mehrfarbenschreibern.

Häufig ist ein *Federuhrwerk mit Aufzug von Hand* eingebaut mit einer Gangdauer von 8 bis 10 Tagen bei den üblichen Papiervorschüben von 20, 30 oder 60 mm/h. Es gibt aber Fälle, wo diese kleinen Papiervorschübe ein verschmiertes Diagramm ergeben würden. Denken Sie etwa an die Stromaufnahme des Motors einer Walzenstraße! Hier werden Sie 600 mm/h und evtl. mehr brauchen. Dagegen kommen Sie bei einem Spannungsschreiber für eine Netzspannung mit 20 mm/h und für die Aufzeichnung der Leistung eines Kraftwerkes normalerweise mit 60 mm/h aus. Bei den hohen Ablaufgeschwindigkeiten wird die Gangdauer des Uhrwerkes herabgesetzt werden müssen, wenn eine Erhöhung des Arbeitsvermögens der Feder aus konstruktiven Gründen nicht möglich ist.

Da übrigens vom Uhrwerk eine Arbeit verlangt wird, kann seine Ganggenauigkeit nicht die einer guten Uhr sein, bei der die Reibungswiderstände einen Bruchteil ausmachen. Auch bei guter Ausführung des Werkes kann die Gangdifferenz mehrere Minuten je Tag betragen. Denken Sie auch daran, daß ein Magnetfeld (z. B. durch Sammelschienen) das Uhrwerk beeinflussen kann!

Der reine Uhrwerkantrieb *muß* verwendet werden für Geräte, für die am Einbauort keine Elektrizität für motorischen Antrieb verfügbar ist. Um

unabhängig von der Netzspannung und der Stromart zu sein, ist er auch bei *tragbaren Geräten* vorgesehen, die gelegentlich an verschiedenen Orten eingesetzt werden.

Besser sind *Federuhrwerke mit Motoraufzug*. Der kleine Hilfsmotor zieht die Feder in regelmäßigen Zeitabständen auf, so daß sie immer gespannt ist. Sollte die Spannung für den Motor wegbleiben, so reicht die Feder noch aus zum Papiervorschub für $2 \cdots 3$ h. Das ist die *Gangreserve*.

Wegen des Motors mit Getriebe und Steuerung ist diese Lösung zwar teurer, aber die Ganggenauigkeit ist besser, da die Feder immer voll gespannt ist im Gegensatz zu der Feder, die länger als eine Woche antreiben muß.

Der *Synchronmotorantrieb* ist der einfachste und billigste, wenn er an ein Netz angeschlossen werden kann, dessen Frequenz konstant ist.

Sie wissen, daß Sie in diesem Fall eine *Synchronuhr* anschließen können, die weiter nichts ist, als ein kleiner Synchronmotor für Wechselstrom, der bei 50 Hz über ein mehrstufiges Untersetzungsgetriebe den roten Sekundenzeiger genau einmal in der Minute herumdreht. In dem Maße, wie die Frequenz steigt oder fällt, geht die Uhr vor bzw. nach, da die Drehzahl des Motors von der Frequenz abhängt.

So ein zeitgeregelter Synchronmotor für den Papiervorschub ist wegen der einfachen und daher preislich günstigen Konstruktion dem Uhrwerk vorzuziehen, wenn die Spannung für den Motor nicht wegbleibt. Normalerweise setzt aber die Spannung bei einem nicht überlasteten Verbundnetz nur gelegentlich und auch dann nur so kurzzeitig aus, daß der Ausfall nicht ins Gewicht fällt. Der Synchronmotor muß natürlich selbstanlaufend sein.

Es gibt auch den *Synchronmotorantrieb mit Gangreserve*, wobei der Motor den regelmäßigen Vorschub ausführt, während bei einer Störung ein Hilfsmotor bis zu einigen Stunden eingreift.

Ein *drehzahl geregelter Asynchron- oder Gleichstrommotor* wird gelegentlich verwendet. Denken Sie an den Schallplattenantrieb, bei dem ein *Fliehkraftregler* für konstante Drehzahl sorgt, indem er eine zusätzliche mechanische Bremse lockert bzw. anzieht. Bei einem Gleichstromantrieb ist der Fliehkraftregler mit Kontakten ausgeführt worden, die einen Widerstand im Motorstromkreis kurzschließen oder einschalten.

Wenn Sie viele schreibende Geräte in einer Meßzentrale haben, können Sie bei der Projektierung den *Klinkwerkantrieb* in Betracht ziehen. Hierbei erhält das Gerät lediglich ein Schrittschaltwerk, elektromagnetisch gesteuert

durch eine *Mutteruhr* mit genauem Unruh- oder Pendelwerk. Sie als Elektriker kennen das Verfahren von den Uhrenanlagen her, die man auf Bahnhöfen, in Fabriken und Bürohäusern sieht. Haben Sie 20 mm/h Papiervorschub, dann genügen Stromimpulse in Abständen von 1 min. Sie haben dann auf dem Papier einen ruckweisen Vorschub von 0,333 mm je min, 1 min lang steht das Papier still. Bei einem unruhigen Meßwert und daher notwendigem größerem Papiervorschub muß natürlich die Impulsfolge gesteigert werden, bei Sechsfarbenschreibern auch schon bei 20 mm/h; da bei diesen alle 20 s der Fallbügel niedergeht und die Meßstelle umgeschaltet wird, brauchen Sie eine Impulsfolge von 20 s.

Wenn die Einbaustellen der Geräte im Betrieb weiter voneinander entfernt sind, wird der Klinkwerkantrieb vermutlich nicht vorteilhaft sein, wenn Sie die Kosten der Steuerleitungen von der Mutteruhr aus veranschlagen. In diesem Fall ist der Einzelantrieb, insbesondere der Synchronmotor, sicher günstiger.

Wenn der ablaufende Streifen aufgewickelt werden soll, wird die *Aufwickelwelle* entweder durch ein ungeregeltes Federwerk angetrieben oder durch einen Abtrieb vom Hauptantrieb.

Die Änderung des Papiervorschubes ist, wie gesagt, durch Austausch von Zahnrädern möglich. Es gibt aber Fälle, wo während des Betriebes die selbsttätige Änderung des Übersetzungsverhältnisses gewünscht wird. Solche Geräte werden als *Störungsschreiber* bezeichnet, und der Name sagt Ihnen schon, um welche Fälle es sich handelt. Ein Spannungsschreiber z. B. in einem Kraftwerk schreibt mit 20 mm/h Vorschub die normale Netzspannung. Durch eine Störung bricht die Spannung zusammen; zur Betriebskontrolle ist es wichtig zu wissen, wann die Störung einsetzte, wie der Spannungsverlauf war und wann die Spannung wieder normal war. Bei 20 mm/h können Sie auf dem Papier von dem ganzen Vorgang höchstens einen Strich sehen, denn er spielt sich u. U. in Sekunden und Bruchteilen davon ab. Das Vorschubgetriebe muß also auf *Schnellgang* umgeschaltet werden; als ausreichender Vorschub für diesen Fall hat sich 36000 mm/h erwiesen, also 10 mm/s. Sie können sich denken, daß das normale Uhrwerk die erforderliche hohe Beschleunigung der Massen und die gesteigerte Arbeitsleistung nicht schaffen kann, denn die Geschwindigkeit soll *plötzlich* auf den 1800fachen Betrag steigen. Entweder ist ein kräftiges Uhrwerk mit elektrischem Aufzug eingebaut, der die Feder auch bei Schnellgang immer richtig gespannt hält, oder ein normales Uhrwerk für den Langsamlauf und ein besonderer Motor für den Schnellauf. Diesen läßt man zur Erzielung kürzester Ansprechzeit im normalen Betrieb leer mitlaufen, damit seine rotierenden Massen bei Eintritt der Störung nicht

erst aus dem Stillstand beschleunigt werden müssen, man setzt auch manchmal ein Schwungrad auf die Ankerwelle, dessen kinetische Energie zur Beschleunigung des Vorschubs mithilft.

Wie geht nun die Umschaltung vor sich?

Sie brauchen zunächst ein *Anregeglied*, das von der zu überwachenden Meßgröße beeinflusst wird, also ein schnell ansprechendes Relais, z. B. für Unterspannung, Überstrom, Frequenz, Erdschluß, Überdrehzahl oder andere Größen, auch mechanische, die sich in elektrische umformen lassen. Dieses Relais schaltet einen *Elektromagneten im Gerät* ein, der von dem normalen auf den vergrößerten Papiervorschub umschaltet, ähnlich wie man das Getriebe beim Auto von Hand umschaltet. Es kommt darauf an, daß die Zeit vom Störungsbeginn bis zum Erreichen der vollen Vorschubgeschwindigkeit und zur Einstellung der Schreibfeder auf den neuen Wert so kurz wie möglich ist. Mit den kürzestmöglichen Eigenzeiten des Anregegliedes und der magnetischen Umschaltung kann man auch bei Tintenschreibern erreichen, daß die Aufzeichnung der Störung nach 20 ms beginnt.

Nun kann aber das Papier nicht dauernd im Schnellgang ablaufen, sondern nach Abklingen der Störung soll es wieder normal vorgeschoben werden. Dazu kommt noch eine Forderung: Die Zeitbezeichnung auf dem Streifen soll nach dem Zurückschalten auf Langsamlauf wieder stimmen. Danach muß der Schnellgang bei 10 mm/s 24 s dauern, wenn der Langsamgang 20 mm/h ist; dann läuft nämlich in 24 s eine Papierlänge ab, die 12 h entspricht.

Die *Rückschaltung auf den Langsamgang* geschieht natürlich durch Abschalten des Elektromagnets mit einem vom Getriebe betätigten Kontakt. Dauert die Störung an, so läuft eine zweite und evtl. dritte Periode ab. Die Schaltkombination mit dem Anregeglied läßt sich auch so einrichten, daß bei andauernder Störung nach dem ersten Schnellgang endgültig auf Langsamgang übergegangen wird; geht aber die Meßgröße innerhalb der ersten Periode vorübergehend auf den Normalwert und wird gleich darauf wieder anomal, so läuft noch ein zweiter Schnellgang ab.

Sie sollen diese Erläuterung nicht etwa auswendig lernen, sondern an dem Beispiel des Störungsschreibers erkennen, welche Möglichkeiten die moderne Meßtechnik bietet. Sie zeigt für alle Probleme einen Lösungsweg, aber nur das Wissen ist der Schlüssel zum Fortschritt. Gegebenenfalls müssen Sie Ihr Wissen aus dem Spezialschrifttum und aus den Druckschriften der Hersteller ergänzen.

[9] **Führung des Schreiborgans.** Da die Aufzeichnung in rechtwinkligen Koordinaten gewünscht wird, und zwar möglichst mit gleichmäßiger Teilung, muß für die Schreibfeder eine *Geradföhrung* geschaffen werden. Mit dem Hakenzeiger (Bild 14) wird der Ausschlag der Drehspule verzerrungsfrei als Gerade auf den ablaufenden Streifen übertragen, da dieser über eine zylindrisch gekrümmte Schreibunterlage gezogen wird, deren Krümmungsmittelpunkt in der Drehachse der Spule liegt. Der Zeiger muß natürlich stabil ausgeführt sein und hat daher eine verhältnismäßig große Masse, aber sonst ist die Ausführung einfach und ohne zusätzliche Reibungsquellen.

Bei der *Sehnen-Geradföhrung* wird längs der Sehne des Kreisbogens geschrieben, den die Zeigerspitze beschreibt. An den Bildern 3 und 4 (Punktschreiber) können Sie das erkennen, denn der Fallbügel drückt den Zeiger auf eine Messerschiene, über die Papier und Farbband gespannt sind. Jetzt tritt eine Skalenverzerrung ein, und zwar um so mehr, je kürzer die Sehne im Vergleich zur Bogenlänge ist, also bei kleinem Radius.

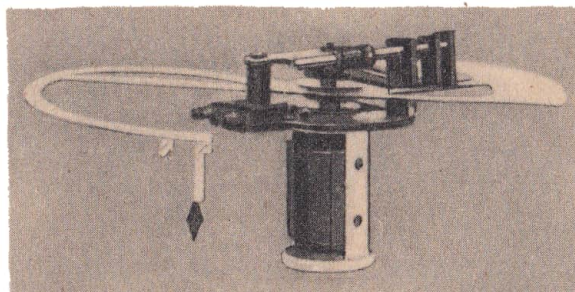


Bild 14. Hakenzeiger

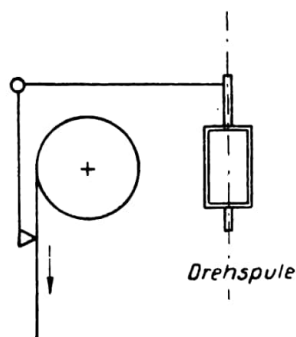


Bild 15. Pendelzeiger

Eine andere Möglichkeit für Linienschreiber ist der *Pendelzeiger* (Bild 15). Durch das Gelenk zwischen dem waagerechten Zeiger und dem nach unten hängenden Schreibhebel bleibt bei der Drehung die Schreibfeder in der Papierebene. Der Schreibdruck ist aber veränderlich je nach der Stellung der Schreibfeder, und eine Skalenverzerrung ist ebenfalls vorhanden, weil Bogen und Sehne nicht gleich lang sind.

Sowohl für Linienschreiber als auch für anzeigende Instrumente (Bild 17) wird häufig der *Ellipsenlenker* (Bild 16) angewendet. Die Drehspule hat einen kurzen Hebelarm 1, der mit dem Zeiger 3 durch ein Gelenk 2 verbunden ist. Am oberen Ende hat der Zeiger eine mit Spitzen in Edel-

steinen gelagerte kleine polierte Rolle, die zwischen zwei Schneiden aus Bronze geradlinig geführt wird. Der Schneidenabstand ist etwas größer als der Durchmesser der Rolle, so daß ein Klemmen nicht eintritt. Das Gelenk 2 beschreibt einen Kreisbogen, wobei die Rolle 4 in ihrer Führung eine Auf- und Abwärtsbewegung macht.

Durch passende Wahl der Hebelarme wird erreicht, daß die Zeigerspitze (oder die Schreibfeder) bei einem Drehwinkel von etwa $\pm 30^\circ$ aus der Mittellage in einem *Ellipsenbogen* mit so großem Radius gelenkt wird, daß der Bogen in diesem Bereich *praktisch gerade* wird. Dabei ist auch der Weg der Schreibfeder praktisch *verhältnismäßig dem Drehwinkel*. Mit größerer Zeigerlänge erhält man eine gute Geradföhrung auch bei größeren Drehwinkeln, wobei aber eine *merkbar Verzerrung* der Skala auftritt; die Anfangs- und Endwerte liegen zu eng. Durch justierbare Zusatzfedern, die diese Bereiche entsprechend auseinanderziehen, wird gegebenenfalls die lineare Skala erzielt.

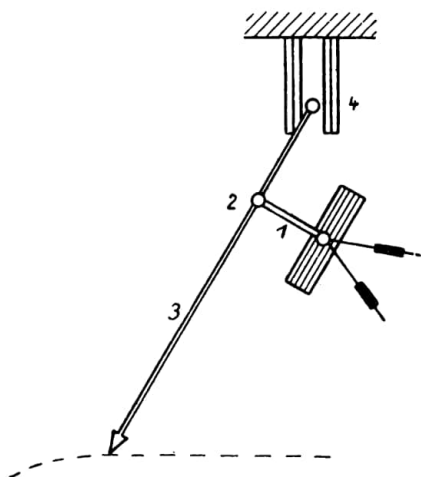


Bild 16. Ellipsenlenker

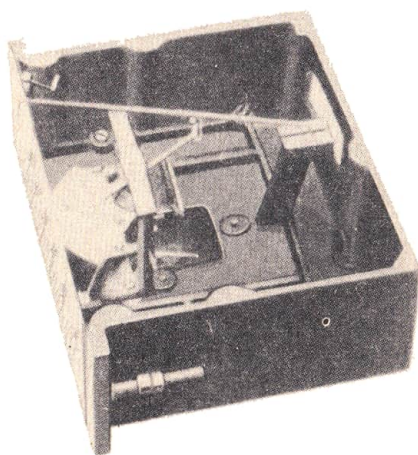


Bild 17. Flachprofil-Schalttafel-Instrument

In dieser Beziehung ist der *Lemniskatenlenker* (Bild 18, Schema) vorteilhafter, der den praktisch geradlinigen Teil *a* der Lemniskate ausnutzt, so daß die Skalenverteilung viel weniger verzerrt wird. Allerdings ist der Aufbau etwas umständlicher und der Reibungseinfluß größer. Meßwerk- und Lenkerachse müssen schlupflos gekuppelt werden, damit der Zeiger über die labile Mittellage kommt. Bei der skizzierten Anordnung ist ein Schnurtrieb zur Kupplung angedeutet.

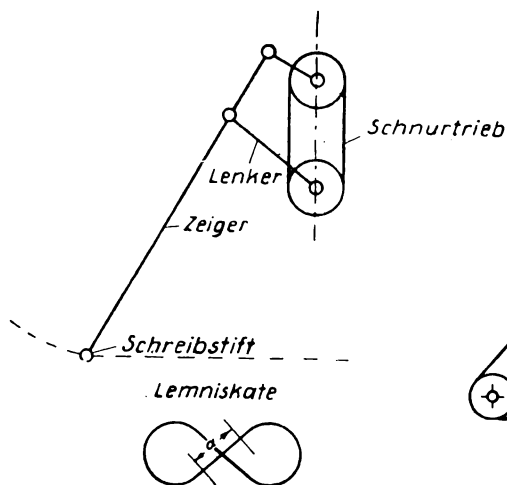


Bild 18. Lemniskatenlenker

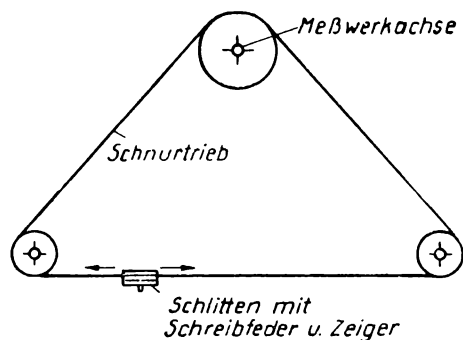


Bild 19. Schlitten-Geradführung

Bei der *Schlitten-Geradführung* (Bild 19, Schema) sind der Zeiger und die Schreibfeder an einem Schlitten befestigt, der auf einer Führungsschiene über die Papierbreite läuft. Er wird von einem Band gezogen, das von der Drehspule angetrieben wird. Daher ist die Schlittenbewegung dem Drehwinkel genau proportional. Leider sind aber die Reibung und die zu beschleunigenden Massen hoch und erfordern ein erhebliches Drehmoment des beweglichen Organs.

Diese Schlitten-Geradführung wird daher vorwiegend bei *schreibenden Kompensations-Meßgeräten mit selbsttätiger Abgleichung* verwendet, bei

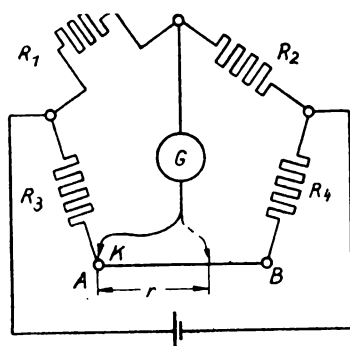


Bild 20. Brücke mit selbsttätigem Abgleich durch Hilfsmotor

denen der Schlitten von einem Hilfsmotor bewegt wird. Das Meßwerk steuert lediglich den Einsatz dieses Motors. Auf die vielfältige Ausführung dieser Geräte kann hier nicht eingegangen werden, schon weil das Meßprinzip der Kompensation später behandelt wird. Ein einfaches Beispiel nach Bild 20 soll Ihnen aber einen Einblick vermitteln. Sie kennen ja die *Wheatstone-Brücke*: R_2 , R_3 , R_4 sind feste, temperaturunabhängige Widerstände, R_1 ist ein veränderlicher Widerstand, dessen Änderung ΔR_1 gemessen werden soll. $A B$ ist ein Schleifdraht-

widerstand. Die Brücke sei abgeglichen, d. h. das Galvanometer G ist stromlos dann gilt:

$$R_1 : R_2 = R_3 : (R_4 + A B)$$

Wird jetzt R_1 um ΔR_1 größer, z. B. durch steigende Temperatur, weil R_1 als Meßwiderstand in einem Ofen untergebracht ist, so stimmt der Abgleich nicht mehr, und das Nullinstrument zeigt einen Ausschlag.

Um ΔR_1 zu kompensieren, müßten Sie nun von Hand K um eine Schleifdrahtlänge r verschieben, bis G wieder Null zeigt. Diese Strecke r ist ein Maß für ΔR_1 . Sie können K mit einem Zeiger und AB mit einer Skala versehen und diese in Einheiten von ΔR_1 bzw. in $^{\circ}\text{C}$ eichen.

Wenn Sie K dauernd von Hand nachstellen müßten, um G auf Null zu bringen, so wäre das natürlich eine unsinnige Lösung. Lassen Sie das einen Hilfsmotor machen, der durch den Ausschlag von G direkt oder über eine Relaisvorrichtung immer so lange eingeschaltet wird, bis G Null zeigt, dann haben Sie eines der oben erwähnten schreibenden Geräte mit selbsttätigem Abgleich.

Zusammenfassung zu [7] bis [9]

Am häufigsten werden die Meßwerte bei elektrischen Geräten auf einem zeitgerecht ablaufenden Papierstreifen aufgezeichnet, der aufgedruckte Teilungen für die Meßgröße und für die Stundenzahl hat. Papierbreiten, Stundenteilungen und Lochung für den Vorschub sind genormt.

Die Aufzeichnung auf einer rotierenden Trommel mit genormten Papierblättern kommt vor, vorwiegend mit Film für kurzzeitige oszillographische Aufnahmen.

Beim Film (Streifen oder Trommel) wird der Zeitmaßstab gleichzeitig mit der Aufnahme der Kurve photographisch gewonnen durch Lichtmarken mit bekanntem Abstand.

Die rotierende Kreisfläche hat für elektrische Geräte keine Bedeutung. Die ruhende ebene Schreibfläche wird beim Katodenstrahl-Oszillographen als Leuchtschirm oder Fotoschicht, beim Koordinatenschreiber als Mattscheibe oder Fotoschicht verwendet.

Der Antrieb für den Papiervorschub muß gegebenenfalls noch einen Fallbügel Quecksilber-Kippschalter für Regelzwecke, einen Meßstellen-Umschalter und bei Schreibern mit selbsttätigem Abgleich evtl. auch die Schlittenführung der Schreibfeder betätigen. Es gibt das Federuhrwerk mit Hand- oder Motoraufzug, bei letzterem mit Gangreserve für $2 \cdots 3$ h, ferner bei zeitgeregeltem Netz den Synchronmotor (evtl. mit Hilfsuhrwerk

als Gangreserve), in seltenen Fällen den drehzahlgeregelten Asynchron- oder Gleichstrommotor und bei vielen zusammengefaßten Schreibern den Klinkwerkantrieb.

Besondere Anforderungen an den Antrieb stellt der Störungsschreiber durch den plötzlichen Übergang von dem Langsam- auf den Schnellgang.

Um die Aufzeichnung in rechtwinkligen Koordinaten zu erhalten, ist eine Geradföhrung des Zeigers nötig. Der Hakenzeiger und die Schlitten-Geradföhrung erfüllen die Aufgabe vollkommen, haben aber große Massen zu bewegen. Weniger genau arbeiten die Sehnen-Geradföhrung, der Ellipsen- und der Lemniskatenlenker, dafür aber mit geringerer Masse und Reibung.

Die Schlitten-Geradföhrung ist typisch für Kompensographen. Das sind Linienschreiber, bei denen nicht das Meßwerk, sondern ein Hilfsmotor den Schlitten mit der Schreibfeder hin und her bewegt und dabei einen Potentiometer-Widerstand verstellt derart, daß der Ausschlag des hochempfindlichen Galvanometers immer wieder auf Null zurückgeregelt wird.

Übungen

10. *Vergleichen Sie die Aufzeichnungen auf dem ablaufenden Papierstreifen mit der auf der Trommel hinsichtlich der Vor- und Nachteile!*
11. *Während bei einfachem Papier der Zeitmaßstab aufgedruckt ist, wird er bei Fotoschichten erst bei der Aufnahme markiert. Wie können Sie das machen?*
12. *Welche Gründe sind für die Verwendung einer ruhenden Schreibfläche maßgebend?*
13. *Welche Vorteile hat der Synchronmotor für den Papiervorschub bei einem zeitgeregelten Netz?*
14. *Wann kommt der Klinkwerkantrieb in Frage?*
15. *Was ist ein Störungsschreiber?*
16. *Warum begnügt man sich nicht bei Schreibern mit körperlichem Zeiger mit dem bogenförmigen Ausschlag der Schreibfeder, sondern konstruiert eine Geradföhrung?*
17. *Wonach ist die Güte einer Geradföhrung des Zeigers zu beurteilen?*

Teil IV: Momentanwert-Messer

Oszillograph heißt Schwingungsschreiber. Das bewegliche Organ muß schnellen Schwingungen folgen können, so daß die *Momentanwerte* einer Wechselstromkurve erkennbar sind. Sie wissen, daß ein Zeigerinstrument das nicht kann, weil die bewegten Massen zu träge sind. Daraus geht hervor, daß die Massen um so mehr verringert werden müssen, je höhere Frequenzen Sie schreiben lassen wollen.

Man unterscheidet *trägheitsbehaftete* und *trägheitslose* Oszillographen. Bei den ersteren kommen Sie demnach an eine Grenze der registrierbaren Frequenz, weil die Massen der schwingenden Körper aus mechanischen Gründen nicht beliebig verringert werden können. Von den möglichen Konstruktionen wird hier der *Schleifen-Oszillograph* besonders beschrieben und als trägheitsloser der *Katodenstrahl-Oszillograph*. Das sind die technisch wichtigsten Geräte.

1. Kapitel: Schleifen-Oszillographen

Das Prinzip der trägheitsbehafteten Oszillographen haben Sie schon bei der Besprechung der Vibrationsgalvanometer kennengelernt. In einem starken magnetischen Feld schwingt bei diesen eine Spule, eine Drahtschleife oder eine Saite infolge der ablenkenden Wirkung eines durchfließenden Wechselstromes, oder eine Magnetnadel im Wechselfeld (Nadel-VG), oder ein Metallplättchen mit Spiegel wird im elektrischen Wechselfeld in Schwingungen versetzt (elektrostatisches Prinzip). Nach diesen Konstruktionsmerkmalen sind auch Oszillographen gebaut worden.

Sie müssen aber einen großen Unterschied erkennen: Die Vibrationsgalvanometer nutzen die *Resonanz* aus, die Eigenschwingung wird auf die Frequenz des Meßstromes abgestimmt. Bei Oszillographen dagegen wäre das grundfalsch, denn Sie wollen doch alle möglichen Frequenzen aufzeichnen können, eine Schwingung mit möglichst allen Oberwellen sehen. Daher muß die Eigenschwingungszahl des beweglichen Organs, die bestimmt wird durch Masse und Richtkraft, weit über der höchsten Oberwelle liegen, damit Sie keine Verzerrungen durch Resonanz erhalten. Beim Oszillographen handelt es sich um *erzwungene Schwingungen*. Bei den üblichen Schleifen liegen die Eigenfrequenzen zwischen 1000 und 20 000 Hz.

Der Schleifen-Oszillograph arbeitet nach dem Lichtzeigerverfahren, das mit dem Text zu Bild 7 beschrieben wurde. Die Schleife besteht aus einem dünnen Metalldraht oder -band (Bild 21), das auf einer Seite über eine Rolle geführt und durch eine Feder gespannt ist, um eine große

Richtkraft zu erzielen. In der Mitte ist der etwa 1 mm^2 große Spiegel aufgeklebt. Wie bei den Zeigergeräten ist auch hier eine *Dämpfung* meist nötig. Deswegen ist die Schleife in einem Gehäuse untergebracht, das je nach dem gewünschten Dämpfungsgrad mit klarem *Paraffin-* oder *Rizinusöl* gefüllt ist. Der Lichtstrahl gelangt zum Drehspiegel durch ein Linsenfenster im Gehäuse. Das Öl absorbiert zwar einen Teil des Lichtes, vergrößert aber auch durch die Brechung des Lichtstrahles seinen Ausschlag.

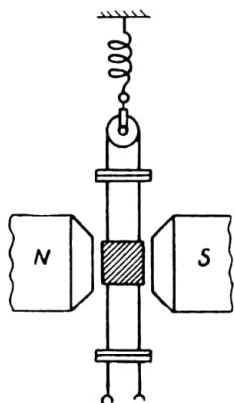


Bild 21. Meßschleife

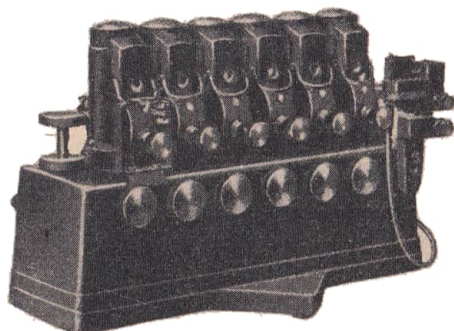


Bild 22. Satz für sechs Meßschleifen

Die fotografische Aufzeichnung bietet den Vorteil, daß man leicht mehrere Kurven zugleich auf demselben Fotopapier aufzeichnen kann. Bei den größeren Geräten ordnet man *bis zu sechs Schleifen nebeneinander* an

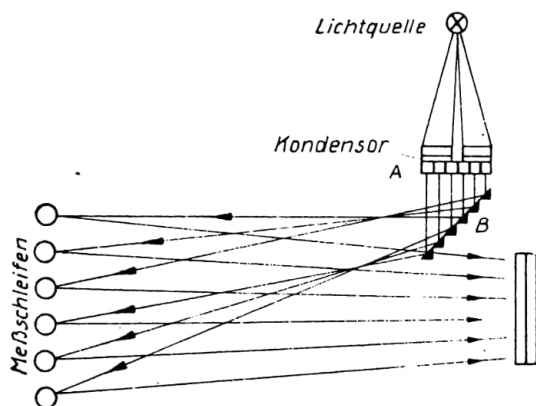


Bild 23. Sechsschleifen-Oszillograph

Bild 22), die leicht auswechselbar sind, damit Schleifen mit passender Eigenfrequenz und Empfindlichkeit eingesetzt werden können. Jede Schleife ist mit Justierschrauben um eine senkrechte und eine waagerechte Achse einstellbar. Der Meßsatz trägt auch den Spiegel für die Aufzeichnung der Nulllinie sowie den Zeitschreiber. Bild 23 zeigt schematisch, wie die von den sechs Spaltblenden A aus-

gehenden Strahlenbündel durch sechs totalreflektierende Prismen *B* auf die Linsenfenster der Meßschleifengehäuse gelenkt werden. Die Prismen sind verstellbar, so daß eine genaue Justierung des Strahlenbündels ermöglicht

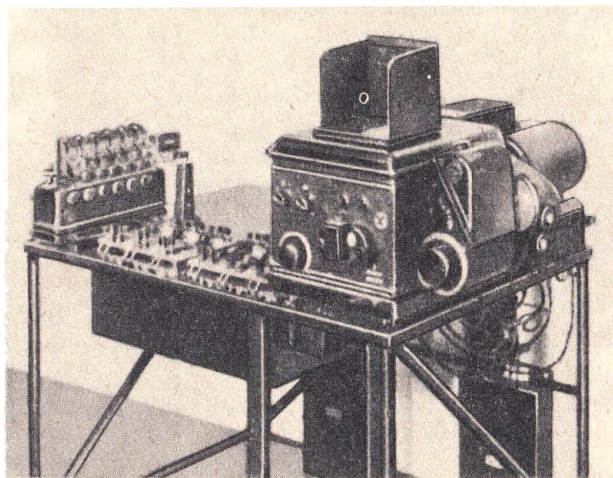


Bild 24. Sechsschleifen-Oszillograph

wird. Die Spaltbreite der Blenden ist einstellbar. Dadurch können Sie die Strichstärke der Kurven zur besseren Unterscheidung unterschiedlich machen. Die Schleifenspiegel reflektieren in bekannter Weise über die Zylinderlinse auf die Fotoschicht.

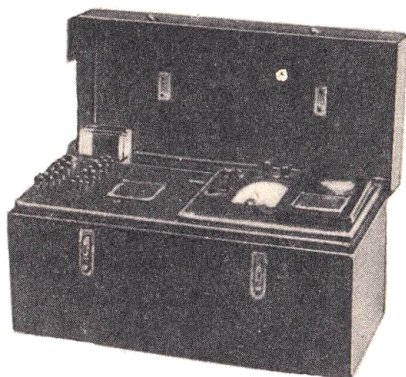


Bild 25. Tragbarer Oszillograph

Die Schleifen für Strom oder Spannung haben bei modernen Oszillographen hochwertige Dauermagnete, wodurch Gleichstrom für die Erregungen entfällt. Es gibt aber auch *Schleifen für Leistungsmessung* mit einem Elektromagnet für den Strompfad, während die Schleife mit einem Vorwiderstand den Spannungspfad bildet. Für die Schleifen sind regelbare *Neben- und Vorwiderstände* mit Grob- und Feineinstellung vorgesehen. Sie können damit den Lichtzeigeraus- schlag auf die gewünschte Amplitude einstellen.

Bild 24 ist die Gesamtansicht eines Gerätes in *offener Bauart*, d. h. mit frei aufgestelltem Meßsatz, wodurch die Schleifen bequem auszuwechseln und einzustellen sind. Dieses Gerät auf einem Gestell wird für ortsfeste Aufstellung in Laboratorien und Prüffeldern vielseitig verwendet. Daneben besteht das Bedürfnis nach einem *tragbaren Gerät* mit möglichst geringem Gewicht und in gedrängter Bauart (Bild 25) zur Mitnahme auf die Reise an die Meßstelle. Der abgebildete Oszillograph mit drei eingebauten Meßschleifen und allem Zubehör für die Beobachtung und die Aufnahme der Kurven ist in einem Metallkoffer untergebracht und wiegt rund 25 kg.

Für kurzzeitige Aufnahmen und für hohe Registriergeschwindigkeiten ist die Fotoschicht um eine rotierende Trommel gelegt, für Zeitaufnahmen hat man den ablaufenden Streifen.

Nun möchte man aber die Kurven auch sehen, ohne eine fotografische Aufnahme machen zu müssen. Vielleicht genügt Ihnen für einen bestimmten Zweck das Bild auf einer Mattscheibe, das Sie evtl. durch Auflegen von Pauspapier nachzeichnen können; oder Sie möchten erst einmal vor der Aufnahme mit den Regelwiderständen die Amplituden und auch die richtige Papiergeschwindigkeit einstellen, damit Sie eine gute Fotografie bekommen. Das ermöglicht die *Beobachtungsoptik*.

Die Auflösung der Lichtzeiger-Schwingung geschieht am besten mit dem *Polygonspiegel* (Bild 26), einem mehrflächigen Prisma, das mit genau ebenen Spiegeln belegt ist. Der vom Meßschleifenspiegel kommende Lichtstrahl schwingt in der Längsrichtung über einen der Spiegelstreifen und wird durch die Drehung des Polygonkörpers als Lichtpunkt über die gekrümmte *Mattscheibe* geführt. Sobald der Punkt die rechte Bildseite erreicht hat, muß der folgende Spiegelstreifen die Ablenkung übernehmen, damit keine Lücke auftritt. Das bestimmt die Anzahl der Spiegelstreifen.

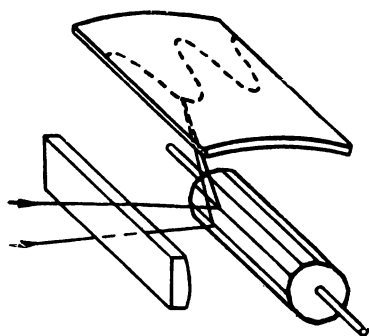


Bild 26
Polygonspiegel und Mattscheibe

Wollen Sie außerdem erreichen, daß die Kurve auf der Mattscheibe als *stehendes* Bild erscheint, dann muß der Lichtpunkt von dem gerade reflektierenden Spiegelstreifen genau bei demjenigen Momentanwert aufhören, den der nächste Spiegel übernimmt. Das hängt

außer von der Frequenz der Schwingung von der Geschwindigkeit des Spiegels ab. Nehmen Sie an, daß Sie auf der Mattscheibe *eine* Periode einer stillstehenden Sinuslinie sehen, deren Frequenz 1 Hz sei. Dann muß der Spiegel den Weg unter der Mattscheibe in 1 s machen, weil die Periode in 1 s abläuft. Hat der Polygonspiegel *a Flächen*, so muß eine sekundliche Drehzahl $n = 1/a \text{ [s}^{-1}\text{]}$ bei 1 Hz sein, also bei $f \text{ [Hz]}$ $n = f/a \text{ [s}^{-1}\text{]}$.

Bei der halben Drehzahl $n = f/2a \text{ [s}^{-1}\text{]}$ sehen Sie das Bild von zwei Perioden, bei $n = f/3a \text{ [s}^{-1}\text{]}$ von drei Perioden: Wenn Sie also *stehende Bilder* auf der Mattscheibe sehen wollen, muß die Frequenz des durch die Meßschleife fließenden Stromes zur Drehzahl des Polygonspiegels f/n in einem *ganzzahligen Verhältnis* stehen.

Die richtige Drehzahl erhalten Sie durch die *Drehzahlregelung* des Motors, der den Polygonspiegel und den Papiertransport synchron antreibt. Eine feinstufige Drehzahleinstellung wird beim Gleichstrommotor im Nebenschluß erreicht. Der Wechselstrommotor erhält durch einen feinstufigen Spannungsregler veränderliche Ankerspannung.

Bild 27 zeigt im Schema, wie ein Teil des vom Meßschleifenspiegel 1 kommenden Lichtbündels durch das Ablenkprisma 2 abgenommen und über das Prisma mit angesetzter Zylinderlinse 3 und den Polygonspiegel 4 auf die Mattscheibe 5 geführt wird. Diese Einrichtung gestattet *gleichzeitige Beobachtung und Aufnahme*, denn der restliche Teil des Lichtbündels geht durch die Zylinderlinse 6 und belichtet die Fotoschicht 8, sobald die Blende 7 geöffnet wird. Sie können somit durch Beobachtung des Bildes auf der Mattscheibe den geeigneten Zeitpunkt für die Aufnahme wählen.

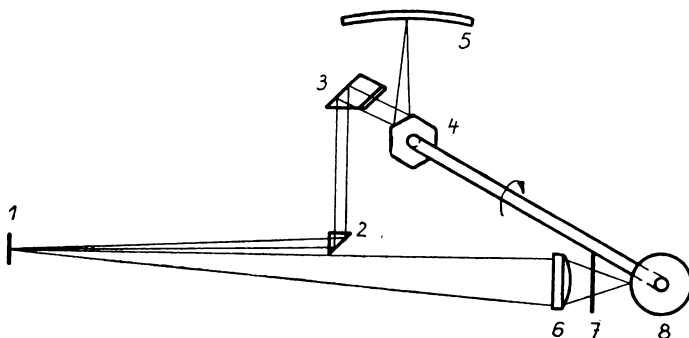


Bild 27. Schema des Strahlenganges

Für *Momentaufnahmen* mit hoher Registriergeschwindigkeit, für die sich die rotierende Trommel besonders eignet, ist die Blende 7 ein mechanisch oder elektrisch gesteuerter *Momentverschluss*. Die Trommel ist mit der lichtempfindlichen Schicht bespannt und läuft dauernd synchron mit dem Polygonspiegel, damit sie nicht erst beschleunigt werden muß, wenn Sie den Momentverschluß auslösen. Dieser öffnet dann und schließt selbsttätig, aber abhängig von der Stellung der Trommel derart, daß die Belichtungszeit einer Trommelumdrehung entspricht. Auf diese Weise sind Geschwindigkeiten der Fotoschicht bis zu 50 m/s erreichbar.

Statt der Trommel wird auch für Geschwindigkeiten bis zu 10 m/s, so bei dem abgebildeten tragbaren Oszillographen, ein *Drehspiegel* (Bild 28) verwendet, der den Lichtstrahl über eine *ruhende Fotoschicht* (Film oder

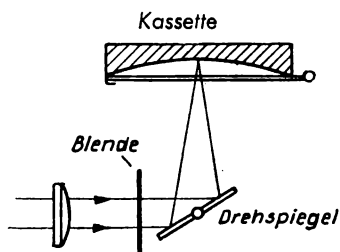


Bild 28. Drehspiegelanordnung

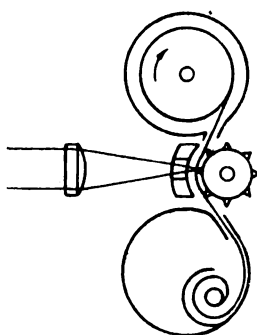


Bild 29. Trommelkassette

Bromsilberpapier 9×12 cm) lenkt, die nach dem Weg des Lichtpunktes gekrümmt in einer lichtdichten Kassette liegt. Der Drehspiegel läuft ebenfalls synchron mit dem Polygonspiegel wie bei Bild 27, und für den Momentverschluß gilt dasselbe wie bei der Trommel.

Wollen Sie *Zeitaufnahmen machen*, um längere Kurvenzüge zu erhalten, so setzen Sie an die Stelle der Trommel eine Papier- oder Film-Ablaufeinrichtung, die etwa nach Bild 29 ausgeführt ist. Aus der oberen lichtdichten Trommelkassette wird der Streifen durch ein Stiftenrad in die untere Aufnahmetrommel befördert, in der er sich zusammenrollt. Man erreicht Geschwindigkeiten bis etwa 2 m/s. Selbstverständlich können Sie den Streifen nicht wie die Trommel *vor* der Aufnahme laufen lassen. Sie kuppeln vielmehr, wenn Sie belichten wollen, den Stiftenrad-Antrieb entweder mechanisch oder im Sonderfall durch eine elektromagnetische Kuppelung ein. Dabei wird auch die Blende geöffnet.

Das Oszillogramm (Bild 30) in verkleinertem Maßstab zeigt Ihnen als Beispiel die Abschaltung eines Kurzschlusses durch eine moderne Hochspannungs-Sicherung für 6 A Nennstrom und beweist die außerordentlich

kurze Abschaltzeit von weniger als 1 ms. Sie sehen auch die Sinuskurve der Sternspannung des Netzes mit dem Spannungseinbruch im Moment des Kurzschlusses und unten die Kurve des Zeitschreibers, dessen Spiegel mit 500 Hz schwingt. Die Strecke zwischen zwei Spitzen entspricht demnach $1/500$ s. In Bild 30 muß es statt 1000 V richtig 1000 A heißen.

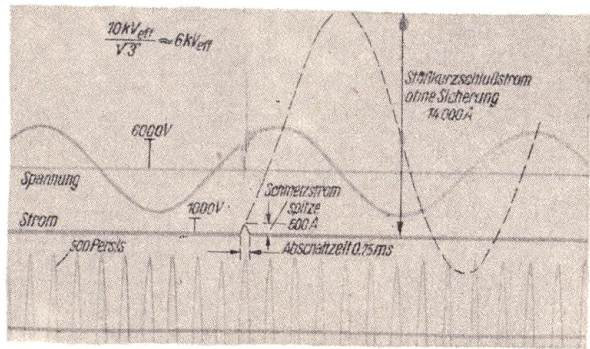


Bild 30. Oszillogramm

Sie könnten dieses Oszillogramm folgendermaßen aufnehmen: Die Spannungsschleife wird wie ein Spannungsmesser vom Spannungswandler der Anlage gespeist unter Zwischenschaltung eines Vorwiderstandes, der Grob- und Feineinstellung hat und zu dem Gerät gehört. Mit diesem Widerstand stellen Sie auf der Mattscheibe die Amplitude der Schwingung auf den Wert ein, wie ihn die spätere Aufnahme (Bild 30) zeigen wird. Dabei müssen Sie an die *höchstzulässige Belastbarkeit der Schleife* denken. Durch die ebenfalls angegebene *Empfindlichkeit* in mm Ausschlag je mA ergibt sich zwangsläufig der *höchstzulässige Ausschlag*.

Lehrbeispiel 2

Eine bestimmte Schleife mit etwa 5500 Hz Eigenfrequenz ungedämpft hat einen Widerstand von $1,4 \Omega$, eine Empfindlichkeit von $0,28 \text{ mm/mA}$ und eine höchstzulässige Wechselstrombelastung von 70 mA Anschluß an einen Spannungswandler 100 V sekundär.

Wie groß muß mindestens der Vorwiderstand sein? Welche höchstzulässige Amplitude auf der Mattscheibe bzw. Fotoschicht ergibt sich?

Lösung:

- Es ist $R = 100 \text{ V} / 0,07 \text{ A} = \underline{\underline{1430 \Omega}}$ insgesamt (Vorwiderstand + Schleife.)
- Bei 70 mA Effektivwert maximal ist die Amplitude $\sqrt{2} \cdot 70 \text{ mA}$ und demnach der höchstzulässige Ausschlag $\sqrt{2} \cdot 70 \text{ mA} \cdot 0,28 \frac{\text{mm}}{\text{mA}} \approx \underline{\underline{28 \text{ mm}}}$.

Die Stromschleife haben Sie an einen Stromwandler mit passender Unter-
setzung gelegt (Bild 31) und den zum Gerät gehörenden veränderbaren

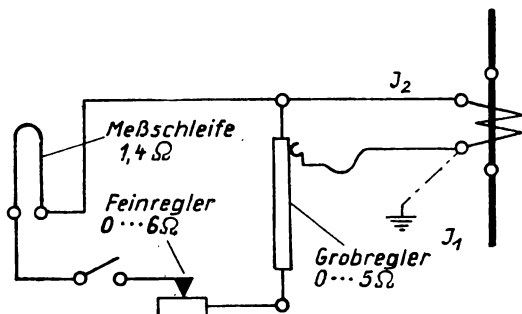


Bild 31. Anschluß der Meßschleife

haben Sie vor dem Anschließen der Schleife den Nebenwiderstand auf Null Ω und den Feinregler auf den größten Wert gedreht und mit dem eingebauten Schalter die Schleife abgeschaltet, um eine Überlastung der Schleife auszuschließen.

Sie haben nun auf der Mattscheibe die Amplituden eingeregelt, beim Strom sehen Sie praktisch nur eine gerade Linie (Bild 30), weil Sie den Nebenwiderstand im Hinblick auf den zu erwartenden Kurzschlußstrom auf einen ganz geringen Ohmwert gestellt haben. Wenn Sie zum Einleiten des Kurzschlusses einen ferngesteuerten Schalter haben (Ölschalter mit Druckluft- oder Motorantrieb oder ein Schütz) und dessen Betätigungsknopf gleichzeitig mit dem Auslösen der Aufnahme drücken, so haben Sie den interessierenden Vorgang mit größter Wahrscheinlichkeit auf dieser Momentaufnahme. Besser ist es, wenn der Auslöseknopf des Gerätes Hilfskontakte zur Einleitung des zu untersuchenden Vorganges hat. Man nennt diese Methode eine *gesteuerte Aufnahme*, weil der Momentverschluß den aufzunehmenden Vorgang steuert (auslöst).

Die umgekehrte Reihenfolge gibt es auch: Ein Hilfskontakt am schon als Beispiel erwähnten Ölschalter löst elektromagnetisch den Momentverschluß aus oder kuppelt bei Zeitaufnahmen den Ablauf des Fotostreifens elektromagnetisch ein. Man spricht dann von einer *gezielten Aufnahme*. Sie werden sich Beispiele denken können, bei denen der Beginn des elektrischen Ereignisses *nicht* von Ihrem Willen abhängig ist (z. B. Gewitterstörungen). Sie können dann doch nicht bei Zeitaufnahmen nutzlos den Fotostreifen ablaufen lassen, bis das Ereignis eintritt, und bei der Momentaufnahme

mit umlaufender Trommel könnte kein Mensch so schnell reagieren wie ein Kurzzeitrelais, das den Momentverschluß auslöst.

Zu erwähnen ist noch das *Oszilloskop*, bei dem Einrichtungen für die fotografische Aufzeichnung fortfallen, so daß nur die Beobachtung mit dem Polygonspiegel möglich ist. Stehende Kurvenbilder können auf Pauspapier nachgezeichnet werden.

Ein Oszilloskop mit besonders lichtstarker Optik kann zur Projektion der Kurven auf eine weiße Fläche eingerichtet werden zur Vorführung bei einem größeren Hörerkreis.

Die *Grenzen der Anwendung* des Oszillographen bestimmen die Eigenfrequenz der Schleife und die höchstmögliche Geschwindigkeit der Fotoschicht. Wesentlich über 20 000 Hz Eigenfrequenz in ungedämpftem Zustand, etwa 16 000 Hz mit Ölfüllung kann man nicht erreichen. Damit können Sie noch etwa 12 000 Hz mit zulässigem Amplitudenfehler schreiben, und diese Grenze reicht im allgemeinen noch für das Tonfrequenzgebiet aus. Die Empfindlichkeit dieser Schleife ist erheblich geringer als die einer Schleife mit niedriger Eigenfrequenz, das können Sie jedoch mit einem Röhrenverstärker ausgleichen. Mit der Schichtgeschwindigkeit, die die Auflösung der Schwingung bedingt (Formel (1)), kommt man aus mechanischen Gründen schwerlich über 50 m/s. Für das Tonfrequenzgebiet reicht das aber auch aus.

Zusammenfassung zu Teil IV, 1. Kapitel

Der Schleifen-Oszillograph benutzt das Prinzip des Drehspul-Meßwerks mit Spiegel, aber statt der Spule mit einer durch Federkraft gespannten Schleife als beweglichem Organ, das zwecks hoher Eigenfrequenz mit möglichst geringem Trägheitsmoment ausgeführt wird. Die Schleife bewegt sich im Magnetfeld entsprechend den Momentanwerten des durchfließenden Stromes, die der Lichtzeiger mit vergrößerter Amplitude auf einer Mattscheibe und fotografisch sichtbar macht.

Die Auflösung der Lichtzeigerschwingung in der Zeitachse besorgt bei modernen Ausführungen der Polygonspiegel für die Mattscheibe, eine mit der Fotoschicht bespannte, umlaufende Trommel für die Aufzeichnung oder bei ruhender Fotoschicht ein Drehspiegel für Kurzaufnahmen.

Für Langzeitaufnahmen hat man den lichtempfindlichen, konstant ablaufenden Streifen.

Polygonspiegel und Papiertransport werden von demselben drehzahl-geregelten Motor angetrieben und laufen synchron.

Bei der Kurzzeitaufnahme wird nur ein Momentverschluß geöffnet und nach einer Trommelumdrehung selbsttätig geschlossen.

Bei der Langzeitaufnahme wird der vorher stillstehende Streifentransport eingekuppelt.

Bei einer „gesteuerten Aufnahme“ löst der Oszillograph den aufzunehmenden Vorgang in einem gewünschten Augenblick aus, bei einer „gezielten Aufnahme“ leitet der elektrische Vorgang die Aufnahme ein.

Ü b u n g e n

18. *Die Oszillographenschleife führt erzwungene Schwingungen aus. Was verstehen Sie darunter im Gegensatz zu einer freien Schwingung?*
19. *Was stellen Sie sich unter dem Begriff Eigenfrequenz der Schleife vor?*
20. *Warum darf die Eigenfrequenz nicht innerhalb des Meßfrequenzbereiches liegen?*
21. *Wie wird die Empfindlichkeit der Meßschleife angegeben?*
22. *Erklären Sie, warum die Empfindlichkeit der Meßschleifen mit hoher Eigenfrequenz geringer ist als bei solchen mit niedriger Eigenfrequenz!*
23. *Wozu braucht man die zum Gerät gehörenden einstellbaren Vor- und Nebenwiderstände?*
24. *In der Schaltskizze Bild 31 hat der Grobregler insgesamt $5\ \Omega$ Widerstand, eingestellt sei die Stufe $0,05\ \Omega$. Der Feinregler steht auf $6\ \Omega$, der Stromwandler hat das Untersetzungsverhältnis $300/5$ A. Die Stromspitze sei primär 600 A. Wieviel mA fließen bei der Stromspitze durch die Meßschleife?*
25. *Der Polygonspiegel habe acht Spiegelflächen. Wieviel U/min muß er machen, damit Sie auf der Mattscheibe drei volle Perioden der Frequenz 50 Hz als stehendes Bild sehen?*
26. *Warum erhalten Sie immer ein stehendes Kurvenbild, wenn der Polygonspiegel mit passender Untersetzung von einem Synchronmotor angetrieben wird, der dieselbe Netzfrequenz erhält wie die Meßschleife?*

2. Kapitel: Katodenstrahl-Oszillograph

Der Katodenstrahl-Oszillograph benützt, wie bereits erwähnt, den praktisch trägheitslosen Katodenstrahl, d. h. den von der Katode einer Elektronenröhre ausgehenden *Elektronenstrahl*, als Schreibgriffel, da die Bahn der Elektronen durch magnetische oder elektrische Felder beeinflusst werden kann. Die Aufgabe ist also, einen Elektronenstrahl zu erzeugen, ihn möglichst punktförmig auf die Schreibfläche zu konzentrieren, wie es beim Lichtstrahl durch die Optik geschieht, und ihn durch die zu messenden Ströme oder Spannungen verzerrungsfrei zu steuern.

Das heutige Gerät ist eine Weiterentwicklung der

Braunschen Röhre

(Bild 32), nach dem Physiker Braun genannt, der 1897 damit Oszillogrammaufnahm.

In das evakuierte Glasgefäß sind eine metallene Katode *K*

und ein durchbohrtes Anodenblech *A* eingeschmolzen. Zwischen beide wird eine hohe Gleichspannung gelegt, die eine Glimmentladung hervorruft. Die dadurch gebildeten Elektronen werden als negative Ladungsträger durch die positive Anode angezogen; z. T. fliegen sie durch die Bohrung von *A*, so daß ein dünner Elektronenstrahl aus dem Entladungsraum *E* in den Steuerraum *St* gelangt.

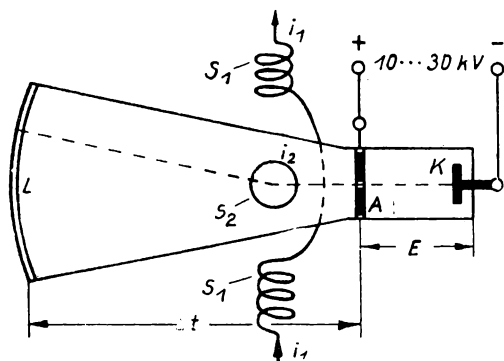


Bild 32. Braunsche Röhre

Damit ist der erste Teil der Aufgabe erfüllt. Die Erzeugung und Beschleunigung der Elektronen durch eine entsprechend hohe Spannung im Entladungsraum, damit ein Teil infolge ihrer kinetischen Energie durch das Loch im Anodenblech in den Steuerraum weiterfliegt. Zwar ist die Masse eines Elektrons sehr gering ($9,1 \cdot 10^{-28}$ g Masse), aber die Geschwindigkeit ist eine Funktion der Spannung zwischen *A* und *K* (bei 10 kV theoretisch 59 000 km/s), und so erhält man durch die Menge und durch die Geschwindigkeit der Elektronen die für die Schreibgeschwindigkeit nötige Auftreffenergie.

Bei der skizzierten Röhre ist die Strahlquelle *K* eine „kalte Katode“ in Form einer runden Scheibe, aus der die Elektronen austreten im wesent-

lichen durch den Aufprall positiver Ionen aus der Ionisierung der restlichen Luftmoleküle im Entladungsraum. Verwendet man eine Glühkatode, wie Sie sie von den Radoröhren her kennen, so kommt man mit Erregerspannungen von etwa $300 \cdots 500 \text{ V}$ aus, wenn die damit erzielte Elektronengeschwindigkeit genügt, um das Oszillogramm einwandfrei zu schreiben. Durch die Erwärmung der Katode auf Glühtemperatur wird die kinetische Energie der freien Leitungselektronen im Metall (Wolfram-Heizdraht) so weit gesteigert, daß ein Teil ins Vakuum austreten kann. Noch leichter geschieht dies, wie Sie wissen, aus dünnen Schichten der Erd-Alkalimetalle, besonders des Bariums. Die dünne Bariumschicht wird auf einer Unterlage von Bariumoxyd gebildet und meistens durch einen Wolframdraht indirekt geheizt. Die aus der Glühkatode ausgetretenen Elektronen müssen nun nur noch durch die Saugspannung an der Anode beschleunigt werden. Dazu ist für dieselbe Menge eine kleinere Spannung nötig als bei der kalten Katode, bei der die Wegstrecke ionisiert werden muß. Allerdings verringern sich mit der Spannung die Geschwindigkeit und die Energie der Elektronen zum Nachteil der Schreibfähigkeit.

Im Steuerraum (Bild 32) kommt der Katodenstrahl in die gekreuzten Magnetfelder der beiden Spulenpaare S_1 und S_2 , deren Achsen senkrecht aufeinanderstehen. Die Spulen S_2 liegen vor bzw. hinter der Zeichenebene. *Bewegte Elektronen* stellen einen elektrischen Strom dar, der nach dem Ihnen bekannten Gesetz *im Magnetfeld abgelenkt* wird. Verändern Sie demnach die Ströme i_1 und i_2 der Spulen, so folgt der Katodenstrahl der resultierenden Krafttrichtung, und der Auftreffpunkt beschreibt auf der *Schreibfläche L* eine Kurve. Diese Schreibfläche ist ein *Leuchtschirm* mit fluoreszierender Schicht (Zinksulfid), die am Auftreffpunkt der Elektronen je nach ihrer Energie mehr oder weniger zum Leuchten angeregt wird. Es ist ein gelbgrünliches Licht; denken Sie vergleichsweise an die Leuchtziffern einer Uhr. Ein *stehendes Kurvenbild* können Sie durch *Auflegen von Pauspapier* auf die Außenfläche des Schirmes nachzeichnen, oder Sie machen eine *Kontakt-Fotokopie* in der Dunkelkammer, oder Sie setzen außen vor den Leuchtschirm eine *Fotokamera*. Bei ausreichender Bildhelligkeit können Sie auch *veränderliche Kurven* mit einer *Kinokamera* mit lichtstarker Optik fotografieren.

Das Fotografieren des Leuchtbildschirmes ist jedoch nicht immer möglich. Denken Sie an ganz kurzzeitig ablaufende einmalige Schwingungsvorgänge (z. B. Schaltvorgänge), bei denen die Belichtungszeit für obige Verfahren nicht ausreicht. Dann schreibt man die Kurve direkt auf die Fotoschicht, weil rasch fliegende Elektronen fotografisch sehr wirksam sind. Wenn die

Fotoschicht in das Vakuum des Steuerraumes gebracht wird, spricht man von *Innenfotografie*, die natürlich nicht bei der abgeschmolzenen Röhre möglich ist, sondern nur bei den größeren Geräten, bei denen das Vakuum durch Pumpen erzeugt und im Betrieb aufrechterhalten wird. Es sind dann nicht mehr Gefäße aus Glas, sondern sie werden zerlegbar mit Vakuumdichtungen möglichst ganz aus Metallteilen zusammengebaut, wodurch auch eine Abschirmung gegen Fremdfelder erzielt wird. Die Konstruktionen für die Aufnahme und die Beobachtung im Vakuum sind sehr mannigfaltig. Sie können bei dieser kurzen Übersicht nicht im einzelnen beschrieben werden.

Man hat z. B. eine rotierende Filmtrommel, die von außen durch einen Motor über eine elektromagnetische Kupplung angetrieben wird, oder eine ruhende Filmkassette mit elektromagnetisch betätigtem Filmwechsel nach jeder Aufnahme. Ein Leuchtschirm, der durch ein Schauloch beobachtet wird, kann vor der Aufnahme elektromagnetisch aus der Bildebene geschwenkt werden.

Sie können sich vorstellen, daß ein solcher *Hochleistungs-Oszillograph* einen erheblichen Aufwand erfordert für die Hochvakuum pumpen, für die Vakuum-Regelung, für die Erzeugung der hohen Erreger-Gleichspannung und für die Meß- und Steuereinrichtungen. Er ist

daher nur für größere Laboratorien lohnend. Sie sehen eine Ausführung in Bild 33 und zum Vergleich ein kleines *tragbares Gerät* für Netzanschluß mit abgeschmolzener Braunscher Röhre für 800 V Anodenspannung, das für viele Zwecke ausreicht (Bild 34), mit etwa 260 mm Höhe, 160 mm Breite, 330 mm Tiefe und etwa 12 kg Gewicht.

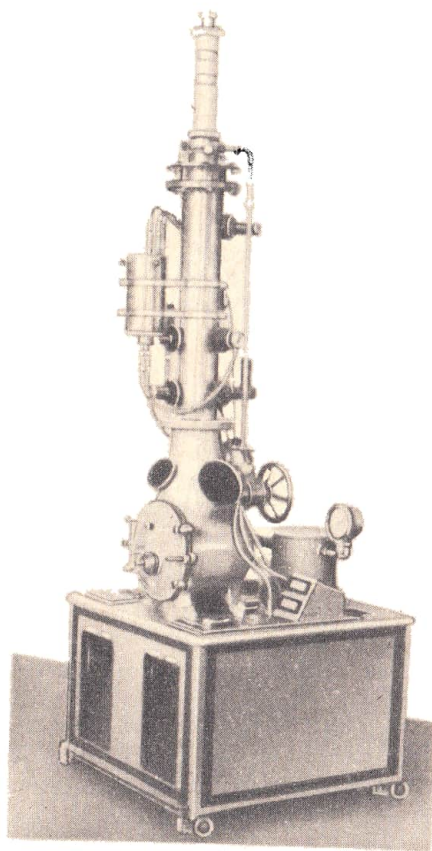


Bild 33. Metall-Oszillograph

Hochleistungs-Oszillographen in Metallausführung gibt es auch für *Außenfotografie*. Bei genügender Energie können Elektronen aus dem Steuer-
raum durch eine Metallfolie in Luft normalen Druckes bis zu einigen cm
Weglänge austreten (LENARD-Fenster), so daß eine außen dicht vor diesem Fenster
befindliche Fotoschicht vom Katodenstrahl
geschwärzt wird.

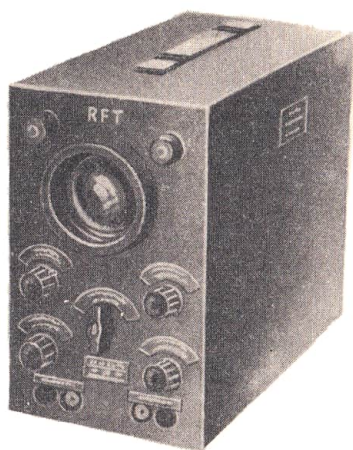


Bild 34. Tragbarer Oszillograph

Nach diesem Überblick über die Möglich-
keiten der Sichtbarmachung der Strahl-
bewegung nun zur Steuerung zurück. Zu-
nächst ist der *Strahl* auf der Schreibfläche
zu einem hellen Punkt von etwa 1 mm \varnothing
zu *konzentrieren*, was bei der Röhre nach
Bild 32 noch nicht einwandfrei war, denn
davon hängt die Strichstärke für eine deut-
lich sichtbare Kurve ab.

Sie wissen aus der Lichtoptik, daß Licht-
strahlen gebrochen werden, wenn sie aus
einem Stoff bestimmter Dichte in einen von
anderer Dichte übergehen, und daß man
dadurch mit einer *Linse* die Strahlen auf einen *Brennpunkt vereinigen*
kann. Mit Elektronen können Sie das auch machen, zwar nicht mit Glas-
linsen, aber durch die Wirkung magnetischer oder elektrischer Felder, denn
die Elektronenbahn wird sowohl durch das Feld einer stromdurchflossenen
Spule als auch durch das elektrische Feld einer positiv oder negativ ge-
ladenen Elektrode beeinflusst. Man spricht von der *Elektronenoptik*, weil
die Elektronenstrahlen mit diesen *elektrischen Linsen* das Brechungsgesetz
der Lichtoptik befolgen.

Betrachten Sie in Bild 35 ein einfaches elektronenoptisches System im Ent-
ladungsraum einer Hochvakuumröhre, das elektrostatisch auf die Elektro-
nen wirkt! Die Heizwendel ist in einem keramischen Hohlkörper 1 unter-
gebracht und galvanisch mit der Bariumoxydschicht 2, der eigentlichen
Katode, verbunden. Der Blechzylinder 3, als *Wehnelt-Zylinder* nach
dem Physiker Wehnelt oder auch als Steuerelektrode oder Gitter
bezeichnet, weil er in seiner Wirkung mit dem Gitter der Verstärkerröhre
zu vergleichen ist, hat eine Öffnung gegenüber der Elektronen emittieren-
den Katode. Dem *Wehnelt-Zylinder* 3 können mittels des Spannungs-
teilers R_z veränderliche negative Spannungen gegenüber der Katode 2
gegeben werden. Je nach der Höhe der negativen Vorspannung dringen

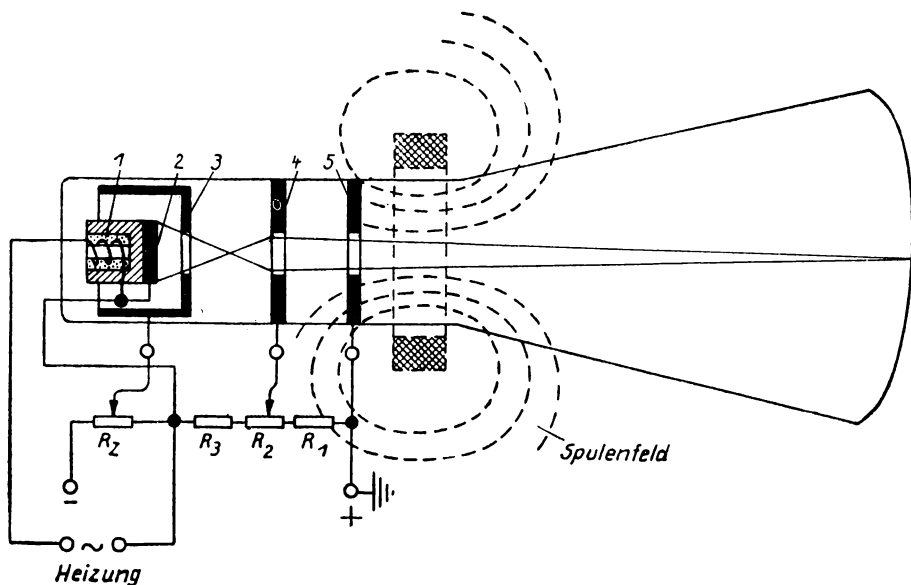


Bild 35. Schema der Längssteuerung

mehr oder weniger Elektronen, die doch auch negativ geladen sind, durch die Öffnung des Zylinders infolge der anziehenden Wirkung der positiv geladenen Lochblenden 4 und 5. Sie erkennen damit zunächst durch Vergleich mit dem Gitter der Verstärkerröhre eine wichtige Aufgabe des Wehnelt-Zylinders 3, nämlich die Veränderung der Elektronenzahl und damit der Helligkeit des Leuchtpunktes durch Einstellung der negativen Vorspannung zu ermöglichen. Falls Sie sich mit der Fernsehtechnik beschäftigen haben, werden Sie wissen, daß diese *Helligkeits-Steuerung* durch Spannungsimpulse bei der Braunschen Röhre als Bildempfänger eine Rolle spielt. Das sei nebenbei erwähnt.

Nun sehen Sie aus der Skizze (Bild 35) auch die weitere Aufgabe der Elektroden. Durch die Form des elektrischen Feldes wird der Strahl kurz hinter dem Zylinder 3 zu einem kleinen Querschnitt zusammengezogen, und dieser wird durch die als elektrische Linsen wirkenden Lochblenden 4 und 5 auf der Schreibfläche abgebildet.

Wie erreichen Sie die *Scharfeinstellung des Leuchtfleckes*? Das Bild kann doch nur bei einem bestimmten Feldverlauf scharf sein, der durch die Höhe der Potentiale bedingt ist. Die Verschiebung der Linsen wie bei der Licht-

optik ist hier aus mechanischen Gründen nicht möglich, aber Sie können die *Spannung einer Lochblende verändern*, die in der Elektronenoptik die Brennweite beeinflusst, und zwar verwenden Sie dazu die Blende 4, die deswegen als *Linsenelektrode* bezeichnet wird, mit fein einstellbarem Abgriff am Spannungsteiler-Widerstand R_2 . Die Lochscheibe 5 ist die *Anode* mit der höchsten Spannung, unter deren Einfluß die Elektronen mit ihr entsprechender Geschwindigkeit in den Steuerraum gelangen.

Die Form und Anordnung der Elektroden nach Bild 35 ist nur ein Beispiel. Es gibt eine Reihe anderer Ausführungen: Die Linsenelektrode 4 kann ein Hohlzylinder sein, oder die Lochscheiben 4 und 5 wirken als Vor- bzw. Hauptanode, und dazwischen liegt ein Hohlzylinder als Linse zur Fleckschärfe-Einstellung, oder noch andere Kombinationen für denselben Zweck. Die Innenwand des Kolbens hat einen *Graphitbelag zur Abschirmung*, der mit der geerdeten Anode verbunden ist.

Die *magnetische Linse*, die in Bild 35 angedeutet ist, wird auch gelegentlich für Hochleistungsröhren verwendet. Sie erzeugt ein magnetisches Feld in Strahlrichtung, das im Verhältnis zur Strahllänge kurz, also inhomogen, ist. Nach der Dreifinger-Regel erhalten die Elektronen beim Durchfliegen dieses Feldes einen Impuls auf die Strahlachse zu, der dem jeweiligen Abstand von der Achse proportional ist. Bei einer passenden Spulenstromstärke liegt der Elektronen-Brennpunkt auf der Schreibfläche.

Zu erwähnen ist noch die Strahlenkonzentration bei der *gasgefüllten Röhre* (Argon oder Hg-Dampf), die heute als Oszillograph nur selten verwendet wird. Hier entsteht durch Ionisierung des verdünnten Gases bzw. Dampfes eine zylindrische Raumladungswolke um den Katodenstrahl herum, die ihn so zusammendrückt, daß sich ein heller scharfer Leuchtfleck erreichen läßt, heller als bei gleicher Anodenspannung mit der Vakuumröhre. Da aber zur Ionisierung eine gewisse Zeit nötig ist, versagt diese Konzentration bei hoher Schreibgeschwindigkeit; über etwa 20 kHz wird die Kurve nicht mehr scharf.

Mit den bisher beschriebenen elektronenoptischen Einrichtungen erreichen Sie die *Längssteuerung* des Strahles, die Schärfe- und Helligkeitseinstellung des Brennfleckes. Die *Quersteuerung* bewirkt die eigentliche Schreibbewegung. Die Strahlablenkung kann, wie bereits erwähnt, mit Spulen nach Bild 32 oder durch das elektrische Feld zwischen zwei Metallplatten P_1 in der einen Richtung und P_2 in der dazu senkrechten Richtung erreicht werden. Mit den Ziffern 1 und 2 deutet man die Reihenfolge der Plattenpaare an nach der Flugrichtung der Elektronen von der Katode aus (Bild 36 und 37).

Legen Sie eine Spannung an ein Plattenpaar, so wird der negative Elektronenstrahl von der positiven Platte angezogen und von der negativen abgestoßen. Die Ablenkung des Strahls, sichtbar an der Auswanderung des Brennflecks aus seiner Ruhelage auf dem Leuchtschirm, ist der Spannung an den Platten proportional, die Kurve auf dem Leuchtschirm entspricht also den Momentanwerten einer an das Meßplattenpaar angelegten

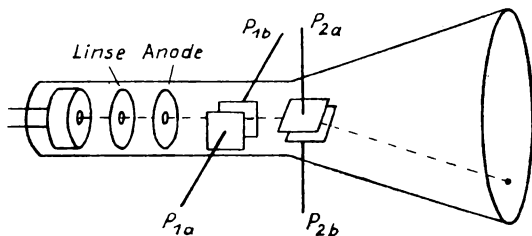


Bild 36. Schema der Ablenkung

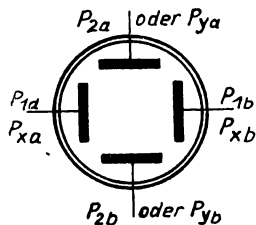


Bild 37
Darstellung im Schaltplan

Wechselspannung. Um die Kurve sehen zu können, müssen Sie nur noch die hin- und hergehende Bewegung des Leuchtflecks in der Richtung senkrecht dazu auseinanderziehen. Übrigens ist die Ablenkung nur dann der Meßspannung proportional, wenn die Längsgeschwindigkeit der Elektronen konstant ist, also bei konstanter Beschleunigungs-(Anoden-)spannung. Je höher die Geschwindigkeit ist, um so größer muß für einen bestimmten Ablenkungsbetrag die Meßspannung sein, um die Elektronen aus ihrer Bahn zu reißen. Vergleichen Sie den Elektronenstrahl mit einem Wasserstrahl aus einem Gartenschlauch, so haben Sie ähnliche Verhältnisse: Je größer die Geschwindigkeit der vom Wasserdruck (Spannung!) abhängigen Wasserteilchen ist, um so größeren Gegendruck merken Sie, wenn Sie das Wasser mit der Hand seitlich ablenken wollen. Eine Röhre mit hoher Anodenspannung braucht also unter sonst gleichen Verhältnissen eine höhere Ablenkspannung an den Platten als bei niedriger Anodenspannung. Der Hersteller der Röhre gibt die *Empfindlichkeit* bei der Anodenspannung an, z. B. 0,25 mm/V, dann erhalten Sie bei 1 V an den Platten eine Strichlänge von 0,25 mm auf der Schreibfläche. Die Empfindlichkeit steigt mit kleinerer Anodenspannung, dafür wird aber das Leuchtbild dunkler.

Reicht die Empfindlichkeit für die aufzunehmende Meßspannung nicht aus, so wird ein *Röhrenverstärker* verwendet, der natürlich in dem Frequenzbereich, für den er bemessen ist, verzerrungsfrei arbeiten muß. Im tragbaren Gerät (Bild 34) ist ein zweistufiger Verstärker für den Frequenzbereich 20 Hz bis 1 MHz, Verstärkungsfaktor etwa 1000fach, zusammen

mit dem Netzanschlußteil und dem Kippgerät eingebaut, das die Ablenkung längs der Zeitachse besorgt, wie nachstehend erläutert wird. Ohne den Verstärker können Sie mit diesem Gerät noch Frequenzen bis zu einigen MHz messen, wenn die Meßspannung zur Ablenkung ausreicht.

Über die Erzeugung der *Zeitachse* durch die Bewegung einer Fotoschicht senkrecht zur Schwingungsebene des Katodenstrahls wissen Sie Bescheid. Sie erhalten dann die Schwingung aufgelöst in rechtwinkligen Koordinaten, aber bei Hochfrequenzen können Sie die Schicht aus mechanischen Gründen nicht mehr schnell genug bewegen [4]. Sie lassen dann die Fotoschicht wie den Leuchtschirm stillstehen und lenken den Strahl längs

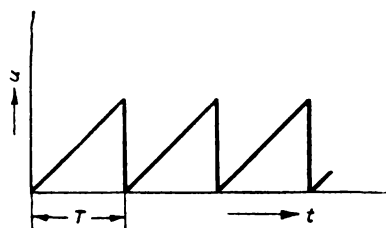


Bild 38. Ideale Kippspannung

der Zeitachse *zeitproportional* ab, daß Sie an das Plattenpaar P_1 eine veränderliche Spannung u legen (Bild 38), deren Verlauf im Idealfall der *Sägezahnkurve* entspricht. Die linear ansteigende Spannung u führt den Strahl in Richtung der Abszisse über die Schreibfläche mit konstanter Geschwindigkeit, am Ende der Ablenkung sinkt die Spannung rasch auf Null, wodurch

der Strahl in die Ruhelage zurückspringt, und nun wiederholt sich der Vorgang periodisch. Es ist also ähnlich wie beim Polygonspiegel des Schleifen-Oszillographen. Dort wird die Schwingung des Lichtstrahls in der dazu senkrechten Richtung durch eine bewegte Spiegelfläche über die Mattscheibe geführt, und die nächste Spiegelfläche läßt den Strahl wieder bei demselben Momentanwert der Kurve beginnen, wenn ein „stehendes Bild“ erscheinen soll.

Stellen Sie sich vor, daß Sie gerade eine volle Periode einer Sinuskurve mit der Zeitdauer T sehen, dann muß der Spannungsanstieg u (Bild 38) auch T Sekunden dauern, d. h., der senkrecht schwingende Strahl muß während dieser Zeit waagerecht über den Leuchtschirm wandern, damit er beim nächsten Spannungsanstieg wieder an derselben Stelle anfängt, so daß immer wieder derselbe Kurvenzug „überschrieben“ wird. Dadurch erhalten Sie das „stehende Bild“ mit bedeutender Helligkeitssteigerung. Man nennt das die *Synchronisierung* der beiden Ablenkbewegungen.

Was geschieht, wenn der Spannungsanstieg doppelt so lange dauert wie eine Periode der Schwingung? Dann sinkt die Geschwindigkeit der Zeitablenkung auf die Hälfte, und Sie sehen demnach zwei volle Perioden auf dem Schirm.

Eine Spannung, die nach Erreichen eines bestimmten Wertes plötzlich auf Null zurückgeht, nennt man *Kippspannung* und die Frequenz des Kurvenzuges (Bild 38) $f = 1/T$ die *Kipffrequenz*. Steht diese zur Meßfrequenz in einem ganzzahligen Verhältnis, dann haben Sie stehende Bilder.

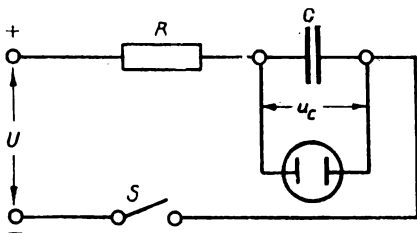


Bild 39. Kippschaltung

Zur Erzeugung der *Kippspannung* gibt es eine ganze Reihe von Anordnungen, von denen nur eine grundsätzliche besprochen werden soll. Nach Bild 39 wird ein Kondensator mit parallelgeschalteter Glimmlampe über einen Widerstand aufgeladen. Die Spannung der Stromquelle ist höher als die Zündspannung der Glimmlampe.

Die Spannung am Kondensator steigt bekanntlich während der Ladung exponentiell an nach der Formel

$$u_C = U \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right) [\text{V}] \quad \begin{matrix} t [\text{s}] \\ R [\Omega] \\ C [\text{F}] \end{matrix} \quad (2)$$

Die Formel sagt Ihnen, daß die Kondensatorspannung u_C mit Zunahme von R und C langsamer ansteigt. $R \cdot C$ ist die *Zeitkonstante* in Sekunden, denn $\left[\frac{\text{V}}{\text{A}} \cdot \frac{\text{As}}{\text{V}} \right] = [\text{s}]$.

Schalten Sie mit dem Schalter S ein, dann beginnt der Spannungsanstieg (Bild 40) nach Formel (2). Wird die Zündspannung U_Z der Glimmlampe erreicht, so wird die Gasfüllung durch Ionisierung leitend, der Kondensator entlädt sich in sehr kurzer Zeit über die Gasstrecke, bis diese bei der Löschspannung U_L durch Aufhören der Ionisierung wieder nichtleitend wird. Dann setzt wieder die Ladung ein usw.

Sie sehen, daß eine Kippschwingung entsteht; allerdings wird die ideale Sägezahnkurve mit geradlinigem Spannungsanstieg nicht erreicht. Die Krümmung bedeutet doch, daß die

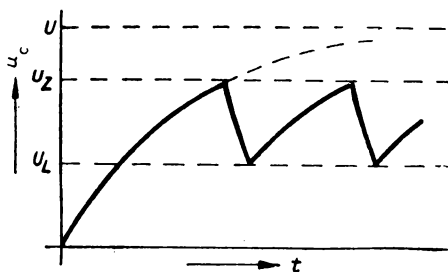
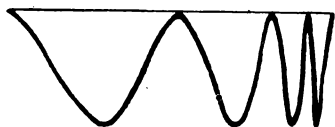


Bild 40. Kippschwingung

Strahlablenkung gegen das Ende der Zeitachse langsamer wird, infolgedessen erscheint die Kurve am Anfang weiter auseinandergezogen.

Die Verzerrung sehen Sie an der Nachzeichnung des aufgenommenen Oszillogrammes einer Sinuskurve (Bild 41). Die Zeitablenkung war von links nach rechts; der Rücklauf des Strahls von rechts nach links war auch noch schwach zu sehen, links stärker, weil die Entladungskurve auch gekrümmt ist.

Lineare Zeitablenkung erreicht man mit Kippschaltungen, die statt der Glimmlampe eine *gittergesteuerte Ionenröhre* (gasgefüllte Dreipolröhre) verwenden, und moderne Kippgeräte für höchste Ansprüche hinsichtlich der erzielbaren Kippfrequenz sind mit *gittergesteuerten Hochvakuumröhren* (Lbf. „Elektronenröhren“) versehen. Die Gittersteuerung ermöglicht die *selbsttätige Synchronisierung* der Kippfrequenz mit der Meßfrequenz, um stehende Bilder zu erhalten. Sie erinnern sich, daß dafür



verzerrter Zeitmaßstab

Bild 41. Schwingung
mit verzerrtem Zeitmaßstab

die Meßfrequenz gleich oder ein ganzzahliges Vielfaches der Kippfrequenz sein muß. Die Meßspannung oder ein Bruchteil davon wird dem Gitter einer Röhre der Kippschaltung zugeführt, falls sie zu klein oder nicht belastbar ist, unter Zwischenschaltung eines Verstärkers. Die eingehende Erläuterung dieser Röhrenschaltungen würde hier viel zu weit führen. Das Grundsätzliche der Schal-

tung Bild 39, die gesteuerte Ladung und Entladung des Kippkondensators, ist allen Schaltungen gemeinsam. Dabei sind zur Grobeinstellung der Kippfrequenz mehrere Kondensatoren verschiedener Kapazität vorgesehen, von denen einer mit einem Stufenschalter ausgewählt wird. Die Erläuterung *aller* Einzelheiten würde, wie gesagt, den Rahmen des Lehrbriefes überschreiten. Es gibt umfangreiche Bücher, die nur den Katodenstrahl-Oszillograph und seine vielfältige Anwendung behandeln. Erwähnt sei nur das Schreiben in mehreren Zeilen nacheinander zur Verlängerung der Zeitachse (auch bei der Fernsehtechnik), die Erzeugung einer kreisförmigen oder spiralen Zeitachse (z. B. für Echo-Messungen mit elektromagnetischen Wellen), die Helligkeitsmodulation mit dem *Wehnelt*-Zylinder zur Erzeugung von Zeitmarken, die Rücklaufverdunklung des Strahls und als besonderes Kapitel die *Mehrfach-Oszillographie*, also die gleichzeitige Aufzeichnung mehrerer Vorgänge, wie es auch der Mehrschleifen-Oszillograph gestattet. Das ist möglich mit je einer Röhre für jeden Vorgang, wobei man die einzelnen Kurven optisch mit Hilfe von Spiegeln und Linsen auf eine gemeinsame Beobachtungs- oder Fotofläche zusammenbringen

kann. Das bedeutet natürlich einen großen Materialaufwand. Eine einfachere Lösung ist der *Mehrstrahl-Oszillograph*, bei dem mehrere Systeme in einem gemeinsamen Vakuumgefäß untergebracht sind, so daß die einzelnen Vorgänge gleich auf demselben Leuchtschirm sichtbar sind. Ferner besteht noch die Möglichkeit, einen Einstrahl-Oszillograph auf die einzelnen Vorgänge nacheinander umzuschalten.

Zusammenfassung zu Teil IV, 2. Kapitel

Der Katodenstrahl-Oszillograph erzeugt einen Elektronenstrahl, der durch ein von der Meßgröße erregtes elektrisches oder magnetisches Feld proportional abgelenkt wird. Die Ablenkung wird auf einem Leuchtschirm oder einer Fotoschicht sichtbar.

Der Strahl wird fast ausschließlich in weitgehend ausgepumpten Gefäßen erzeugt; die Füllung mit verdünntem Edelgas geschieht im Ausnahmefall.

Bei großen Oszillographen in Metallbauweise wird das Vakuum laufend durch Pumpen aufrechterhalten. Mit sehr hoher Spannung und entsprechender Strahlenergie erfolgt die Emission aus der „kalten Katode“. Die moderne *Braunsche* Röhre ist ein abgeschmolzenes evakuiertes Glasgefäß mit indirekt geheizter Oxydkatode und verhältnismäßig niedrigen Anodenspannungen.

Die Strahlkonzentrierung gelingt mit elektronenoptischen Hilfsmitteln, elektrischen und magnetischen „Linsen“, wodurch der kleinste Querschnitt des Strahls als Brennfleck auf dem Leuchtschirm abgebildet wird. Die Scharfeinstellung geschieht durch Veränderung des Potentials einer elektrischen Linse.

Die Helligkeit des Leuchtfleckes kann durch eine veränderbare negative Vorspannung am *Wehnelt-Zylinder*, der als Steuergitter wirkt, gesteuert werden.

Bei Steuerung in zwei zueinander senkrechten Richtungen sind zwei Plattenpaare vorgesehen, evtl. kombiniert mit Spulenablenkung. Das eine Paar lenkt den Strahl proportional den angelegten Spannungs- oder Stromwerten in der Meßrichtung ab. Die Zeitachse wird durch Bewegung der Fotoschicht erzielt oder durch zusätzliche Ablenkung des Strahles mittels des zweiten Plattenpaares, dem eine Kippspannung zugeführt wird.

Die Kippspannung wird mit einem Kippgerät durch periodische Ladung und Entladung eines Kondensators erzeugt. Ihre veränderliche Frequenz kann durch die Meßfrequenz zwangsläufig gesteuert werden (Synchronisierung), um ein stehendes Bild zu erhalten.

Mit einem besonders sorgfältig aufgebauten Elektronenröhren-Verstärker wird die Meßspannung verzerrungsfrei verstärkt, falls sie für die Ablenkempfindlichkeit der Meßplatten nicht ausreicht.

Für Sonderfälle wird der Strahl waagerecht in mehreren Zeilen oder auch kreisförmig oder spiralförmig geführt.

Für die gleichzeitige Aufnahme mehrerer elektrischer Vorgänge sind Mehrstrahl-Oszillographen entwickelt worden.

Ü b u n g e n

27. *Warum fliegen in der Braunschen Röhre die Elektronen von der Katode zum Leuchtschirm?*
28. *Was ist der Unterschied zwischen kalter Katode und Glühkatode?*
29. *Warum genügt bei der Glühkatode eine geringere Anodenspannung als bei der kalten Katode zur Erzeugung des gleichen Elektronenstromes?*
30. *Was verstehen Sie unter Elektronenoptik?*
31. *Zu welchem Zweck benutzt man elektrische und magnetische Linsen beim Katodenstrahl-Oszillograph?*
32. *Wodurch wird die vom Meßplattenpaar in der Y-Richtung erzeugte Schwingung auf dem Leuchtschirm in der X-Richtung auseinandergezogen?*
33. *Unter welcher Bedingung sehen Sie bei periodischen Vorgängen auf dem Leuchtschirm ein stehendes Bild?*
34. *Sie messen eine Frequenz von 5 kHz und möchten fünf volle Perioden auf dem Schirm haben. Welche Kippfrequenz stellen Sie ein?*
35. *Wie kommt es, daß Sie eine ganze Kurve sehen, obwohl sich doch nur ein leuchtender Punkt bewegt?*
36. *Erläutern Sie den Begriff Ablenkempfindlichkeit!*
37. *Bei einer Aufnahme beschreibt der Leuchtfleck eine Sinuslinie. Wo ist die Schreibgeschwindigkeit am größten?*
38. *Die Kippfrequenz wird, wenn Sie sie grob auf den gewünschten Wert (Übung 34) eingestellt haben, durch Einschalten der Meßfrequenz auf das Kippgerät und Feinregulierung zwangsläufig gesteuert, auch wenn die Meßfrequenz ein ganzzahliges Vielfaches ist. Wie heißt dieser Vorgang?*

Teil V: Meßwandler

1. Kapitel: Allgemeines

[10] Prinzip und Anwendung. Der Meßwandler ist ein kleiner Transformator, der eine hohe Spannung oder einen großen Strom auf eine bequem und gefahrlos zu messende Größe umformt. Besonderer Wert wird dabei darauf gelegt, daß die Umformung möglichst fehlerlos geschieht, damit die Primärgröße richtig gemessen wird. Das soll die Bezeichnung „Wandler“ andeuten, also *Spannungswandler* und *Stromwandler*, während die nicht speziell zur Messung dienenden Transformatoren in der Starkstromtechnik als *Umspanner* und in der Fernmeldetechnik als *Übertrager* bezeichnet werden. Sie erinnern sich (Bild 42), daß beim Stromwandler der Betriebsstrom durch die Primärwicklung KL und der Meßstrom durch die Sekundärwicklung kl und den Strompfad des Meßwerkes fließen. Das Verhältnis der Windungszahlen wird so gewählt, daß beim Primär-Nennstrom sekundär 5 A, im Ausnahmefall (bei sehr langen Meßleitungen) 1 A, mit der Fehlertoleranz fließen. Die Ströme verhalten sich bekanntlich im Idealfall umgekehrt wie die Windungszahlen, da die Amperewindungen primär und sekundär gleich groß wären, z. B. primär 12 A und 100 Windungen, sekundär 5 A und 240 Windungen, wenn nicht ein gewisser Teil der primären Aw zur Magnetisierung des Eisens nötig wäre.

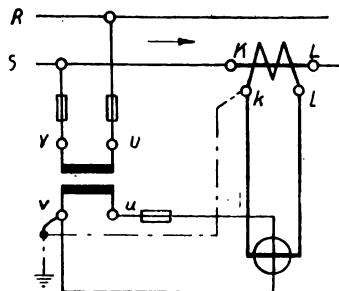


Bild 42. Leistungsmessung mit Strom- und Spannungswandler

Beim ersten Anblick der Schaltung wundert man sich, daß der Stromwandler ein Transformator sein soll. Man ist gewöhnt, daß die Primärklemmen eines Trafos direkt an die Spannung gelegt werden wie beim Spannungswandler nach Bild 42. Aber zwischen den primären Stromwandlerklemmen K und L besteht ja auch eine Spannung, die als Spannungsabfall zwischen K und L abhängig vom Strom in Erscheinung tritt. Sie werden das noch an dem Vektordiagramm sehen.

Während der Stromwandler ein fast im Kurzschluß arbeitender Transformator ist, ist der Spannungswandler praktisch leerlaufend; für sein Unter-

setzungsverhältnis gilt mit sehr großer Annäherung die Beziehung $U_1 : U_2 = w_1 : w_2$. U_2 ist auf 100 V genormt.

Die Anwendung der Meßwandler ist nicht etwa auf die Fernhaltung der Hochspannung von den Meßkreisen beschränkt. Auch bei Niederspannung ergibt sich beim Stromwandler gegenüber einem Nebenwiderstand der Vorteil des geringeren Verlustes, wie bereits in Lehrbrief 2 [18] erläutert wurde. Mit dem Wandler erreicht man eine höhere Meßgenauigkeit als bei direkter Messung.

Haben Sie an der Einbaustelle mit einem hohen Kurzschlußstrom zu rechnen, dann ist der Stromwandler unerlässlich, denn nur dieser kann so kurzschlußsicher gebaut werden, daß er die starke Erwärmung und die Kurzschlußkräfte bis zur Abschaltung des Kurzschlusses aushält. Ein direkt messendes Instrument würde zerstört werden.

[11] **Schaltregeln.** Die grundsätzliche Schaltung zeigt Bild 42, Drehstromschaltungen für Spannungswandler kommen später. Dieser liegt immer parallel an der Spannung, der Stromwandler mit seiner Primärwicklung in der Strombahn. Beim Stromwandler sind K und L die Eingangsklemmen, k und l die Ausgangsklemmen. Er soll möglichst so in die Leitung eingebaut werden, daß K der Stromquelle zugekehrt ist (Energiefluß in Pfeilrichtung), dann hat der Vektor kl die richtige Phasenlage bei Anschluß der Klemme k an den Eingang des Strömpfades am Instrument. Sollte der Wandler so eingebaut werden müssen, z. B. um das Leistungsschild sichtbar zu machen, daß der Energiefluß von L nach K geht, dann ist l mit der Eingangsklemme am Instrument zu verbinden. Grundsätzlich wird die vorgeschriebene *Schutzerdung* an derjenigen Sekundärklemme des Wandlers ausgeführt, die der Energiezuführung entspricht. Bei wechselnder Energierichtung kann die eine oder die andere Klemme geerdet werden. Beachten Sie, daß Sie in diesem Falle wettmetrische Instrumente mit doppelseitigem Ausschlag brauchen.

Beim Spannungswandler wird normalerweise die Klemme v geerdet. Die Gehäuse sind ebenfalls zu erden, dagegen brauchen die Meßgeräte nicht geerdet zu werden. Die Erdung der Sekundärwicklungen entfällt bei Betriebsspannungen von nicht über 250 V gegen Erde.

Zur Erdung muß eine *besondere Erdleitung* verlegt werden (im Schaltplan strichpunktiert). Eine Meßleitung darf nicht dazu herangezogen werden. *Erdleitungen sollen keine Meßströme führen.*

Der Meßstromkreis des Stromwandlers darf nicht unterbrochen werden, solange der Primärstrom fließt!

Die Sekundärwicklung muß also immer über die Stromspule des Meßgerätes kurzgeschlossen sein, bei mehreren Meßgeräten liegen ihre Stromspulen in Reihe. Die Sekundärwicklung des Wandlers erzeugt einen magnetischen Fluß, der dem primären entgegengerichtet und fast gleich ist, so daß nur ein kleiner Restfluß besteht. Dieser induziert die Sekundär-EMK, die gerade so groß ist, daß der Meßstrom fließt. Sie haben hier wieder ein Beispiel für einen Gleichgewichtszustand. Stören Sie das Gleichgewicht dadurch, daß Sie den Sekundärfluß durch Öffnen des Stromkreises wegnehmen, dann magnetisiert allein der Primärstrom. Die Induktion im Eisen wird sehr hoch, demnach steigt die Spannung an den Sekundärklemmen auf mehrere 100 evtl. 1000 V Spitzenwert. Es ist eine stark verzerrte Spannungskurve wegen der Eisensättigung vorhanden. Die hohe Spannung kann einen Unglücksfall verursachen und gefährdet ebenfalls die Isolation. Außerdem wird der Kern durch die erhöhten Eisenverluste stark erhitzt, was nach einiger Zeit zur Zerstörung des Wandlers führt. Aber wenn es auch nicht dazu kommen sollte und der Fehler rechtzeitig erkannt wird, so bleibt doch infolge der hohen Sättigung eine Restmagnetisierung zurück, wodurch die Meßfehler des Wandlers vergrößert werden. Nach einem solchen Fall muß der Eisenkern sorgfältig entmagnetisiert werden.

Was folgt nach dem oben Dargelegten, wenn Sie ein Instrument während des Betriebes ausbauen wollen? Sie müssen vorher den Wandler sekundär kurzschließen oder die Anschlußleitungen überbrücken.

Auch beim Spannungswandler können die U- und V-Klemmen vertauscht angeschlossen werden, wenn es zugleich unterspannungsseitig geschieht. Das ist manchmal nötig, um eine einfache Leitungsführung zu erreichen. Die hochspannungsseitige Absicherung kann an sich fortfallen, nachdem die Spannungssicherheit der Wandler an die der Schaltgeräte angeglichen wurde. Man nimmt Hochspannungssicherungen für 2 A, wenn der Wandler an den Sammelschienen liegt. Unterspannungsseitig ist je nach der Leistung des Wandlers mit 2-, 4- oder 6-A-Patronen gegen Überlast zu sichern, die geerdete Klemme nicht. Wandler für Spannungsregler von Maschinen dürfen nicht gesichert werden. Meß- und Relaisstromkreise sind getrennt abzusichern, letztere höher.

2. Kapitel: Spannungswandler (VDE 0414)

[12] **Diagramm und Fehlergrößen.** Aus dem Vektordiagramm (Bild 43) können Sie erkennen, wie das Verhältnis der Klemmenspannung $U_1 : U_2$ und die Größe des Phasenwinkels zwischen ihnen von dem Magnetisierungsstrom und der sekundären Belastung beeinflusst werden. Der Fluß Φ wird vom Magnetisierungsstrom J_μ erzeugt; mit der senkrechten Wirkkomponente J_h für die Eisenverluste ergibt sich der gesamte Leerlaufstrom J_0 . Der Fluß Φ induziert die 90° nacheilende EMK E_1 und E_2 .

Nun ist das Diagramm der Einfachheit halber für das Windungszahlverhältnis $1 : 1$ gezeichnet, es ist also die sekundäre gleich der primären EMK, $E_1 = E_2$; E_1 ist die Gegenspannung zu E_2 , ist demnach in der Verlängerung von E_2 mit minus nach oben zu zeichnen.

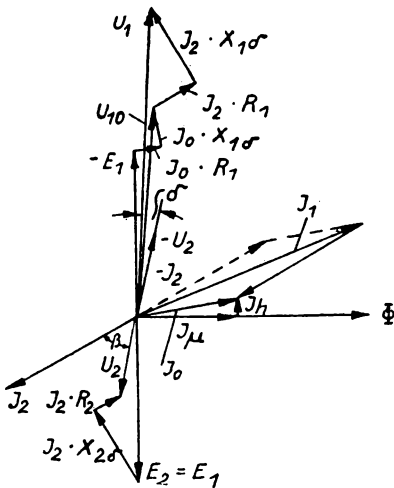


Bild 43

Diagramm des Spannungswandlers

Der Leerlaufstrom J_0 verursacht in der Primärwicklung den Ohmschen Spannungsabfall $J_0 \cdot R_1$ und den induktiven Spannungsabfall $J_0 \cdot X_1\sigma$. Diese müssen vom Netz gedeckt werden. Sie *addieren* sie also zu E_1 geometrisch, $J_0 \cdot R_1$ in Phase mit J_0 , $J_0 \cdot X_1\sigma$ senkrecht zu J_0 voreilend, und erhalten somit die Leerlaufspannung U_{10} , die das Netz liefern muß. Sie erkennen aus dieser Konstruktion, daß schon bei Leerlauf die Spannung U_{10} an den Primärklemmen etwas höher sein muß als die Sekundär-EMK wegen des Leerlaufstromes J_0 mit seiner Blindkomponente J_μ und der Wirkkomponente J_h .

Alle Spannungsabfälle sind sehr übertrieben gezeichnet, denn bei maßstäblicher

Konstruktion würden Sie die Einzelheiten nicht sehen. Tatsächlich ist U_{10} nahezu gleich E_1 , und der von ihnen gebildete Winkel beträgt etwa $2 \cdots 3^\circ$. Jetzt schalten Sie die Spannungsspulen der Meßgeräte an den Wandler. Sie belasten ihn dadurch induktiv mit einem Strom J_2 , der der Klemmenspannung U_2 um den Winkel β nacheilt. U_2 ist um die Abfälle $J_2 \cdot R_2$ und $J_2 \cdot X_2\sigma$ in der Sekundärwicklung kleiner als die EMK E_2 . Sie erhalten U_2 , wenn Sie diese Abfälle geometrisch *abziehen* von E_2 . Auch hier sind die Abfälle übertrieben groß angenommen. In Wirklichkeit ist der

Unterschied zwischen E_2 und U_2 wenige Zehntel Prozent, denn U_2 soll doch als Meßspannung (100 V) möglichst konstant sein, auch bei verschiedener Belastung.

Welchen Einfluß hat nun die Belastung auf die Primärseite?

Das vom Laststrom J_2 erzeugte Feld muß durch ein entgegengerichtetes Feld aufgehoben werden; dementsprechend stellt sich der Primärstrom ein. Bei dem angenommenen Windungszahlverhältnis 1 : 1 klappen Sie demnach J_2 in gleicher Größe herum ($-J_2$). Dieser Gegenstrom und der Leerlaufstrom J_0 setzen sich geometrisch zusammen zum Primärstrom J_1 . Es ist Ihnen aber klar, daß diese Aufteilung der Ströme nur zur Konstruktion benutzt wird, daß in Wirklichkeit in der Wicklung nur der Strom J_1 fließt, den Sie gedanklich in die beiden Komponenten $-J_2$ und J_0 zerlegen. Sie erkennen, warum J_1 größer ist als J_2 , und warum die beiden Ströme nicht genau in Gegenphase sind.

Die gedachte Komponente J_2 in der Primärwicklung erzeugt auch Spannungsabfälle $J_2 \cdot R_1$ und $J_2 \cdot X_1 \delta$, die Sie an die Leerlaufspannung U_{10} ansetzen, denn bis dahin sind die von der anderen Komponente J_0 herührenden Abfälle bereits berücksichtigt. So kommen Sie zur primären Klemmenspannung U_1 , die hier durch die erwähnten Übertreibungen wesentlich größer als U_2 erscheint, während der Unterschied maßstäblich gering ist.

Sie sehen so die Einflüsse, die diesen Unterschied, den sogenannten *Spannungsfehler* des Wandlers, und den Winkel δ zwischen dem Vektor U_1 und dem umgeklappten Vektor U_2 , also den Fehlwinkel, bedingen. Der Mindestwert der Fehler ist durch die Größe und Lage von J_0 gegeben. Sie sind genügend geschult, um daraus die Folgerungen ziehen zu können. Für größte Genauigkeit sind dann noch kleine Ohmsche und induktive Widerstände der Wicklungen anzustreben. Die Höhe der Fehler ist, wie das Diagramm lehrt, vom Leistungsfaktor $\cos \beta$ und der Höhe der Last $U_2 \cdot J_2$ [VA] abhängig. Bei konstantem Winkel β steigen mit J_2 die Fehler linear.

Möllinger und Gewecke¹ haben aus dem Diagramm Bild 43 ein spezielles Meßdiagramm entwickelt, das die Fehler in Prozent bzw. in Minuten bequem graphisch zu ermitteln gestattet.

Die Bilder 44 und 45 zeigen die Fehler eines bestimmten Wandlers abhängig von der Belastung.

¹ Möllinger: ETZ 1911, S. 922. ETZ 1913, S. 270.

Möllinger: Wirkungsweise der Motorzähler und Meßwandler.

Der Spannungsfehler wird positiv gerechnet, wenn der tatsächliche Wert von U_2 den Sollwert übersteigt. Sie können durch Abgleichen der Windungszahlen erreichen, daß der Sollwert 100 V bei einer bestimmten Belastung gerade vorhanden ist; unterhalb dieser wird dann der Fehler positiv, darüber negativ. Nach VDE ist der Spannungsfehler

$$u_R = 100 \frac{U_2 \cdot K_n - U_1}{U_1} [\%] \quad (3) \quad K_n = \text{Nenn-Untersetzungsverhältnis}$$

Der Fehlwinkel wird positiv gerechnet, wenn die umgeklappte sekundäre Spannung voreilt.

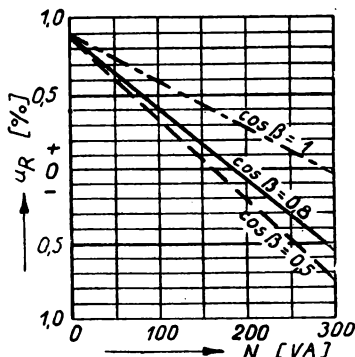


Bild 44. Spannungsfehler eines Spannungswandlers der Klasse 1

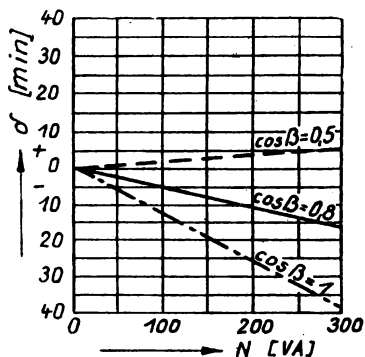


Bild 45. Fehlwinkel eines Spannungswandlers der Klasse 1

[13] **Begriffserklärungen und Güteklassen nach VDE.** Ähnlich wie die Meßinstrumente werden die Spannungswandler nach VDE in *Güteklassen* eingeteilt nach den vom Hersteller zu gewährleistenden Grenzen für den Spannungsfehler. Diese Grenze in % des Sollwertes der Sekundärspannung ist gleichzeitig die Klassennummer. Außerdem sind die Grenzen für den Fehlwinkel in Bogenminuten vorgeschrieben.

Tafel 1
Fehlergrenzen von Spannungswandlern

Klasse	Spannungsbereich %	Spannungsfehler ± %	Fehlwinkel ± min
0,1	80 ... 120	0,1	5
0,2	80 ... 120	0,2	10
0,5	80 ... 120	0,5	20
1	80 ... 120	1	40
3	100	3	nicht begrenzt

Die Fehler müssen innerhalb der Klassengrenzen bleiben, auch wenn die Nennspannung zwischen $80 \cdots 120\%$ schwankt, außer bei Klasse 3.

Die *Nennspannung* ist der auf dem Leistungsschild genannte Wert für die Ober- und Unterspannung, z. B. 10 000/100 V. Steigt die Netzspannung auf 12 kV, so steigt U_2 auf 120 V mit einem Fehler, der noch innerhalb der Klassengrenze liegt. Die Primär-Nennspannungen sind nach den Normwerten gestuft. Bei Wandlern, bei denen eine Primärklemme geerdet ist, wird als Nennspannung die Sternspannung des Drehstromnetzes angegeben, zum Beispiel $\frac{60}{\sqrt{3}}$ kV.

Die Fehlergrenzen sind einzuhalten zwischen $1/4$ bis $4/4$ der Nennleistung. Die angegebene *Nennleistung* ist die Scheinleistung in VA bei $\cos \beta = 0,8$, die der Wandler bei Nennspannung abgeben kann, ohne daß die Fehlergrenzen der Klasse überschritten werden. Die Nennleistungen sind genormt.

Auf dem Leistungsschild ist auch die *Grenzleistung* angegeben. Sie ist die Scheinleistung, die der Wandler ohne eine bestimmte Genauigkeit bei Primär-Nennspannung dauernd abgeben kann, ohne daß die zulässige Erwärmung überschritten wird.

Aus den Listen der Hersteller der Meßinstrumente und Zähler entnehmen Sie die Scheinleistungsaufnahme ihrer Spannungspfade, die Sie an den Wandler anschließen wollen. Danach ergibt sich die Mindest-Nennleistung. Die Grenzleistung können Sie mit einer gewissen Reserve ausnutzen, wenn Sie lediglich Relais anschließen, bei denen es auf Genauigkeit nicht so ankommt.

[14] Bauformen

a) Allgemeines, Unterscheidung nach Anschlußweise

Die Forderung nach einer betriebssicheren Isolation des Spannungswandlers bei Hochspannung mit wirtschaftlich tragbarem Aufwand stellt dem Konstrukteur eine nicht einfache Aufgabe. Die Primärspule besteht aus Zehntausenden von Windungen — z. B. bei einem Fabrikat von 27 000 Windungen bei 30 kV — mit einem Drahtdurchmesser von $0,1 \cdots 0,3$ mm. Sie können die Draht- und Lagenisolation nicht beliebig stark machen, sonst wird das Verhältnis Kupfer zu Isolation im Wickelraum zu ungünstig, und Sie erhalten einen teuren Wandler. Bei wirtschaftlicher Bemessung ist wegen der hohen Feldstärke zwischen zwei Lagen mit dem Glimmen der Luft in den Hohlräumen zu rechnen. Um die dadurch einsetzende Zerstörung der Isolation zu vermeiden, müssen die Hohlräume ausgefüllt werden. Das geschieht durch die Füllung des Wandlergehäuses im Vakuum

mit Isoliermasse, noch besser durch Füllung mit Öl, weil dieses die Luft-einschlüsse sicher unterbindet und die Wärmeabfuhr durch seinen Umlauf verbessert.

Andererseits sind Masse und Öl unerwünscht wegen der Brandgefahr. Daher bemühte man sich um die Konstruktion der sogenannten Trockenwandler mit einem Porzellankörper zwischen Ober- und Unterspannungsspule und mit einer geringen Menge brennbarer Isoliermasse lediglich zur Ausfüllung der Hohlräume des Spulenkörpers. Diese öllosen Wandler werden bis 45 kV geliefert.

Durch die Art der Isolierung und durch die Ausführung der Wicklung ergeben sich verschiedene Bauarten, die im folgenden kurz beschrieben werden. Alle Wandler erhalten verstärkt isolierte Eingangswindungen zum Schutz gegen den Spannungsstoß durch Wanderwellen.

Nach der Anschlußweise unterscheidet man Einphasenwandler mit zwei vollisolierten Hochspannungsklemmen zum Anschluß an zwei spannungsführende Leitungen, einpolig isolierte Wandler zum Anschluß zwischen Leitung und Erde und Drehstromwandler mit herausgeführtem Sternpunkt oder ohne solchen.

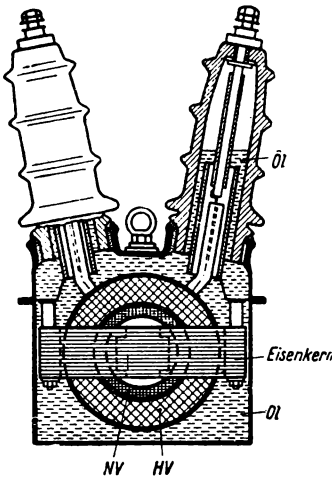


Bild 46. Schnitt durch einen Topfspannungswandler

b) Topfspannungswandler mit Öl- oder Masse-Isolation

Bild 46 zeigt im Schnitt den in einem Eisentopf untergebrachten Spannungswandler in der üblichen Mantelkern-Bauart. Auf dem Mittelsteg mit kreuzförmigem Querschnitt sitzen konzentrisch die beiden Spulen NV und HV. Der Topf wird mit Masse oder Öl gefüllt, die Isolatoren wirken als Ausdehnungsgefäß. Bild 47 zeigt drei Wandler für Innenräume. Sie dürfen nur stehend montiert werden, auch bei Massefüllung.

Diese Bauart wird auch für Freiluftanlagen mit entsprechend bemessenen Porzellan-Isolatoren geliefert.

c) Trockenspannungswandler

Für Spannungen bis 1 kV werden Wandler gebaut mit offenen Spulen, die lediglich eine Imprägnierung der Spulen als Feuchtigkeitsschutz erhalten; die Isolation zwischen den Spulen ist Luft.

Zweipolig mit Porzellan isolierte Spannungswandler (Bild 48) werden bis Reihe¹ 30 ausgeführt. Der Porzellankörper isoliert die Primärspule gegen

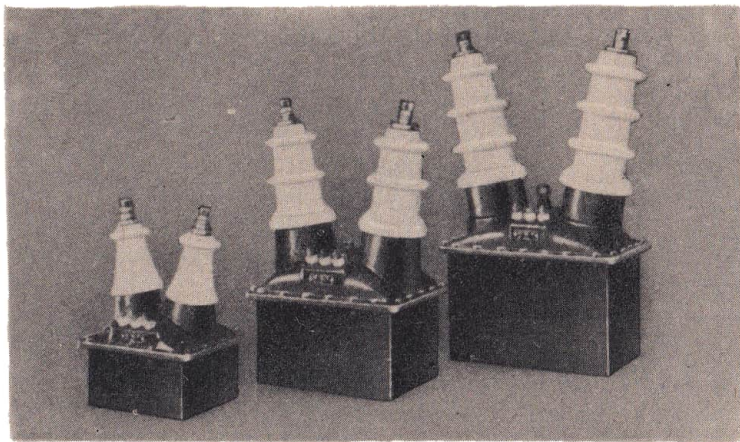


Bild 47. Öl-Topfspannungswandler für 6, 20 und 30 kV

die Sekundärspule und gegen das Eisen der Mantelkern-Type. Zum Schutz gegen Glimmentladungen ist die Primärspule im Vakuum imprägniert zur Ausfüllung der kleinen Hohlräume.

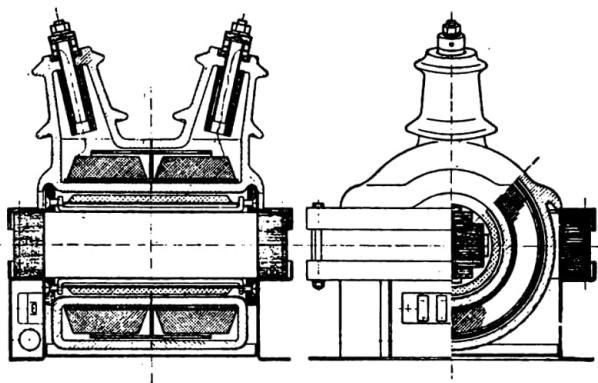


Bild 48. Trockenspannungswandler

¹ Reihenspannungen sind nach VDE 0532 die genormten Spannungen, nach denen Transformatoren, Wandler und Hochspannungsgeräte gebaut werden, Reihenspannungen sind z. B. 1, 3, 10 kV usw.

Als Beispiel eines einpoligen Spannungswandlers, der zwischen Leitung und Erde zu schalten ist, zeigt Bild 49 im Schnitt den Trockenspanner nach FISCHER. Die Hochspannungsspule wird auf einen Porzellankörper gewickelt, der die Form einer Garnrolle hat und oben den hohlen Porzellanstützer als Hochspannungsklemme trägt. Beide Teile werden vor dem Brennen zusammengesetzt, so daß ein einheitlicher Porzellankörper entsteht. Das innere Wicklungsende geht innerhalb des Stützers an den Hochspannungsanschluß, das äußere an die Erdklemme, und zwar wird die Eingangswindung durch einen Kupferbelag gebildet, der auf die äußere Zylinderfläche des Porzellankörpers (s. Bild) aufgespritzt und durch eine schraubenförmige Fuge unterteilt ist. Ein dünnes Kupferblech umschließt außen die Wicklung als letzte Windung. Die Kapazität dieser Metallflächen unterstützt die Ableitung von Sprungwellen. Ein Blechgehäuse schützt die Wicklung gegen mechanische Beschädigung. Innerhalb der Porzellanrolle befindet sich die Sekundärspule auf dem Mittelsteg des Mantelkerns.

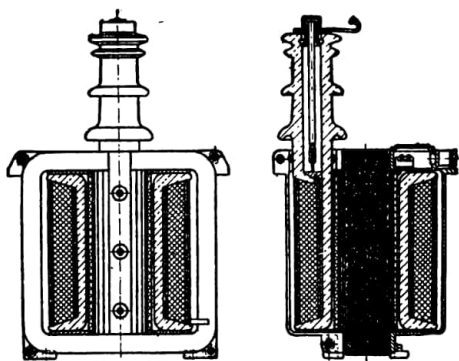


Bild 49: Schnittskizze eines einpoligen Trockenspannungswandlers

det, der auf die äußere Zylinderfläche des Porzellankörpers (s. Bild) aufgespritzt und durch eine schraubenförmige Fuge unterteilt ist. Ein dünnes



Bild 50. Stützerspannungswandler Reihe 60 für Innenraum-Aufstellung

Kupferblech umschließt außen die Wicklung als letzte Windung. Die Kapazität dieser Metallflächen unterstützt die Ableitung von Sprungwellen. Ein Blechgehäuse schützt die Wicklung gegen mechanische Beschädigung. Innerhalb der Porzellanrolle befindet sich die Sekundärspule auf dem Mittelsteg des Mantelkerns.

Der Wandler wird in dieser Form bis einschließlich Reihe 45 gebaut. Bei Drehstrom ergeben drei Wandler in Sternschaltung mit geerdetem Sternpunkt einen Meßsatz. Die Freiluft-Ausführung des Wandlers ist durch eine braun glasierte Durchföhrung mit mehreren Schirmen gekennzeichnet.

Bei dieser Spannungswandlerbauart fällt das Potential der Hochspannungswicklung gegen die übrigen Wandlerteile nach dem geerdeten Wicklungsende hin ab, so daß ein geringerer Isolationsaufwand nötig ist als bei der zweipolig isolierten Bauart.

d) Stützerspannungswandler

Bei höheren Spannungen ab Reihe 45 wird der Isolator so groß, daß man den Wandler zweckmäßig in den ölfüllten Stützer einbaut. Dieser

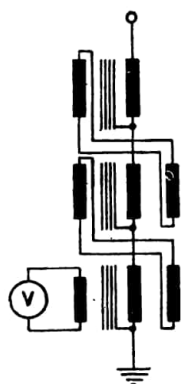


Bild 51

Schema der Kaskade

Stützerspannungswandler (Bild 50) kann also zur Schaltung zwischen Leitung und Erde nur einpolig isoliert ausgeführt werden. Der Isolierkörper ist entweder ein Hartpapierzylinder oder ein Porzellanstützer mit Rippen. Sie sehen im Bild eine Parallel-Funkenstrecke, die bei einem Überschlag den Lichtbogen mit seiner Wärmewirkung vom Isolator fernhält. Diese Stützerbauart wird insbesondere bei Freiluft-Anlagen für die höchsten Spannungen verwendet, dann aber nur mit einem Porzellanstützer, da Hartpapier nicht wetterfest ist.

e) Kaskadenspannungswandler

Die äußere Form dieses Spannungswandlers ist in der Regel die des Stützerwandlers. Er ist also ebenfalls nur einpolig isoliert, das zweite Ende der Hochspannungswicklung ist geerdet.

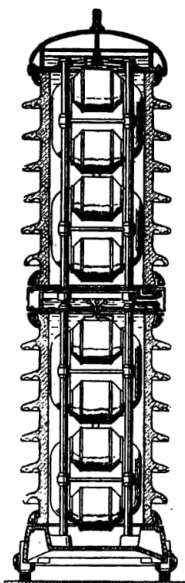


Bild 52a. Schnitt durch eine Stützerkaskade 220 kV

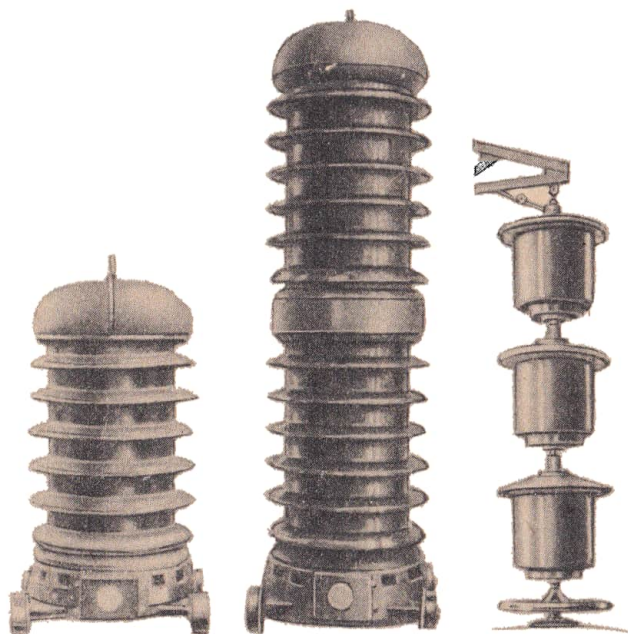


Bild 52 b. Ausführungsformen von Kaskadenspannungswandlern

Das Kennzeichen der Kaskaden-Bauart ist die Aufteilung des Gesamtpotentials in zwei oder mehr Stufen, so wie vergleichsweise bei einer Wasserkaskade das Wasser von Stufe zu Stufe fällt. Der Wandler besteht aus Einzeltransformatoren (Bild 51), deren Primärwicklungen in Reihe geschaltet sind, so daß jede Teilspule nur für die Teilspannung gegen den Kern und seine Umspannungswicklungen zu isolieren ist.

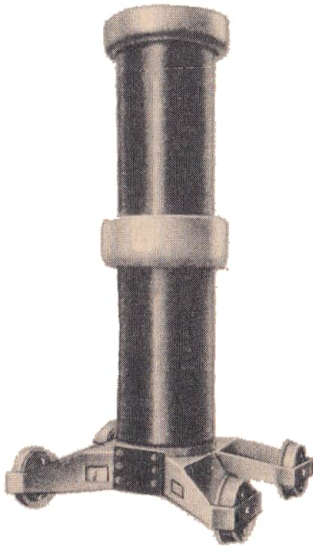


Bild 53. Kaskadenspannungswandler mit Hartpapierstützer

Diese Unterspannungswicklungen vermitteln laut Schema die Energieübertragung von Teilwandler zu Teilwandler. Ohne diese Übertragungswicklungen hätten Sie nur das unterste Glied als Wandler anzusehen, die oberen wären nur vorgeschaltete Drosselspulen, und die Meßleistung wäre geringer.

Bild 52a ist ein Schnitt durch eine Stützerkaskade für Freiluft-Aufstellung mit vier Teilwandlern. Bei jedem ist die Wirkung auf zwei Spulen aufgeteilt, so daß sich die Gesamtspannung auf acht Einzelspulen gleichmäßig verteilt. Der Stützer ist zweiteilig, jeder Teil hat Ölfüllung und ein Öl-Ausdehnungsgefäß. Die Leistung ist 120 VA

in Klasse 0,5 oder 220 VA in Klasse 1,0. Für 110 kV wird nur der obere Teilisolator mit zwei Kernen verwendet.

Bild 52b zeigt einige Ausführungsformen von Kaskadenspannungswandlern. Bild 53 zeigt einen Kaskadenspannungswandler mit Hartpapierstützer für Innenraum-Aufstellung.

f) Umschaltbare Spannungswandler

Für Messungen im Prüffeld und im Laboratorium sind Spannungswandler erwünscht, die man auf mehrere Übersetzungsverhältnisse schalten kann, um mit einem einzigen Wandler auszukommen. Dies wird durch Anzapfungen der Ober- und Unterspannungswicklungen oder durch Reihen- und Parallelschaltung von Gruppen der Primärwicklung erreicht.

Für genaue Messungen (z. B. bei Leerlauf- und Kurzschlußversuchen an Maschinen und Umspannern bei großer Phasenverschiebung, bei der Fehlermessung von Wandlern) soll man die umschaltbaren Präzisionswandler mit

den geringsten Fehlern verwenden, also mindestens die der Klasse 0,1. Diese Wandler werden aber auch für diese Zwecke mit noch kleineren Fehlern, etwa 0,02 % und 1 min, also sogenannte *Normalwandler* geliefert. Der Name soll besagen, daß der Wandler als normal beim Vergleich mit anderen Wandlern dienen kann, deren Fehler gemessen werden sollen.

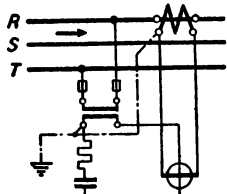


Bild 54. Leistungsmessung bei gleichbelastetem Drehstrom

[15] **Schaltungen für Drehstrom.** Sie kommen mit einem *Einphasenspannungswandler* aus, wenn Sie lediglich Spannung und Frequenz messen wollen und wenn Sie die Spannung für ein Relais oder einen Auslöser brauchen. Bei gleichbelasteten Strängen, z. B. für einen Hochspannungsmotor, kann man nach Bild 54 auch für eine Messung der Leistung und Arbeit mit einem Wandler auskommen, wenn aus Gründen der Sparsamkeit die geringere Genauigkeit

in Kauf genommen wird. Der Spannungspfad müßte an der Sternspannung liegen (vgl. Lbf. 2), der Anschluß an die Dreiecksspannung wird aber durch die Kunstschaltung ermöglicht, die jedoch frequenzabhängig ist.

Zwei *Einphasenspannungswandler* in V-Schaltung (Bild 55) oder ein *Drehstromspannungswandler* mit Dreischenkelkern (Bild 56) ermöglichen den

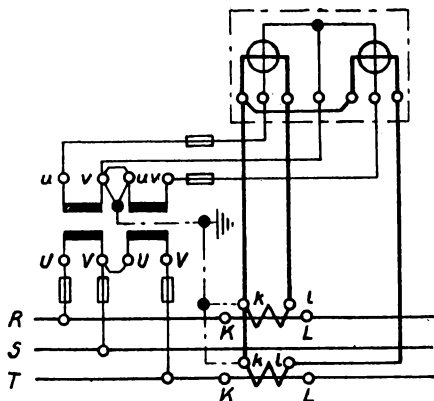


Bild 55. Zwei Einphasenspannungswandler in V-Schaltung

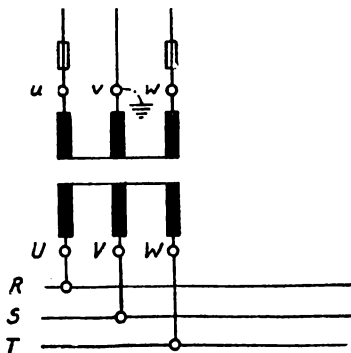


Bild 56. Spannungswandler mit Dreischenkelkern

Anschluß von Leistungsmessern und Zählern für Wirk- und Blindleistung nach der Zwei-Wattmeter-Schaltung. Es ist die normale Meßschaltung bei Anlagen, bei denen Erdströme durch Erdschluß oder auch schon durch

verschiedene Kapazitäten gegen Erde für die Messung vernachlässigbar sind. Wenn Sie das nicht zulassen, was bei der Messung am Anfang von Hochspannungsfreileitungen in Frage kommt, dann müssen Sie die Erde als vierten Leiter betrachten ähnlich dem Nulleiter (Mittelpunktleiter) beim Drehstrom-Vierleiternetz. Bild 57a erläutert für den Fall des Erdschlusses der Leitung T , deren Kapazität gegen Erde infolgedessen überbrückt ist, daß die vektorielle Summe der drei Leiterströme nicht Null ist und daß sich die Potentiale der Leitungen gegen Erde verschieben. Während der nicht geerdete Sternpunkt des Spannungserzeugers in ungestörtem Betrieb das Potential Null gegen Erde hat, bekommt er durch den Erdschluß von T die Sternspannung $U_L/\sqrt{3}$, und die Spannungen der Leitungen R und S steigen bis auf den Wert der Dreiecksspannung an (vgl. Bild 57b). Dieses Spannungsbild untersetzt der Wandler auf die Spannungspfade des Meßgerätes.

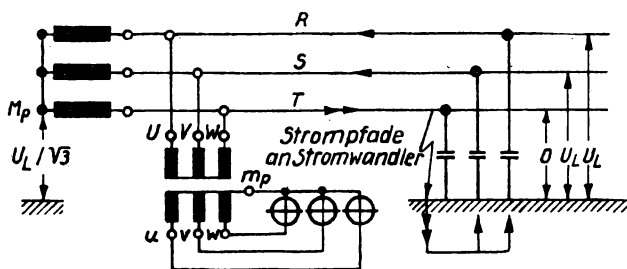


Bild 57a. Dreischenkelwandler bei Erdschluß des Netzes
Spannungserzeuger mit isoliertem Sternpunkt

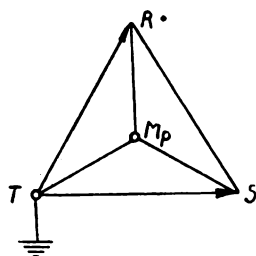


Bild 57b
Spannungsdiagramm

Was wird nun gemessen? Die Leiterströme werden zwar durch die drei Stromwandler richtig auf die Strompfade übertragen, es ist die vektorielle Summe von Verbraucherstrom und Erdschlußstrom. Sie wissen, daß letzterer nahezu kapazitiv ist mit einer Wirkkomponente wegen der OHMSCHEN Verluste in der Strombahn. Die richtige Messung beim Vierleiter-Drehstrom setzt aber voraus, daß die drei Spannungspfade je die Spannung zwischen dem Außenleiter und dem vierten Leiter, der Erde, erhalten. Das ist hier nicht der Fall, denn M_p hat nicht das Erdpotential. Es läßt sich nachweisen, daß nur die dem Verbraucher zugeführte Leistung richtig gemessen wird, die durch den Erdstrom bedingte Leistung wird nicht mitgemessen.¹

Die ARON-Schaltung mit zwei Wattmetern kommt nicht in Frage, weil die vektorielle Summe der drei Leiterströme nicht Null ist, was für diese Methode die Voraussetzung ist.

¹ Piloty, AEG-Mitteilungen 1926, Heft 6, S. 253.

Wie erfassen Sie nun die Gesamtleistung?

Könnten Sie den primärseitigen Sternpunkt des Wandlers erden, dann würde auch Mp das Erdpotential erhalten und könnte geerdet werden, wodurch die Messung richtig würde. Aber Sie dürfen den Sternpunkt des Dreischenkelwandlers nicht dauernd erden. Die an W liegende Spule würden Sie bei einem satten Erdschluß nach Bild 57 kurzschließen; dadurch erhalten die beiden anderen Spulen je die Dreiecksspannung ST bzw. RT , demnach steigt der Fluß in diesen beiden Schenkeln auf den $\sqrt{3}$ fachen Wert, während der Fluß im Schenkel mit der spannungslosen Spule W Null ist. Die vektorielle Summe der Flüsse muß immer Null sein. Es bildet sich also nach Bild 58 ein Rückfluß mit dem $\sqrt{3}$ fachen Wert des Schenkel-flusses, der sich größtenteils über den Eisenkern des Wandlers schließen muß und starke Erwärmung hervorruft.

Beim *Drehstromspannungswandler mit Fünfschenkelkern* (Bild 59) ist die Erdung zulässig, weil der Rückfluß im Erdschlußfall über die beiden Außenschenkel geht, auf denen zur Erdschlußanzeige je eine Wicklung sitzt. Im ungestörten Betrieb wird die Spannung an den Klemmen e und n Null sein, weil die von den entgegengesetzt gerichteten Teilflüssen der Außenschenkel in den Hilfsspulen induzierten Spannungen gegeneinander-geschaltet sind. Bei Erdschluß verteilt sich dagegen der Rückfluß in gleicher Richtung auf die Außenschenkel und induziert maximal eine Effektiv-spannung von 100 V, die zur Betätigung eines Erdschlußrelais für ein opti-sches oder akustisches Signal dienen kann. Die mit dem Sternpunkt ge-erdete Primärwicklung (im Bild fortgelassen) wirkt als Erdungsdrossel-spule zur Abführung statischer Ladungen des Netzes.

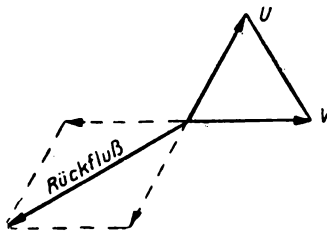


Bild 58. Flußdiagramm bei Kurzschluß der Spule W

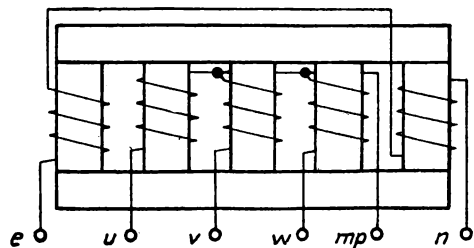


Bild 59. Sekundärwicklung des Spannungswandlers mit Fünfschenkelkern

Denselben Zweck wie der Fünfschenkelwandler erfüllen *drei Einphasenwandler in Stern-Sternschaltung* (Bild 60). Es ist sogar die technisch bessere Lösung, da es keine störende magnetische Verkettung gibt, und für die

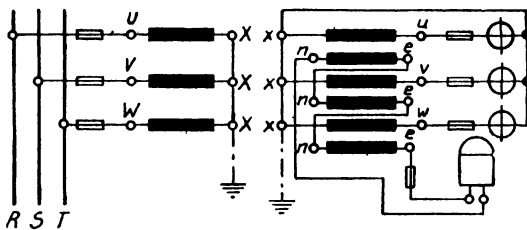


Bild 60. Drei Einphasenspannungswandler mit geerdetem Sternpunkt

höchsten Spannungen die einzig mögliche unter Verwendung der einpolig isolierten Stützerwandler ohne oder mit Kaskadenschaltung des Systems. Auch hier muß die Induktion im Wandler-eisen bei normalem Betrieb mit der Sternspannung so gering sein, daß bei Erdschluß einer Netzleitung die

auf den $\sqrt{3}$ fachen Wert steigende Induktion im Eisen der beiden anderen Wandler keine unzulässige Erwärmung hervorruft.

Gibt man jedem Wandler eine zweite Sekundärwicklung e bis n , so liefert sie ebenfalls ein getreues Abbild der jeweiligen Oberspannung. Wenn Sie nun diese drei Wicklungen in Dreieck schalten, so muß die Summe der Spannungen Null sein, so lange X kein Potential gegen Erde hat. Andernfalls tritt zwischen der obersten Klemme n und der untersten e (offene Dreieckschaltung) eine Spannung auf, die einem Erdschlußrelais zugeführt wird.

Zusammenfassung zu [10] bis [15]

Der Spannungswandler ist ein praktisch leerlaufender Umspanner, der die Meßspannung herabsetzt und den Stromkreis der Meßgeräte gegen die Hochspannung isoliert.

Bei der verhältnismäßig geringen Belastung mit dem Scheinwiderstand der Meßgeräte, der Bürde, können die OHMSCHEN und induktiven Spannungsabfälle des Wandlers klein gehalten werden. Diese bewirken eine Abweichung der Unterspannung von dem durch das Nenn-Untersetzungsverhältnis gegebenen Wert, der prozentual auf die Oberspannung bezogen und als Spannungsfehler bezeichnet wird.

Das Vektordiagramm erläutert ferner, daß infolge der Phasenlage der Ströme der umgeklappte Vektor von U_2 mit U_1 nicht zusammenfällt, sondern einen Winkel bildet. Dieser Fehlwinkel muß auch klein gehalten werden für den Anschluß von Leistungsmessern und Zählern.

Die zulässigen Grenzen für beide Fehlergrößen sind vom VDE entsprechend der Klasseneinteilung 0,1 bis 3 vorgeschrieben.

Die zweipolig isolierten Wandler ähneln im Aufbau den Leistungsumspannern, die öllose Bauart ist vorzuziehen. Einpolig isolierte Einphasenwandler werden bis Reihe 45 mit Porzellan-Isolation und bis zu den höchsten Spannungen als Stützwandler, eingebaut in den ölgefüllten Stützer aus Porzellan oder Hartpapier, geliefert. Bei den einpolig isolierten Kaskadenwandlern ermöglicht die Aufteilung des Gesamtpotentials auf mehrere Stufenwandler eine einfachere Lösung der Isolierung.

Umschaltbare Wandler für mehrere Meßbereiche sind vorteilhaft bei Messungen im Labor und Prüffeld. Als Normalwandler werden sie für genaueste Messungen mit vernachlässigbar kleinen Fehlern ausgeführt.

Für Drehstrom sind zwei Einphasenwandler in V-Schaltung oder ein Dreischenkelwandler üblich, wenn die ungenaue Leistungsmessung bei Erdschluß keine Rolle spielt. Andernfalls werden drei Einphasenwandler in Sternschaltung oder ein Fünfschenkelwandler verwendet, jedoch dann immer mit der Drei-Wattmeter-Methode.

Ü b u n g e n

39. Überlegen Sie, warum der Spannungswandler für den Spannungsregler eines Generators nicht abgesichert wird!
40. Warum steht die Wirkkomponente des Leerlaufstromes im Spannungswandler-Diagramm senkrecht zum Magnetisierungsstrom?
41. Warum eilt der Vektor $J_0 \cdot X_1$ dem Strom J_0 um 90° vor nach der Konstruktion des Diagramms?
42. Warum ist der Fehlwinkel des Wandlers als Fehler aufzufassen?
43. Warum ist die Trockenisolation beim Spannungswandler schwieriger als beim Stromwandler?

3. Kapitel: Stromwandler

[16] **Diagramm und Fehlergrößen.** Das Diagramm des Stromwandlers zeichnen Sie ähnlich wie das des Spannungswandlers (Bild 43), und zwar auch für das Wirkungsverhältnis 1 : 1 (Bild 61). Sie gehen vom Sekundärstrom J_2 aus, der bei Nennstrom des Wandlers 5 A sein soll, und den Sie senkrecht nach unten zeichnen. Die EMK E_2 muß so groß sein, daß sie die Spannungsabfälle $J_2 \cdot R_2$ und $J_2 \cdot X_{2\delta}$ deckt und außerdem den Spannungsabfall U_2 an der Bürde, das ist der Scheinwiderstand des äußersten Strom-

Durch den Phasenwinkel β der Bürde ist auch die Phasenlage von E_2 bestimmt. Beachten Sie, daß die gezeichneten Richtungen der Spannungsabfälle durch die Drehung dieser Vektoren um 180° entstanden sind. Die

Die Magnetisierung durch J_2 muß auf der Primärseite durch den Strom $-J_2$ aufgehoben werden; dieser setzt sich mit J_0 zum Primärstrom J_1 zusammen. Sie sehen, daß durch J_0 der als *Stromfehler* bezeichnete Unterschied ΔJ

dem der hier *Fehlwinkel* genannte Phasenwinkel δ zwischen beiden Strömen. Sollen diese Fehlergrößen klein werden, dann muß demnach angestrebt werden, daß der Magnetisierungsstrom J_μ klein ist. Für Wandler großer Genauigkeit werden daher die modernen Nickel-Eisen-Legierungen mit hoher Permeabilität trotz ihres höheren Preises mit Vorteil verwendet.

Wird andererseits \star größer als im Diagramm gezeichnet, so finden Sie, daß ΔI größer und δ kleiner werden. Induktive Last vergrößert also den Stromfehler und vermindert den Fehlwinkel; dieser kann dabei Null und sogar negativ werden, wenn der Strom $-J_2$ dem Strom J_1 naheilt.

Sie können sich auch vorstellen, wie sich das Diagramm bei Teillasten ändert. Verringern Sie J_2 auf die Hälfte, dann werden auch die sekundären Spannungsabfälle einschließlich U_2 halb so groß, $E_1 = E_2$ werden kleiner und damit auch J_0 . Dieses nimmt aber nicht linear ab, daher werden die Fehler prozentual größer. Das beim Spannungswandler erwähnte Meßdiagramm von Möllinger und Gewecke ist auch für den Stromwandler entwickelt worden.

[17] Begriffserklärungen und Güteklassen nach VDE 0414

Der *Fehlwinkel* δ wird positiv gerechnet, wenn der um 180° gedrehte Vektor J_2 dem Vektor J_1 voreilt.

Der *Stromfehler* ist die Differenz ΔJ in Prozent bezogen auf den Primärstrom:

$$i_R = 100 \frac{J_2 \cdot K_n - J_1}{J_1} [\%] \quad (4) \quad K_n = \text{Nenn-Übersetzungsverhältnis}$$

i_R wird negativ, wenn J_2 kleiner als der Nenn-Sekundärstrom ist. Sie können J_2 durch Abgleichen der Windungszahlen vergrößern, entweder durch Erhöhung der primären oder durch Erniedrigung der sekundären Windungszahl, um die Fehlerkurve teilweise in das positive Gebiet zu verschieben (Bild 62).

Ein Stromwandler mit 1000 Aw habe sekundär $\frac{1000 \text{ Aw}}{5 \text{ A}} = 200$ Windungen.

Bei Vollast haben Sie

$i_R = -0,7\%$, bei 1/10 Last

$i_R = 1,8\%$ gemessen. Wenn Sie sekundär zwei Windungen (1%) fortnehmen, so steigt J_2 um 1%. Dadurch wird i_R bei Vollast $\approx +0,3\%$ und bei 1/10 Last $\approx -0,8\%$. Die Fehlerkurve wird um rund 1% nach oben verlagert.

Die *Nennbürde* ist der in Ohm anzugebende Scheinwiderstand des Sekundärkreises, bei der die Fehlergrenzen der Klasse des Wandlers noch ein-

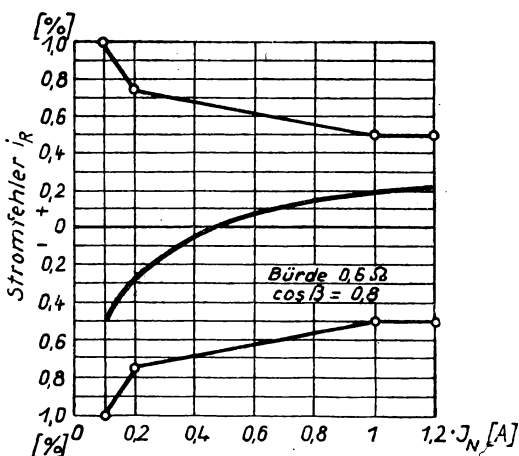


Bild 62. Stromfehlerkurve eines Stromwandlers der Klasse 0,5 und Grenzklinien nach VDE

gehalten werden. Die *Nennleistung* in VA ist das Produkt I_n^2 mal Nennbürde. Sie wird in den Preislisten angegeben, weil sie sowohl für 5 A als auch für 1 A Nennstrom zutrifft. Sie wählen das Wandlernetzmodell nach der Summe der Scheinleistungsaufnahmen der anzuschließenden Meßgeräte und Relais, die auch den Listen zu entnehmen sind. Dazu kommt der Verbrauch der Meßleitungen.

Die für die Güteklassen festgesetzten *Fehlergrenzen* sind in Tafel 2 angegeben.

T a f e l 2

Fehlergrenzen zwischen 1/10 und 12/10 des Nennstromes nach VDE

Klasse	Stromfehler in $\pm \%$				Fehlwinkel in \pm min			
	0,1 J	0,2 J	1,0 J	1,2 J	0,1 J	0,2 J	1,0 J	1,2 J
0,1	0,25	0,2	0,1	0,1	10	8	5	5
0,2	0,5	0,35	0,2	0,2	20	15	10	10
0,5	1,0	0,75	0,5	0,5	60	40	30	30
1	2,0	1,5	1,0	1,0	120	80	60	60
3 und 10	3,0 und 10,0 bei 0,5 und 1,0 J				Hier nicht begrenzt			

Die Fehlergrenzen sind einzuhalten zwischen 1/4 und 4/4 der Nennbürde, bei den Klassen 3 und 10 nur zwischen 1/2 und 1/1 der Nennbürde, jeweils bei dem Leistungsfaktor der Bürde $\cos \beta = 0,8$.

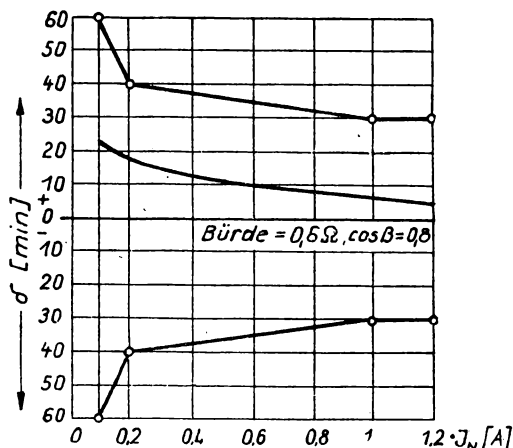


Bild 63. Fehlergrenzenkurve eines Stromwandlers der Klasse 0,5 und Grenzlinien nach VDE

Damit Sie nicht mißverstehen: Im Betrieb ändert sich der Sekundärstrom des Wandlers verhältnismäßig mit dem Primärstrom, nicht aber die Bürde, denn diese ist der Scheinwiderstand der angeschlossenen Geräte. Allenfalls kann der Blindwiderstand von Geräten mit Eisenkernen im Sättigungsgebiet kleiner werden, wie bei Überstromrelais.

Bild 62 und 63 stellen die Fehlergrenzen für die Klasse 0,5 mit den Fehlerkurven dar, nach Messungen an

einem Wandler mit einer Bürde von $0,6 \Omega$, $\cos \beta = 0,8$. Die Sekundärwicklung ist abgeglichen worden, so daß der Stromfehler aus dem Negativen

in das Positive mit steigender Last übergeht. Der Wandler ist um so besser, je flacher die Kurven sind, je geringer das *Gefälle* ist.

Die Klasse 0,1 wählen Sie bei Messungen, die größte Genauigkeit verlangen, insbesondere bei großer Phasenverschiebung, die Klassen 0,2 und 0,5 für Messungen im Prüffeld und Labor sowie im Betrieb für die Messung von Leistung und Arbeit zur Kostenberechnung, Klasse 1 für Kontrollmessungen im Betrieb und die Klassen 3 und 10 für Kontrollstrommesser und Relais.

Die *Überstromziffer* n ist das Vielfache des Primär-Nennstromes, bei dem der Stromfehler 10 % wird bei der Nennbürde mit einem beliebigen $\cos \beta$. Diese Ziffer ist wichtig zur Beurteilung von Wandlern für neuzeitliche Überstromschutzrelais. Es ist nötig, daß der Wandler auch den höchsten an der Einbaustelle auftretenden Kurzschlußstrom mit einem zulässigen Fehler übersetzt, damit die Staffelung der Abschaltung nach der Höhe des Überstromes möglich ist. Im Bereich der Sättigung des Wandlerkerns nimmt der Übersetzungsfehler ΔJ stark zu, weil der Sekundärstrom sich einem Grenzwert nähert. Eine hohe Überstromziffer bei großer Nennbürde bedingt einen sehr großen Eisenquerschnitt, also einen teuren Wandler. Im allgemeinen kommt man mit $n = 10$ für Überstromschutz aus.

Haben Sie nur Meßgeräte anzuschließen, dann ist eine niedrige Überstromziffer erwünscht (etwa $n = 3$), weil dadurch zur Schonung der Instrumente der Überstrom im Sekundärkreis auf eine niedrige Grenze beschränkt wird.

Um beide Vorteile zu vereinen, können Sie den *Stromwandler mit zwei Sekundärwicklungen* (Bild 64) auf je einen Kern verwenden. Die Meßgeräte schließen Sie an den *Meßkern* c_2 (z. B. Klasse 0,5) an, der aus einem Ni-Fe-Material mit hoher Anfangs- und Maximalpermeabilität und geringer Sättigungsinduktion gefertigt ist. Der Relaiskreis kommt an den *Relaiskern* c_1 aus den üblichen legierten Eisenblechen mit hoher Sättigungsinduktion.

An die *Kurzschlußfestigkeit* der Stromwandler werden hohe Ansprüche gestellt, wenn an der Einbaustelle mit einem großen Kurzschlußstrom zu rechnen ist, dessen mechanischen und thermischen Wirkungen der Wandler gewachsen sein muß. Die mechanische Festigkeit wird nach VDE durch die Angabe des *dynamischen Grenzstromes* J_{dyn} in kA gekennzeichnet. Es ist der erste Scheitelwert des Kurzschlußstromes, dessen Kraftwirkung der Wandler bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung nach der Zusage des Herstellers verträgt. Mit dem *thermischen Grenzstrom* J_{therm} in kA bezeichnet der Hersteller den Primärstrom, den die Primärwicklung eine Sekunde lang ohne Schaden aushalten kann. J_{therm} wird berechnet nach der Fest-

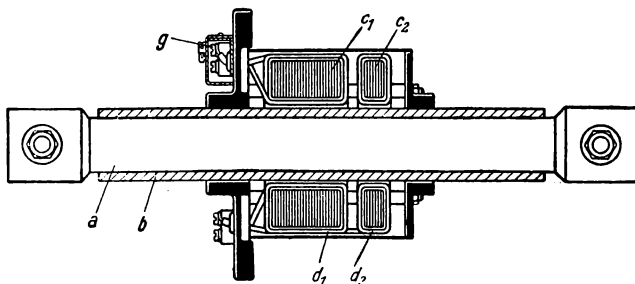


Bild 64. Stabstromwandler mit zwei Kernen

setzung, daß je mm^2 des Primär-Leiterquerschnittes F_1 180 A eine Sekunde lang zulässig sind, also $J_{\text{therm}} = F_1 [\text{mm}^2] \cdot 180 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2 \cdot \text{s}}$. Dauert der Kurzschlußstrom J_k bis zur Abschaltung t [s], so gilt

$$\frac{t [\text{s}]}{1 \text{ s}} = \frac{J_{\text{therm}}^2 [\text{kA}]^2}{J_k^2 [\text{kA}]^2}$$

Bei Dauerbelastung mit dem 1,2fachen Nennstrom muß die Grenzerwärmung nach VDE 0414 eingehalten werden.

[18] Bauformen

a) Allgemeines

Wie bei den Spannungswandlern unterscheidet man nach der Art der Isolierung Trocken-, Masse- und Ölstromwandler. Die Trockenisolation ist bei den Stromwandlern einfacher und daher billiger zu erreichen als bei den Spannungswandlern, weil die Primärwicklung verhältnismäßig wenig Windungen mit großem Leiterquerschnitt hat. Für Innenraum-Anlagen werden Sie daher den Trockenwandler vorziehen im Hinblick auf die Brand- und Verqualmungsgefahr, die bei Öl- und Wasserwandlern nicht ausgeschlossen ist.

In der Ausführung besteht ein Unterschied zwischen dem fest eingebauten Betriebswandler und dem tragbaren Wandler. Letzterer soll durch Form und Gewicht den Transport zur Meßstelle nicht erschweren. Da mit ihm häufig Abnahmemessungen durchgeführt werden, soll er möglichst kleine Fehler haben (Klasse 0,2 oder 0,1). Ferner soll er sich den vorkommenden Betriebsstromstärken anpassen lassen durch eine vielstufige Änderung des Übersetzungsverhältnisses. Das ist möglich durch die Parallel- und Reihenschaltung von Wicklungsgruppen oder durch primäre und sekundäre Anzapfungen, bei den sogenannten Durchsteckwandlern auch durch ein- oder mehrmaliges Hindurchführen mitgelieferter Primärleiter durch die Öffnung des Wandlers.

Auch für den fest eingebauten Wandler kann die Umschaltung auf einen anderen Meßbereich erwünscht sein, um z. B. die Meßgenauigkeit zuzeiten niedriger Belastung zu erhöhen.

Sie können ein Übersetzungsverhältnis auch mit einem *Zwischenwandler* ändern, den Sie an die Sekundärseite des Hauptwandlers anschließen, und der dessen Sekundär-Nennstrom z. B. von 5 A auf 3 A herabsetzt. Das kommt bei besonderen Erdungsschaltungen und bei der Summierung von Strömen vor.

Die Klasse 0,1 genügt noch nicht für die genauesten Messungen. Insbesondere bei der Prüfung von Stromwandlern hinsichtlich ihrer Fehler braucht man ein Vergleichsnormal. Ist dieses ein Normalwandler, dann sollen seine Fehler kleiner sein als die möglichen Beobachtungsfehler des Meßverfahrens. Das ist durch die Verwendung einer hochwertigen Ni-Fe-Legierung als Material für den ringförmigen Kern gelungen. Die möglichen Fehlergrenzen sind $i_R = \pm 0,01\%$ und $\delta = \pm 1$ min zwischen 10 % und 120 % des Primär-Nennstromes. Dem Verwendungszweck entsprechend ist der Normalwandler vielstufig umschaltbar, um für alle gebräuchlichen Übersetzungsverhältnisse mit einem Normal auszukommen.

b) Stab-, Schienen-, Kabel- und Anlegerstromwandler

Diese Bauarten fallen unter den Sammelbegriff *Einleiterwandler*, bei denen also primär nur ein Leiter vorhanden ist.

Beim *Stabstromwandler* (Bild 64) wird der Primärleiter mit Anschlußschrauben als zum Wandler gehörender Teil mitgeliefert. Kennzeichnend ist der Ringkern, der konzentrisch zum Primärleiter angeordnet ist und bei gleichmäßig auf den Umfang verteilter Sekundärwicklung dem Wandler eine unbegrenzte dynamische Kurzschlußfestigkeit gibt. Leider ist die nötige primäre Aw-Zahl wegen des einfachen Leiters erst ab etwa 50 A Nennstrom zu erreichen. Dies ist auch nur deshalb möglich, weil der Ringkern gegenüber anderen Bauformen wegen des kurzen Feldlinienweges den kleinsten magnetischen Widerstand hat, was durch die Schichtung der Bleche ohne Stoßfugen noch begünstigt wird. Die Belastbarkeit des Wandlers ist aber proportional dem Produkt aus der Aw-Zahl und dem magnetischen Fluß.

Die Isolation zwischen der Sekundärwicklung und dem Stab ist Hartpapier oder Porzellan. Ein Befestigungsflansch gestattet die Verwendung des Wandlers als Durchführung.

Der *Schienenstromwandler* (Bild 65) wird ohne Primärleiter geliefert und um die Stromschiene unter Einfügung

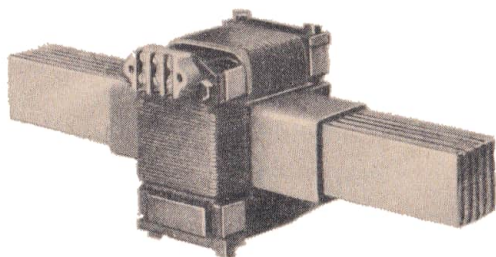


Bild 65. Schienenstromwandler

einer Hartpapierisolation herumgebaut. Der Fortfall der Primär-Klemmschrauben erleichtert die Montage und vermeidet die Übergangswiderstände. Bei den hohen Primärströmen, für die diese Bauart bei Niederspannung und mittlerer Hochspannung gewählt wird, ist dies sehr vorteilhaft. Auch die Kurzschlußfestigkeit ist groß.

Beim *Kabelstromwandler* (Bild 66) ist der bewickelte Ringkern über den Leiter des Kabels geschoben und mit dem Endverschluß konstruktiv vereinigt. Dieser ist ein Gußkörper 2 aus einem magnetisch indifferenten Werkstoff (z. B. Messing) und trägt oben die Porzellan- oder Hartpapier-Durchführung.

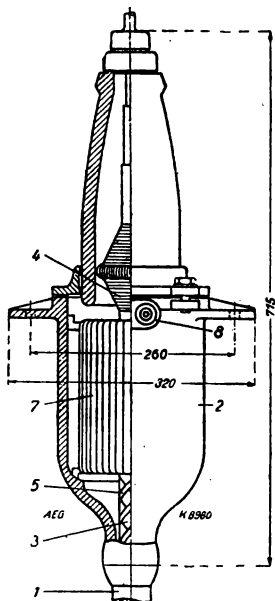


Bild 66. Kabelstromwandler

Der gezeichnete Endverschlußwandler ist für ein 35-kV-Kabel bestimmt, dessen äußere Papierisolierung 3 metallisiert ist und aus Gründen der dielektrischen Festigkeit im Metallisierungsabschluß 4 endigt. Dieser hat Erdpotential und ist zur Erhöhung der Leitfähigkeit durch die Kupferband-Spirale 5 mit dem Bleimantel 1 verbunden. Die Enden der Sekundärwicklung 7 führen zu den Klemmen 8. Der Wandler kann auch mit Meß- und Relaiskern ausgeführt werden.

Der *Anlegerstromwandler* ist der schon in Lehrbrief 2 beschriebene Wandler mit einem Kern in Zangenform zur gelegentlichen Messung des Stromes in einem geraden Leiter, um den die Zange geschlossen wird.

Die Einleiter-Wandler werden wegen ihrer Kurzschlußfestigkeit bevorzugt verwendet, wenn bei der Betriebsstromstärke eine ausreichende Belastbarkeit für die geforderte Genauigkeit der Messung zu erreichen ist.

Die folgenden Bauarten gehören zum Sammelbegriff *Wickelwandler*. Reicht der primäre Einleiter für die Erzeugung der Aw nicht aus, dann muß unter Verminderung der Kurzschlußfestigkeit eine Wicklung ausgeführt werden.

c) Schleifenstromwandler

Bei diesem Wandler ist die Primärwicklung in Form einer oder mehrerer rechteckiger Schleifen durch zwei Hartpapier-Durchführungen (Bild 68) oder Porzellan-Durchführungen (Bild 67) geführt. Diese gehen durch die Fenster eines Mantelkerns, dessen Schenkel die Sekundärwicklung tragen.

Der Einbau mehrere Kerne für Messung und Relais ist möglich. Bei Kurzschluß treten zwischen den Durchführungen abstoßende Kräfte auf, denen die Isolatoren standhalten müssen. Richtwerte für die Kurzschlußfestigkeit sind $J_{dyn} = 250 \text{ bis } 300 J_n$ und $J_{therm} = 100 J_n$.

d) Topfstromwandler

Der Name kennzeichnet die äußere Form, weil das Wandler-System in einem Blechtopf untergebracht ist mit einem oben herausragenden Isolator für den Primäranschluß. Es ist die übliche Form für die Aufstellung auf einer festen Unterlage, wenn die Ausföhrung als Durchföhrung nicht möglich ist. Erhält der Topf zur Isolierung

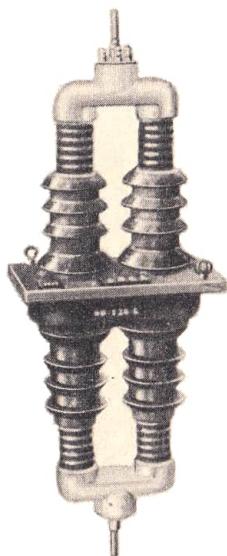


Bild 67

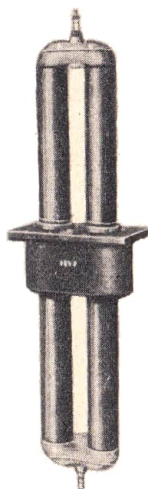


Bild 68

Schleifenstromwandler Schleifenstromwandler

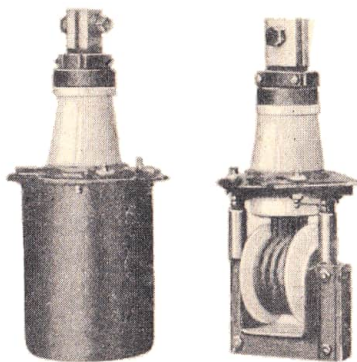


Bild 69. Öl-Topfstromwandler

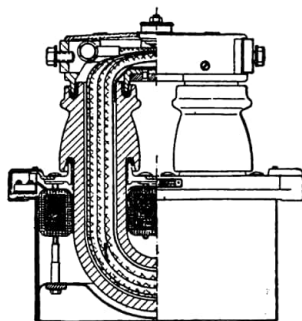


Bild 70. U-Rohr-Topfstromwandler

eine Ölfüllung (Bild 69), so kann der Wandler bis etwa 150 kV und bis etwa 600 A Nennstrom gebaut werden. Bis 30 kV ist Porzellanisolierung möglich ohne zusätzliche Verwendung von Öl oder Masse. Bild 70 zeigt den U-Rohr-Topfstromwandler, dessen Primärwicklung schleifenförmig durch den Porzellankörper geföhrt ist. Die Bauart ist dem Schleifen-Durch-

führungswandler ähnlich. Der in Bild 77 gezeigte Querlochstromwandler ist ebenfalls die Topfformbauart. Aus diesen Beispielen geht schon hervor, daß bei den Topfstromwandlern das eigentliche Wandlersystem je nach Spannung, Stromstärke und Isolation verschiedenartig ist. Den Konstrukteur haben technische und wirtschaftliche Gesichtspunkte zu leiten hinsichtlich Spannungs- und Kurzschlußfestigkeit, Meßleistung und Genauigkeit bei geringstem Aufwand. Die Bilder 71 bis 74 zeigen schematisch verschiedene Einbauten bei Öl-Topfstromwandlern. Man muß damit rechnen, daß das Öl am Boden des Topfes feucht ist und Schlamm bildet. Die Hochspannungswicklung darf man nicht in dieses Gebiet hineinlegen. Sie sehen, daß der Mantelkern (Bild 72) höher gelagert ist als der Schenkelkern (Bild 71). Beide Bauarten mit konzentrisch angeordneten Spulen werden bis etwa 30 kV gebaut. Bild 73 ist die Schleifenbauart unter Öl mit Mantelkern, die bis 150 kV ausgeführt wird. Die Bauhöhe wird größer als die des Kreuzring-Wandlersystems (Bild 74) mit gleicher Spannungsfestigkeit. Man verwendet den Ringkern mit der auf den Umfang gleichmäßig verteilten Sekundärwicklung. Die kreisförmige und durch Bandagen gegen die Sekundärwicklung isolierte Primärwicklung durchdringt die Öffnung des Kerns senkrecht zur Kernebene, so daß sich das Bild zweier Kettenglieder ergibt. Durch die Kreisform der Hochspannungsspule ist eine hohe dynamische Kurzschlußfestigkeit gegeben.

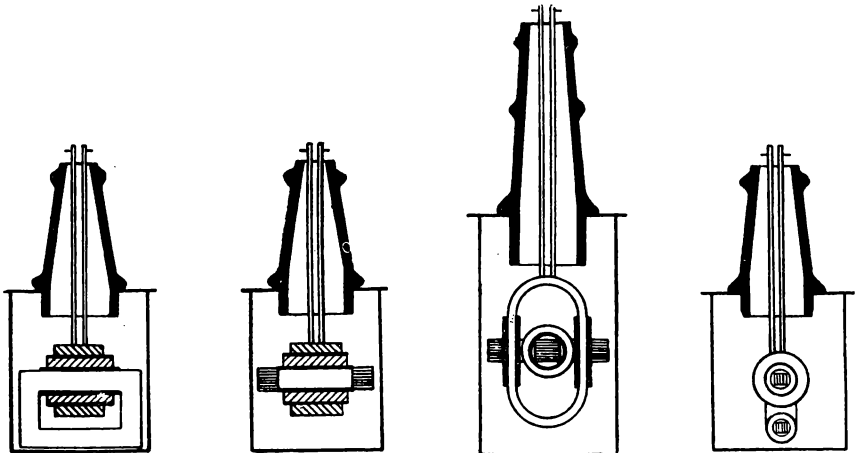


Bild 71

Bild 72

Bild 73

Bild 74

Öl-Topfstromwandler mit verschiedenen Wandlersystemen

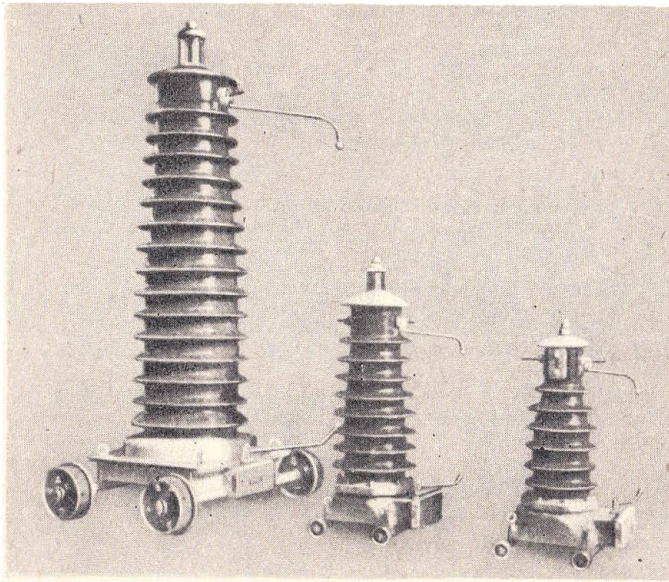


Bild 75. Stützerstromwandler

e) Stützerstromwandler

Wenn Sie sich bei den Bildern 71 bis 74 den Öltopf fortdenken und das Wandler-System unter Vergrößerung des Isolators entsprechend der Spannungsreihe in seinem ölgefüllten Inneren unterbringen, dann haben Sie den Stützerstromwandler (Bild 75). Oben befinden sich das Ölausdehnungsgefäß und die Primäranschlüsse. Der Stützer steht öldicht auf einem eisernen Sockel mit Rädern, der einen Anschlußkasten mit den Sekundärklemmen hat. Die seitlichen Arme bilden eine Funkenstrecke, die den bei einem Überschlag entstehenden Lichtbogen von dem Porzellan fernhalten soll. Diese Wandler sind für Freiluftanlagen besonders geeignet. Ein Stromwandler für 220 kV mit Kreuzringsystem hat etwa 3,2 m Gesamthöhe und 1500 kg Gewicht.

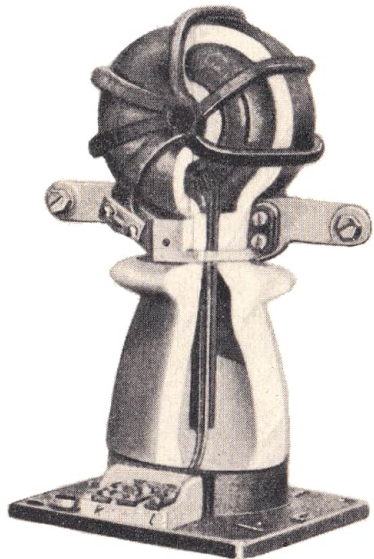


Bild 76. Stützerkopfstromwandler

Der *Stützerkopfstromwandler* ist ein porzellanisolierter Stützerstromwandler für mittlere Hochspannung (Bild 76). Ein Ringkern mit Sekundärwicklung ist allseitig von Porzellan umgeben. Dieser Porzellanring, der den Stützerkopf bildet, trägt die Primärwicklung, die also gut luftgekühlt wird, was ein beachtlicher Vorteil dieser Bauart ist. Sie erkennen auch die primären Anschlußklemmen, die in der genormten Stützerhöhe liegen, und die Sekundärklemmen auf dem Stützersockel.

Wie baut man aber den Kern mit der Wicklung in den Kopf ein?

Der Porzellankörper wird mehrteilig ausgeführt und nach dem Einbringen des Kerns mit einer sogenannten Edelfuge zusammengefügt, ohne daß dadurch eine Minderung der mechanischen und elektrischen Festigkeit festzustellen ist.

f) *Querlochstromwandler*

Dieser porzellanisierte Wandler wurde bereits in Lehrbrief 2 als Durchführungstype gezeigt. In Bild 77 sehen Sie diese Bauart als Topfstromwandler mit aufgeschnittenem Porzellankörper. Die fertig gewickelte Sekundärspule wird in das Querloch gesteckt, dann werden die Eisenbleche des Mantelkerns geschichtet. Der Primärdraht wird durch den

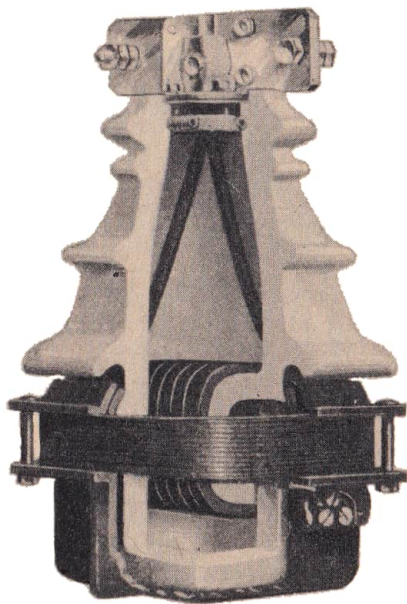


Bild 77. Querlochstromwandler

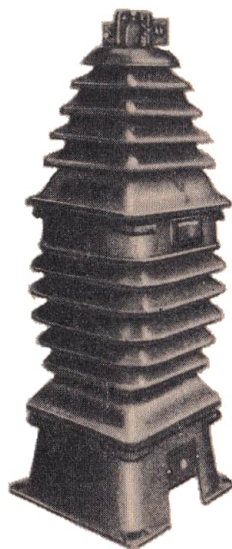


Bild 78. Kaskadenstromwandler

Kopf des Stützers eingeführt und um das Porzellan gewickelt, denn der Körper wird hier nicht aus Teilen zusammengesetzt. Diese bewährte Bauart wird bis Reihe 30 verwendet. Um das Glimmen der Luft zu vermeiden, wird der Porzellankörper mit graphitiertem Sand gefüllt, wodurch die Wicklung auch mechanisch gegen die Kurzschlußkräfte abgestützt wird.

g) Kaskadenstromwandler

Wie beim Kaskadenspannungswandler ist auch bei diesem Stromwandler der Grundgedanke der, die Isolationsschwierigkeiten bei hohen Spannungen dadurch zu meistern, daß das Potentialgefälle auf zwei oder mehrere Wandler verteilt wird. Bei der normalen einteiligen Bauart ist die Primärwicklung gegen die einpolig geerdete Sekundärwicklung und den geerdeten Kern voll zu isolieren. Bei zwei Wandlern in Kaskade speist aber die Sekundärwicklung des in der Hochspannungsleitung liegenden Wandlers die Primärwicklung des zweiten und seine geerdete Sekundärwicklung erst den Meßkreis.

Der Kern des ersten Wandlers darf nicht geerdet werden, denn er nimmt ein mittleres Potential gegen Erde an und ist dafür zu isolieren. Sie können die beiden Wandler bezüglich der Potentialverteilung als zwei in Reihe geschaltete Kondensatoren auffassen. So kann das Gesamtpotential durch mehrere Stufen noch weiter unterteilt werden, und es ist das Ergebnis einer Wirtschaftlichkeitsrechnung, ob der Mehraufwand an Material und Lohn für eine Kaskade gegenüber dem Aufwand für eine betriebssichere Ausführung des Einzelwandlers lohnt, sofern letztere überhaupt möglich ist. Bild 78 zeigt Ihnen einen Kaskadenstromwandler. Die Teilwandler werden wie beim Spannungswandler turmartig übereinandergesetzt. Wenn sie als porzellanisolierte Wandler, z. B. in der Querlochbauart, ausgeführt werden, so lassen sich auch für hohe Spannungen Kaskaden ohne Öl bauen.

h) Kombinierte Strom- und Spannungswandler

Es liegt nahe, beide Wandler zu einem Meßsatz zu vereinigen, um Platz zu sparen und eine bessere Materialausnutzung zu erreichen (Bild 79). Das kommt für hohe

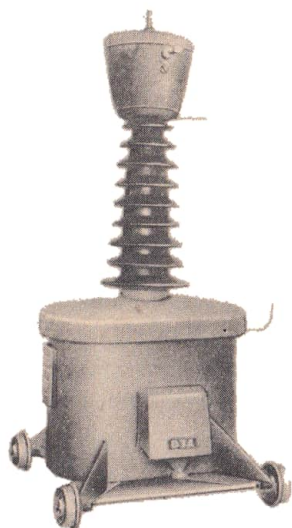


Bild 79. Meßwandlersatz der Reihe 110 (Strom- und Erdungsspannungswandler)

Spannungen in Frage, wobei der Stützisolator einen großen Teil des Materialaufwandes darstellt. Man kann das Spannungswandler- und das Stromwandlersystem mit getrennten Kernen in den beschriebenen Bauarten ausführen und beide in einem einzigen Gehäuse unterbringen. Eine andere Möglichkeit ist, beide Systeme auf einem Dreischenkeln zu vereinen; die Stromspulen befinden sich auf dem Mittelschenkel, die Spannungsspulen je zur Hälfte auf den beiden Außenschenkeln und derart in Reihe geschaltet, daß sich die erzeugten magnetischen Flüsse im Mittelschenkel aufheben.

i) Gleichstrommeßwandler

Bei der Messung von hohen Gleichströmen, wie sie in der Elektrochemie und Metallurgie vorkommen, ist der Nebenwiderstand ungünstig wegen der möglichen Meßfehler durch die Kontaktwiderstände. Da das Meßgerät galvanisch mit dem Nebenwiderstand verbunden ist, wird ferner der einfache Berührungsschutz durch Erdung unmöglich, wenn der Leiter ein Potential gegen Erde hat. Bei hoher Gleichspannung müßte dann das

Instrument, gegebenenfalls die ganze Schalttafel, gegen Erde isoliert aufgestellt werden, wobei die Gefahr der versehentlichen Berührung bestehen bleibt.

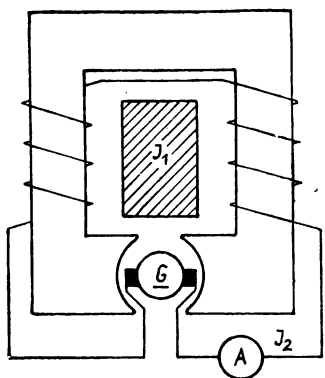


Bild 80. Gleichmeßstromwandler als Generator in Kompensations-schaltung

Für diese Fälle sind Meßwandler vorwiegend nach zwei Methoden entwickelt worden. Für hohe Ströme ist der Meßwandler nach Bild 80 geeignet.¹ Die Gleichstromschiene (Primärstrom J_1) ist von dem Eisenkern umgeben, zwischen dessen Polschuhen ein kleiner Gleichstromanker von einem Motor angetrieben wird. Die im Anker induzierte und dem Gleichfeld proportionale EMK bewirkt einen Strom J_2 durch die auf dem Eisenkern aufgebrachte Wicklung. Das von J_2 erregte Feld ist wie beim Wechselstrom-

wandler dem von J_1 erregten entgegengerichtet, jedoch werden die sekundären A_w soweit verringert, daß bei Vollast durch das Instrument der Nennstrom fließt. Bei dieser Schaltung kann die Drehzahl des Antriebmotors in gewissen Grenzen ohne Einfluß auf die Meßgenauigkeit schwanken. Mit einer Kompensation des Temperatureinflusses und der Anker-

¹ Nölke: Der Gleichstrom-Meßwandler. ETZ 57 (1936), S. 37.

rückwirkung leistet der Wandler in der Klasse 0,2 15 W oder 30 W in der Klasse 0,5.

Die zweite Methode beruht auf der Abnahme der Permeabilität eines wechselstromerregten Eisenkerns, wenn dieser zusätzlich durch Gleichstrom magnetisiert wird. Nach der von BESAG¹ angegebenen Prinzipschaltung (Bild 81) werden zwei Eisenkerne, die von dem zu messenden Gleichstrom J_g erregt werden, durch Wechselstrom konstanter Spannung und Frequenz derart magnetisiert, daß die beiden Wechselflüsse gleich und entgegengesetzt sind. Dadurch soll vermieden werden, daß in der Gleichstromwicklung eine Wechselspannung induziert wird. Mit steigendem Gleichstrom sinkt die Permeabilität des Eisens, wodurch der Magnetisierungsstrom J_w ansteigt, der demnach ein Maß für J_g ist. Durch passende Wahl des Kernmaterials (Ni-Fe) und seiner Abmessungen² werden eine gleichmäßige Skalenteilung und eine weitgehende Unabhängigkeit von Schwankungen der Wechselspannung und Frequenz erreicht. Dieser Gleichstromwandler hat äußerlich die Form des Wechselstromwandlers, denn es werden seine Konstruktionsteile, z. B. die Querlochbauart für Hochspannung, verwendet.

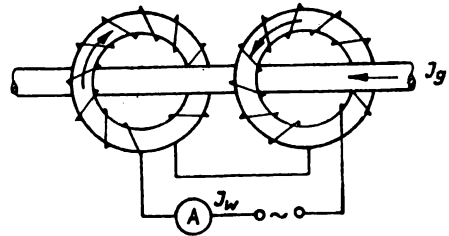


Bild 81. Gleichstrommeßwandler nach Besag

Zusammenfassung zu [16] bis [18]

Der Stromwandler bezweckt die Herabsetzung des Meßstromes auf einer niedrigen genormten Wert und die galvanische Trennung der Meßgeräte von der Hochspannung. Er ist ein Umspanner, der praktisch kurzgeschlossen ist durch den kleinen Scheinwiderstand des Meß-Strompfandes, der Bürde. Da er für diesen Betriebszustand bemessen ist, würde der Primärfluß bei offenen Sekundärklemmen wegen der fehlenden Gegen-Aw zu groß sein und eine unzulässige Sekundärspannung und Eisenerwärmung erzeugen.

Das Zeigerdiagramm erläutert die Entstehung der stromabhängigen Fehlergrößen durch den Leerlaufstrom, der eine geringe Abweichung des Sekundärstromes von dem durch das Nenn-Untersetzungsverhältnis gegebenen Wert bewirkt. Diese Differenz wird in Prozent des Primärstromes gemessen und als Stromfehler bezeichnet. Außerdem fällt der um 180° ge-

¹ Besag: ETZ 40 (1919), S. 436.

² Krämer: ETZ 58. (1937), S. 1309.

drehte sekundäre Stromvektor nicht mit dem primären zusammen; die in Bogenminuten gemessene Abweichung ist der Fehlwinkel δ . Für beide Fehlergrößen sind nach dem VDE zulässige Grenzen festgelegt, entsprechend der Genauigkeitsklasse des Wandlers.

Im Gegensatz zum Spannungswandler ist der Stromwandler betriebsmäßigen Kurzschlüssen ausgesetzt. Die Angaben des Leistungsschildes über die Höhe des dynamischen und des thermischen Grenzstromes kennzeichnen die Kurzschlußfestigkeit.

Wandler mit mehreren Kernen ermöglichen den getrennten Anschluß von Relais und von Instrumenten. Die für den Kern angegebene Überstromziffer ist das Vielfache des Nenn-Primärstromes, bei dem der Stromfehler 10 % bei der Nennbürde ist.

Die Bauarten sind unterschiedlich nach der Art der Isolierung, nach der Ausführung der Primärwicklung als Einleiter-, Schleifen- oder Wickelstromwandler, nach der Form des Eisenkerns als Schenkel-, Mantel- oder Ring-Type, nach der äußeren Form als offene, Topf-, Durchführungs-, Stützerkopf- oder Stützerstromwandler, nach der Aufteilung des Spannungsgefälles auf mehrere Stufen als Kaskadenstromwandler. Tragbare Wandler für Labor und Prüffeld werden mit vielstufig umschaltbaren Wicklungen ausgeführt.

Präzisionsstromwandler mit vernachlässigbar kleinen Fehlern werden als Normal für die genauesten Messungen gebaut.

Der Gleichstrommeßwandler hat Bedeutung bei Hochstrom- und bei Hochspannungsanlagen für Gleichstrom.

Übungen

44. Bei langen Meßleitungen ist es günstiger, einen Stromwandler für sekundär 1 A statt 5 A zu nehmen. Wie begründen Sie das?
45. Wann würden Sie einen Stromwandler mit zwei Kernen verwenden?
46. Warum soll man einen Stromwandler nicht mit zu großer Untersetzung wählen, um eine reichliche Reserve für spätere Anschlüsse zu haben?
47. Von einem Stromwandler 100/5 A, 5 VA, führt eine 2 mal 30 m lange Cu-Leitung mit 1,5 mm² Querschnitt zu einem Strommesser, der 3,8 VA bei 5 A aufnimmt. Der Strommesser zeigt falsch. Wie groß müßte die Nennleistung des Wandlers mindestens sein?

Antworten und Lösungen

1. Das Drehmoment ist größer wegen der erhöhten Reibung.
2. Der Punktschreiber ist nur anwendbar bei so langsamen Änderungen der Meßgeräte, daß man unbeschadet der Genauigkeit zwei Punkte der Aufzeichnung durch eine Gerade verbinden kann. Der Tintenschreiber hingegen gibt mit seiner ununterbrochenen Kurve den vollständigen Vorgang wieder.
3. Mit einem einzigen Meßgerät kann man auf demselben Papierstreifen die Werte von max. sechs Meßstellen in verschiedenen Farben punktieren lassen. Es ersetzt in diesem Fall sechs Tintenschreiber, die bei schwachem Meßstrom möglicherweise nur durch Verstärkung dieses Stromes verwendbar wären.
4. Nein, die erforderliche Schreibgeschwindigkeit ist für Tintenschrift zu hoch, außerdem läßt es die Masse der beweglichen Teile nicht zu.
5. Der Austritt der Tinte aus der Feder hängt von der Schreibgeschwindigkeit ab. Hat man die gewünschte feine Strichstärke bei niedriger Relativgeschwindigkeit zwischen Feder und Papier, dann wird der Strich zu dünn oder setzt aus bei zu hoher Geschwindigkeit.
6. Nein, es ist eine Spezialtinte, die in der Feder nicht eintrocknen soll.
7. Bei den meisten Meßwerken wird die Drehschwingung eines kleinen Spiegels durch den von ihm reflektierten Lichtzeiger vergrößert. Die Optik des Gerätes bildet auf der Fotoschicht dieses Zeigerende als hellen Punkt ab. Das Ergebnis ist eine schwarze Kurve auf hellem Grund. Das Schattenzeigerverfahren ist durch die Bauart des Saiten-Galvanometers gegeben: Der Schatten der abgelenkten Saite liefert auf der entwickelten Fotoschicht eine helle Linie auf dunklem Grund.
8. Eine hohe Schreibgeschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit zwischen Lichtpunkt und Schicht), die kurze Belichtungszeit bedeutet, bedingt eine der Empfindlichkeit der Schicht entsprechende ausreichende Helligkeit des Lichtpunktes. Gegebenenfalls muß die Leuchtdichte der Glühlampe durch Steigerung der Fadentemperatur erhöht werden auf Kosten der Lebensdauer, oder es sind Lichtquellen mit höherer photographischer Wirksamkeit (Aktivität) einzusetzen (Bogenlampe, Hg-Dampflampe).
9. Ja, auf einer Chlorsilberschicht bei nicht zu hoher Schreibgeschwindigkeit und mit einer Lichtquelle mit starker Ultraviolett-Strahlung.

10. Beim Papierstreifen größere Diagrammlänge sichtbar, Papiervorrat für mehrere Wochen; bei der Trommel geringe Übersicht, Auswechslung des Blattes täglich, allenfalls wöchentlich. Die Trommel ermöglicht aber kürzere Baulänge des Gerätes und einen schwächeren Antrieb sowie höhere Papiergeschwindigkeit bei Oszillogrammen.
11. Durch Lichtblitze in bekannten Zeitabständen oder durch Aufzeichnen einer Sinuslinie bekannter Frequenz mit einem schwingenden Spiegel.
12. Die Ablaufgeschwindigkeit der Schreibflächen sind aus mechanischen Gründen nach oben begrenzt. Es kommt auch vor, daß die Meßgröße nicht von der Zeit, sondern von einer anderen Veränderlichen abhängig ist (Koordinatenschreiber).
13. Er ist billiger als die anderen Antriebe und wird in der Ganggenauigkeit nicht durch veränderliche Last und Temperatur sowie durch Magnetfelder, wie der Uhrwerkantrieb, beeinflusst.
14. Bei mehreren zentral angebrachten Geräten, wenn die Aufstellung der Mutteruhr sich lohnt.
15. Ein Tintenschreiber mit kurzer Einstellzeit, bei dem der Papiervorschub selbsttätig auf Schnellgang umgeschaltet wird durch eine anomale Änderung der Meßgröße, so daß das Diagramm mit stark vergrößertem Zeitmaßstab geschrieben wird. Nach Ablauf einer oder mehrerer Schnellaufperioden wird selbsttätig auf den Langsamgang zurückgeschaltet, wobei die Zeitangabe des Streifens wieder richtig sein soll.
16. Das Diagramm soll rechtwinklige Koordinaten haben, damit es leicht ausgewertet werden kann.
17. Keine Verzerrung der Skala, einfache und störungssichere Konstruktion, geringe zusätzliche Reibung, geringe Masse, konstanter Schreibdruck.
18. Eine freie Schwingung macht ein sich selbst überlassenes schwingfähiges System nach einer einmaligen Ablenkung aus der Ruhelage. Dagegen führt das System erzwungene Schwingungen aus durch den Einfluß einer dauernd periodisch wechselnden Kraft.
19. Es ist nach vorigem die freie Schwingung der Schleife, deren Frequenz durch Trägheitsmoment und Richtkraft bestimmt wird.
20. Weil Resonanzschwingungen die Messung fälschen würden.
21. In mm Ausschlag auf der Schreibfläche je mA Schleifenstrom. Die Meßschleife muß also hinsichtlich der Optik (Lichtzeigerlänge) zum Gerät passen.

22. Wegen der größeren Richtkraft infolge stärkeren Federzuges.
23. Zum Begrenzen des Schleifenstromes auf den zulässigen Wert und zum Einregeln der Schwingungsamplitude.
24. Zu der eingestellten Grobreglerstufe $0,05 \Omega$ ist ein Stromkreis parallelgeschaltet, in dem die Schleife, der Feinregler und der Restwiderstand des Grobreglers in Reihe liegen.

Mit hier zulässiger Vernachlässigung der Leitungswiderstände ist der Gesamtwiderstand $1,4\Omega + 6\Omega + 4,95\Omega = 12,35\Omega$. Vom Stromwandler kommen 10 A. Nach den Gesetzen der Stromverzweigung ist, wenn x [A] durch die Schleife fließen:

$$\frac{12,35\Omega}{0,05\Omega} = 247 = \frac{10\text{ A} - x\text{ [A]}}{x\text{ [A]}} = \frac{10}{x} - 1 \text{ oder } \frac{10}{x} = 247 + 1 = \underline{248}$$

$$\frac{10}{x} = 248, x\text{ [A]} = \frac{10\text{ A}}{248} \approx 0,04\text{ A} = \underline{\underline{40\text{ mA}}}$$

25. Bei der Frequenz $f = 50\text{ Hz}$ und $a = 8$ Flächen des Spiegels ist seine minutliche Drehzahl

$$n = \frac{f}{3a} \cdot 60 \frac{\text{U}}{\text{min}} = \frac{50 \cdot 60}{3 \cdot 8} = 125 \frac{\text{U}}{\text{min}}$$

26. Die Drehzahl eines Synchronmotors ist $n = \frac{f \cdot 60}{p} \left[\frac{\text{U}}{\text{min}} \right]$, wobei p seine Polpaarzahl ist.

n ist also direkt proportional f , so daß das Verhältnis n/f bei Schwankungen von f konstant bleibt.

27. Als Träger negativer Ladung werden sie vom positiven Anodenblech angezogen und so beschleunigt, daß ein Teil infolge der erlangten kinetischen Energie durch die Öffnung im Anodenblech zum Schirm weiterfliegt.
28. Die kalte Katode wird nicht von außen geheizt, die Elektronen entstehen infolge der Ionisierung der stark verdünnten Luft im Entladungsraum. Bei der von außen elektrisch geheizten Glühkatode treten freie Leitungselektronen aus.
29. Die aus der Glühkatode ausgetretenen Elektronen brauchen nur noch zur Anode beschleunigt zu werden. Die Erzeugung durch Ionisierung der Entladungsstrecke fällt fort, soll hier auch durch ein Hochvakuum vermieden werden.
30. So wie man ein Lichtstrahlenbündel durch Linsen sammeln kann, lassen sich Elektronen in ihrer Bahn durch elektrische und magnetische „Linsen“, die entsprechende Felder erregen, beeinflussen.

31. Zur Konzentrierung des Strahls auf einen hellen punktförmigen Brennfleck auf dem Leuchtschirm.
32. Durch das Zeitplattenpaar, an das eine zeitproportionale Kippspannung gelegt wird.
33. Wenn die Meßfrequenz gleich der Kippfrequenz oder ein ganzzahliges Vielfaches dieser ist.
34. $5 \text{ kHz} : 5 = 1 \text{ kHz}$.
35. Es liegt an der Trägheit des Auges. Schwenken Sie eine leuchtende Taschenlampe schnell genug im Kreis herum, so sehen Sie eine vollständige Leuchtspur.
36. Es ist die Strahlablenkung auf dem Leuchtschirm in mm bei 1 V an den Platten.
37. Bei den Null-Durchgängen.
38. Selbsttätige Synchronisierung (erzwungene Kippschwingungen).
39. Wird der Spannungspfad des Reglers unterbrochen, so gibt der Regler den Impuls zur Spannungssteigerung des Generators auf den höchsten Wert, den der Regler erreichen kann. Das kann schwerwiegende Folgen haben. Daher soll der Stromkreis nicht versehentlich unterbrochen werden können, auch nicht durch eine Sicherung.
40. Während der Magnetisierungsstrom J_μ senkrecht zu E_1 ein Blindstrom ist, liegt die Wirkkomponente J_h in Richtung von E_1 und bildet mit der Spannung eine Wirkleistung zur Deckung der Eisenverluste.
41. Der Spannungsabfall $J_0 \cdot X_{1\delta}$ eilt als erzeugte Spannung dem Strom J_0 um 90° nach. Da diese Spannung, um sie aufzuheben, in gleicher Größe vom Netz geliefert werden muß, ist der Vektor um 180° zu drehen.
42. Für eine Spannungsmessung allein ist der Fehlwinkel unerheblich, nicht aber für die Leistungsmessung, da es dabei auf den genauen Winkel zwischen U_1 und J_1 ankommt.
43. Beim Spannungswandler liegt zwischen Spulenanfang und -ende das volle Potential Leitung gegen Leitung oder Leitung gegen Erde. Dabei soll bei den vielen dünnfädigen Windungen ein tragbares Verhältnis des Kupfers zur Isolation ohne Glimmen der Luft und mit genügender Wärmeabfuhr erreicht werden.
Dagegen ist der Spannungsabfall längs der Primärwicklung des Stromwandlers gering, und bei den wenigen mit starkem Querschnitt ausgeführten Windungen ist der Anteil der Isolation wesentlich günstiger.

44. Die Leistungsaufnahme der Meßleistung ist $N = J^2 \cdot R$, und diese wird zur Bestimmung der erforderlichen Nennleistung des Stromwandlers dem Verbrauch der Meßgeräte zugezählt. Bei gleichem Leiterquerschnitt und demnach gleichem Widerstand R geht der Leistungsverlust in der Meßleitung bei 1 A auf $1/25$ zurück.
45. Für Relais, die im Gebiet hohen Überstromes genau ansprechen müssen, braucht man einen Kern mit hoher Überstromziffer, für Instrumente dagegen einen mit niedriger Überstromziffer.
46. Zu Zeiten schwacher Belastung kann der Primärstrom auf $1/10$ des Wandler-Nennstromes und darunter gehen, wobei die Wandlerfehler größer werden als bei dem passenden Übersetzungsverhältnis. Außerdem sind die Meßfehler der Instrumente größer, wenn die Anzeige nicht im letzten Skalendrittel erfolgt.
- Da der Wandler nach VDE dauernd den 1,2fachen Nennstrom unter Einhaltung der Fehlertoleranz verträgt, ist hiermit eine Reserve gegeben.

47. Leistungsaufnahme der Leitung $N = \frac{0,0175 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} 60 \text{ m} \cdot (25 \text{ A})^2}{1,5 \text{ mm}^2} = 17,5 \text{ W}$,
 zuzüglich 3,8 VA für das Instrument ergibt 21,3 VA.

Formel Nr.	Formelzusammenstellung	Seite
1	Schreibgeschwindigkeit $v_{\min} = \frac{4_s}{f} = 4 \cdot s \cdot f$	11
2	Kondensatorspannung $u_C = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right)$	49
3	Spannungsfehler $u_R = 100 \frac{U_2 \cdot K_n - U_1}{U_1}$	58
4	Stromfehler $i_R = 100 \frac{J_2 \cdot K_n - J_1}{J_1}$	71

QUELLENVERZEICHNIS DER BILDER

Weickert, *Hochspannungsanlagen*, 8. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig,
1952: Bild 30, 47, 48, 49, 50, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 76, 77, 79

Varduhn-Nell, *Handbuch der Elektrotechnik*, Band II, 2. Auflage, Fachbuch-
verlag Leipzig 1951: Bild 1, 54, 75

ATM München:

Bild 4, 5, 12, 14, 17, 22, 24, 25, 33, 46, 52, 66

RFT:

Bild 34

Röntgen- und Transformatorenwerk Dresden:

Bild 53, 78

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorwort .	3
Teil III: Schreibende Meßgeräte	
1. Kapitel: Schreibverfahren	
1 Tinte und Feder	5
2 Punktierung durch Fallbügel .	7
3 Mehrfarbenschreiber . . .	8
4 Fotografische Aufzeichnung	10
5 Ritzen	14
6 Aufzeichnung durch Funken .	16
2. Kapitel: Schreibfläche, Antrieb, Zeigerführung	
7 Anordnung und Form der Schreibfläche .	18
8 Antriebsarten für den Papiervorschub	22
9 Führung des Schreiborgans	26
Teil IV: Momentanwert-Messer	
1. Kapitel: Schleifen-Oszillographen	31
2. Kapitel: Katodenstrahl-Oszillograph	41
Teil V: Meßwandler	
1. Kapitel: Allgemeines	
10 Prinzip und Anwendung .	53
11 Schaltregeln	54
2. Kapitel: Spannungswandler (VDE 0414)	
12 Diagramm und Fehlergrößen	56
13 Begriffserklärungen und Güteklassen nach VDE .	58
14 Bauformen	59
a) Allgemeines, Unterscheidung nach Anschlußweise	59
b) Topfspannungswandler mit Öl- oder Masse-	
isolation	60
c) Trockenspannungswandler	60
d) Stützerspannungswandler	63
e) Kaskadenspannungswandler	63
f) Umschaltbare Spannungswandler	64
15 Schaltungen für Drehstrom	65
3. Kapitel: Stromwandler	
16 Diagramm und Fehlergrößen	69
17 Begriffserklärungen und Güteklassen nach VDE 0414	71

18 Bauformen	74
a) Allgemeines	74
b) Stab-, Schienen-, Kabel- und Anlegerstromwandler	75
c) Schleifenstromwandler	76
d) Topfstromwandler	77
e) Stützerstromwandler	79
f) Querlochstromwandler	80
g) Kaskadenstromwandler	81
h) Kombinierte Strom- und Spannungswandler .	81
i) Gleichstrommeßwandler	82
Antworten und Lösungen .	85
Formelzusammenstellung .	89
Quellenverzeichnis der Bilder	90

INGENIEUR
FERNSTUDIUM

5016-04/60

S C H R Ö D E R

**MESSTECHNIK
FÜR
ELEKTROTECHNIKER**

4

H E R A U S G E B E R
ZENTRALABTEILUNG FACHSCHULFERN-
UND ABENDSTUDIUM DES
MASCHINENBAUES DRESDEN

Herausgeber:
Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues Dresden

Meßtechnik für Elektrotechniker

Lehrbrief 4

4. Auflage

von

Dipl.-Ing. Walter Schröder

1960

Zentralabteilung Fachschulfern- und -abendstudium
des Maschinenbaues, Dresden

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

Seite

Tell VI: Zähler

1. Kapitel: Grundsätzliches: Unterscheidung: Wh-, Ah- und Zeltzähler	3
2. Kapitel: Gleichstromzähler	7
1 Motor-Wattstundenzähler	7
a) Aufbau und Schaltung	7
b) Fehlergrößen und Mittel zu ihrer Kompensation	11
2 Magnet-Motorzähler	19
a) Aufbau und Schaltung	19
b) Fehlergrößen	22
3 Elektrolytische Zähler	24
a) Quecksilber-Elektrolytzähler	24
b) Wasserstoff-Elektrolytzähler	26
3. Kapitel: Wechselstromzähler	28
4 Induktionszähler für Einphasenstrom	28
a) Aufbau und Wirkungsweise	28
b) Fehlergrößen und Mittel zu ihrer Kompensation	34
5 Induktionszähler für Drehstrom	38
a) Meßprinzip der Drehstromarbeit	38
b) Aufbau und Schaltung der Zähler mit zwei und drei Meßwerken	39
c) Blindverbrauch-Zähler (BV-Zähler)	41
d) Scheinverbrauch-Zähler (SV-Zähler)	46
6 Sonderbauarten	48
a) Zähler mit Rücklaufhemmung	49
b) Maximumzähler, -schreiber und -drucker	51
c) Münzzähler	55
d) Pendelzähler	56

Tell VII: Widerstände als Zubehör

1. Kapitel: Ohmsche Widerstände	58
7 Normale	60
8 Veränderliche Präzisionswiderstände	63
9 Hochohmwiderstände	65
10 Eisen-Wasserstoff-Widerstand	67
2. Kapitel: Induktive Widerstände	70
11 Normale	70
12 Regelbare Induktivitäten	71
13 Spulen für Hochfrequenz	72
3. Kapitel: Kapazitive Widerstände (Kondensatoren)	75
14 Konstante und regelbare Normale	75
15 Hochfrequenz-Kondensatoren	77
16 Meßkondensatoren für Hochspannung	79
Antworten und Lösungen	83
Formelzusammenstellung	87
Quellenverzeichnis der Bilder	88

Teil VI: Zähler

1. Kapitel: Grundsätzliches. Unterscheidung: Wh-, Ah- und Zeitzähler

Der Begriff Zähler kennzeichnet ein Meßgerät, das eine Meßgröße M über die Zeit integriert und den Zahlenwert dieses Integrals $\int M \cdot dt$ laufend angibt. Ein reiner Messer zeigt dagegen nur den augenblicklichen Wert der Meßgröße an. Der Zeiger eines Gasmengen-Messers z. B. zeigt auf einer Skala die bei der Ablesung durchfließende Menge in m^3/s an, während der Gaszähler, fälschlich häufig Gasuhr genannt, laufend die Multiplikation m^3/s mal s ausführt und durch das Zählwerk die Summe der durchgegangenen m^3 zwischen zwei Ablesungen angibt.

So multipliziert auch der Elektrizitätszähler (nachfolgend kurz Zähler genannt) die Meßgröße mit der Zeit und bildet die Summe aus Produkten mit unendlich kleinen Zeitspannen dt . Aus der Meßgröße Leistung $[W]$ wird durch die Multiplikation mit der Zeit $[h]$ die Arbeit $[Wh]$ oder $[kWh]$

bei Gleichstrom $A = \int_{t_1}^{t_2} U \cdot I \cdot dt [Wh] \text{ oder } [kWh], \text{ und}$

bei Wechselstrom $A = \int_{t_1}^{t_2} U \cdot I \cos \varphi \cdot dt [Wh] \text{ oder } [kWh].$

Sie messen mit diesen *Wh- oder kWh-Zählern* die zwischen den Ablesezeitpunkten t_1 und t_2 verbrauchte Wirkarbeit, wobei U und I veränderlich sein können. Das bedeutet, daß der Zähler wattmetrisch messen muß, also einen Spannungs- und einen Strompfad hat.

Dasselbe gilt bei Wechselstrom für die Zählung der Blindarbeit

$$\int_{t_1}^{t_2} U \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot dt \text{ in BkVAh oder kVarh.}^1$$

¹ Für die induktive und kapazitive Blindleistung sind gebräuchliche Einheiten BVA und BkVA oder Var und kVar (Kilovoltampere reaktiv).

Wenn ein Zähler nur den Strom laufend mit der Zeit multipliziert, dann zählt er die verbrauchten Ah, also die Elektrizitätsmenge, zwischen zwei Ablesungen. Da die Spannung nicht gemessen wird, hat dieser Zähler nur einen Strompfad. Der *Amperestunden-Zähler* wird nur für Gleichstrom ausgeführt und kann in kWh geeicht werden, sofern die Spannung an der Meßstelle als konstant angenommen werden kann. U tritt dann als Konstante vor das Integral $A = U \cdot \int_{t_1}^{t_2} I \cdot dt$.

Eine Uhr ist ein Zeitmesser. Wird aber durch ein Zählwerk das $\int dt$ gebildet, dann ist das Gerät ein *Zeitähler*. Beim elektrischen Zeitähler für Wechselstrom treibt ein Ferraris-Triebwerk oder ein Synchronmotor das Zählwerk an, das die zwischen zwei Ablesungen verstrichene Zeit in Stunden angibt.

Hauptsächlich dienen Zähler zur Verrechnung der elektrischen Arbeit, jedoch wird das Zählermeßwerk auch für andere Messungen gebraucht, z. B. zur Zählung von Wärmemengen nach Umformung in den elektrischen Wert, zur Fernübertragung von Meßwerten nach dem Impulsfrequenzsystem, als Motor zum selbsttätigen Abgleich bei Meßbrücken usw.

Wie bei jedem Meßgerät steigt der Wert eines Zählers mit seiner Meßgenauigkeit. Bei Verrechnungszählern bedeuten Meßfehler Geldbeträge, die der Käufer elektrischer Arbeit zuviel oder zuwenig bezahlt. So wie der Staat für den Verkauf von Waren geeichte Gewichte und Maße vorschreibt, sind auch für den Verkauf elektrischer Arbeit eichfähige, d. h. beglaubigungsfähige und amtlich geprüfte Zähler und Meßwandler gesetzlich vorgeschrieben.

Neben Genauigkeit wird Betriebssicherheit vom Zähler gefordert. Es wäre falsch, die erste Forderung auf Kosten der zweiten hochzutreiben, wenn man etwa die Konstruktion verfeinert, um die Reibung als Fehlerquelle noch mehr herabzusetzen, wenn jedoch dadurch der Zähler zu empfindlich gegen Erschütterungen wird. Besonders wichtig ist die Beachtung der Isolationsfestigkeit, der thermischen und dynamischen Sicherheit. Ferner ist ein niedriger Preis anzustreben, denn jeder Abnehmer braucht einen Zähler, und die Kosten für die Gesamtanzahl eines Versorgungs-

gebiets machen einen erheblichen Kapitaleinsatz für die unproduktive Messung aus. Andererseits darf die Billigkeit nicht auf Kosten der Genauigkeit und der Betriebssicherheit erreicht werden, sondern durch wirtschaftliche Massenfertigung. Genauigkeit und Betriebssicherheit sollen jedenfalls den Vorrang vor dem Preis haben. Es gibt nach ordnungsgemäßer Einregelung keinen Zähler ohne Plus- und Minusfehler im ganzen Lastbereich; diese Fehler sollen im Interesse des Lieferers und des Verbrauchers so klein wie möglich sein. Der betriebssichere Zähler ist auf die Dauer der billigere, weil er weniger Unterhaltungskosten erfordert. Denken Sie auch an den Schutz gegen Staub und Feuchtigkeit, gegen mechanische Einwirkung und gegen Diebstahl elektrischer Arbeit!

Der *Zählerfehler* F ist definiert durch die Gleichung

$$F = \frac{A - S}{S} \cdot 100 [\%] = \left(\frac{A}{S} - 1 \right) \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

wobei A der abgelesene Istwert und S der richtige, der Sollwert, ist. F kann positiv oder negativ sein, je nachdem ob A größer bzw. kleiner als S ist. Infolge verschiedener Einflüsse, die Sie bei der Besprechung der Zählerbauarten kennenlernen werden, kann F als Funktion des Laststromes zwischen Plus- und Minuswerten schwanken. Die graphische Darstellung dieser Funktion ist die *Fehlerkurve* (*Lastkurve*), die für bestimmte Werte von Spannung, Temperatur, Frequenz und Leistungsfaktor gilt (Bild 5).

Ein Zählersystem für den Verkauf elektrischer Arbeit muß vom Deutschen Amt für Maß und Gewicht als eichfähig zugelassen sein, was durch das auf dem Leistungsschild eingeschlagene *Systemzeichen* mit der *Systemnummer* kenntlich gemacht ist. In der Eichordnung vom 24. 1. 1942, Teil XV, sind außer den Vorschriften über Aufbau, Werkstoffe, Isolation usw. die *Eichfehlergrenzen* angegeben, die der Zähler bei der Eichung mit verschiedenen Prüfleistungen N einhalten soll.

N_n ist die Nennleistung des Zählers. Bei Zwischenwerten der Prüfleistung N gelten für F die Werte, die sich bei graphischer Darstellung durch geradlinige Verbindung der Werte der Tafel 1 ergeben.

Tafel 1. Eichfehlergrenzen für Gleichstromzähler

Prüfleistung N	0,05 N_n	0,1 N_n	0,5 N_n	1,0 N_n	1,25 N_n
Fehlergrenze $\pm F$ [%]	9	6	3	3	4

Für Wechsel- und Drehstromzähler gibt die Eichordnung zwei Formeln zur Berechnung der zulässigen Eichfehlergrenzen. Die folgende Formel

$$\pm F = 3 + 0,05 \cdot \frac{N_n}{N} + 0,5 \cdot \left(1 + 0,1 \frac{N_n}{N} \right) \tan \varphi \quad (2)$$

gilt für direkt angeschlossene Zähler sowie für Zähler zum Anschluß über Meßwandler, wenn der Zähler als sogenannter *Meßsatzzähler* mit seinen Wandlern *zusammen* geeicht wird.

Hingegen gilt bei getrennter Eichung von Zähler und Meßwandlern für den Zähler *allein*, der dann als *Meßwandlerzähler* bezeichnet wird:

$$\pm F = 2 + 0,03 \cdot \frac{N_n}{N} + 0,3 \cdot \left(1 + 0,05 \frac{N_n}{N} \right) \tan \varphi \quad (3)$$

Sie sehen, daß diese Fehlergrenzen enger sind, weil die Fehler der Wandler nicht eingeschlossen werden. Man hat Formel (3) so abgestimmt, daß durch die Wandlerfehler die Gesamtfehler nach Formel (2) voraussichtlich nicht überschritten werden. Die zulässigen Eichfehlergrenzen für Meßwandler sind die in Lbf. 3 mitgeteilten Fehlergrenzen nach VDE 0414.

Die Eichfehlergrenzen müssen wie bei Gleichstromzählern für $N = 0,05$ bis $1,25 N_n$ eingehalten werden, und zwar bei $\cos \varphi = 0,5 \dots 1$ für Wechselstrom-, $\cos \varphi = 0,2 \dots 1$ für Drehstrom-Wirkverbrauch-Zähler. Die Formeln gelten auch für Blindverbrauch-Zähler, wobei für N und N_n die Blindleistungen und $\cot \varphi$ an Stelle $\tan \varphi$ einzusetzen sind für $\cos \varphi \leq 0,98$.

Die bei der Eichung neuer Zähler ermittelten Fehler werden mit der Zeit im Betrieb durch Abnutzung reibender Teile und Magnet-Alterung größer. Die höchstzulässige Verschlechterung ist durch die *Verkehrsfehlergrenzen*

festgelegt, die bei Meßwandlern gleich den Eichfehlergrenzen, bei Zählern doppelt so groß sind. Werden sie überschritten, so hat der Stromlieferer die Meßgeräte instand zu setzen und nachzueichen.

2. Kapitel: Gleichstromzähler

[1] Motor-Wattstundenzähler

a) Aufbau und Schaltung

Aus der schematischen Darstellung (Bild 1) sehen Sie, daß der Zähler ähnlich einem Nebenschlußmotor geschaltet ist, jedoch liegt der eisenlose

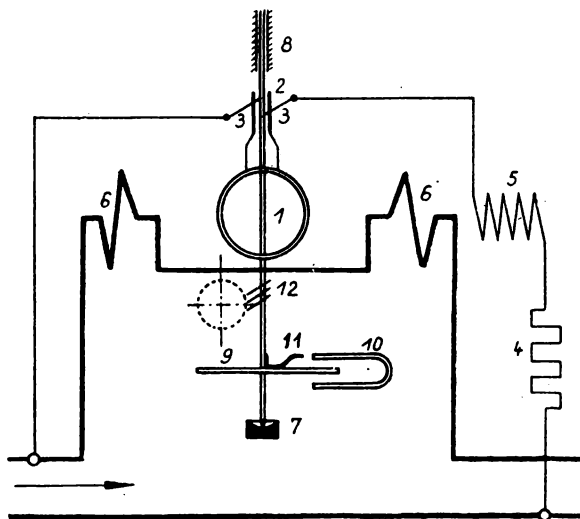


Bild 1. Schema der elektrodynamischen Zähler

Anker 1 mit seinem Stromwender 2 und den Bürsten 3 in Reihe mit dem Vorwiderstand 4 und einer Hilfsspule 5 an der Netzspannung, während die ebenfalls eisenlosen Feldspulen 6 ein Feld erzeugen, das dem Verbraucherstrom proportional ist.

Sie haben also hier das eisenlose elektrodynamische Meßwerk des Leistungsmessers; aber statt des begrenzten Zeigerausschlags beim an-

zeigenden Leistungsmesser wird durch den Stromwender mit Bürsten der dauernde Umlauf des Ankers bewirkt. Das Meßwerk wird daher auch als *elektrodynamischer Zähler* bezeichnet.

Die Verwendung von Eisen im magnetischen Kreis würde zwar ein höheres Drehmoment ergeben, aber die Einflüsse durch die Magnetisierungskurve und durch die Remanenz des Eisens würden die Genauigkeit vermindern. Sie können sich sicher denken, warum der Anker der Spannungs- und nicht der Strompfad ist. Selbstverständlich muß der Ankerstrom mit Rücksicht auf den kleinen Stromwender und die schwachen Bürsten klein sein, denn das hier auftretende Reibungsmoment wird durch einen kleinen Durchmesser des Stromwenders und durch niedrigen Bürstendruck so gering wie möglich gehalten. Der Ankerstrom beträgt daher nur etwa 15 mA, um Funkenbildung und Abnutzung zu vermeiden bzw. klein zu halten. Stromwender und Bürsten sind aus Edelmetall gefertigt, um veränderliche Übergangswiderstände infolge Oxydation auszuschließen. Der Ankerstrom muß außerdem wegen des dauernden Leistungsverbrauchs, der im Spannungspfad auch bei Stillstand des Zählers vorhanden ist, klein gehalten werden. Sie können mit etwa 1,5 W je 100 V Netzspannung rechnen.

Dabei ist der Spannungsabfall am Anker selbst nur etwa 10 V mit Rücksicht auf funkenfreie Kommutierung. Der größte Teil der Netzspannung liegt am Vorwiderstand 4, zu dem auch die Hilfsspule 5 gehört. Diese Hilfsspule erzeugt mit dem Ankerstrom ein konstantes zusätzliches Drehmoment zum Ausgleich der Reibung.

Bei kleinen und mittleren Stromstärken fließt der gesamte Verbraucherstrom durch die Feldspulen 6; für größere Stromstärken, etwa über 200 A, verwendet man einen Nebenwiderstand für 0,1 · · · 0,2 V Spannungsabfall.

Die stets senkrecht stehende Ankerwelle wird vom Unterlager 7 gestützt, das das Gesamtgewicht des Läufers (100 · · · 180 g) zu tragen hat und daher für den einwandfreien Lauf besonders wichtig ist. In der Regel ist in das Wellenende eine hochglanzpolierte Stahlkugel von 0,8 mm \varnothing eingesetzt, die in einer Steinpfanne (synthetischer Saphyr) auf einem Ölfilm läuft. Das Lager ist zum Auffangen von Stößen gefedert. Das Oberlager ist ein Nadelhalslager, das nur zur Führung dient.

Sie wissen, daß beim anzeigenden Leistungsmesser das elektrodynamisch erzeugte Drehmoment durch das Spannen der Spiralfeder gemessen wird. Beim Zähler muß der rotierende Anker durch Bremsung belastet werden, was durch die bekannte Wirbelstrombremsung geschieht. Die Aluminiumscheibe 9 läuft im Feld des Dauermagnets 10. Sie sehen die Einzelteile des Zählers in Bild 2. Wenn das treibende und das bremsende Dreh-

moment gleich groß sind, ist die Drehzahl konstant und ein Maß für die elektrische Leistung, die der Verbraucher aufnimmt. Eine eiserne Hemmfahne an der Welle 11 in Bild 1 wird vom Magnet angezogen und verhindert Leerlauf bei

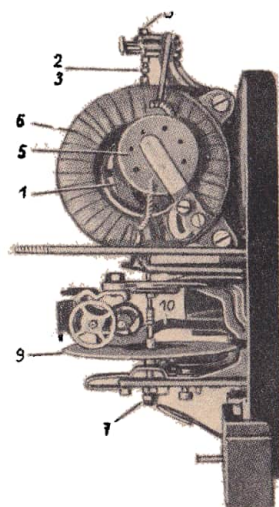


Bild 2.
Elektrodynamischer Wh-Zähler

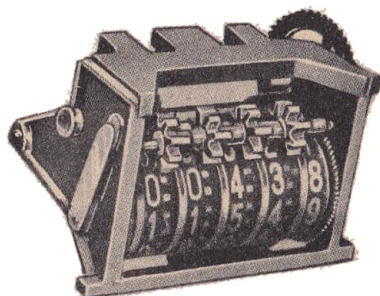


Bild 3. Rollenzählwerk

stromlosen Stromspulen. Eine Schnecke 12 (Bild 1) auf der Welle überträgt die Drehung über ein Zahnradgetriebe auf das Zählwerk, das überwiegend als Rollenzählwerk (Bild 3) ausgeführt wird. In Amerika herrscht das Zeigerzählwerk mit je einem Zeiger für die Einer, Zehner, Hunderter usw. vor, wie Sie es bei den Wasserzählern sehen.

Das Eisenblech oberhalb der Bremsscheibe soll den Triebfluß und den Bremsfluß gegenseitig abschirmen.

Nun soll der Beweis erbracht werden, daß das Zählerwerk die bezogene Arbeit angibt. Nach dem Prinzip des elektrodynamischen Leistungsmessers entwickelt der Anker ein Drehmoment, das dem Produkt aus

dem Ankerstrom (der Spannung U proportional) und dem Verbraucherstrom I in den Feldspulen und der Konstruktions-Konstanten c_1 gleich ist:

$$\text{Triebmoment } M_T = c_1 \cdot U \cdot I = c_1 \cdot N \text{ [gcm]} \quad (4)$$

Die Al-Scheibe bildet mit dem Dauermagnet einen elektrischen Generator (Bild 4). In den Teilen der in Pfeilrichtung rotierenden Scheibe, die von dem magnetischen Fluß Φ durchsetzt sind, werden radial gerichtete EMK

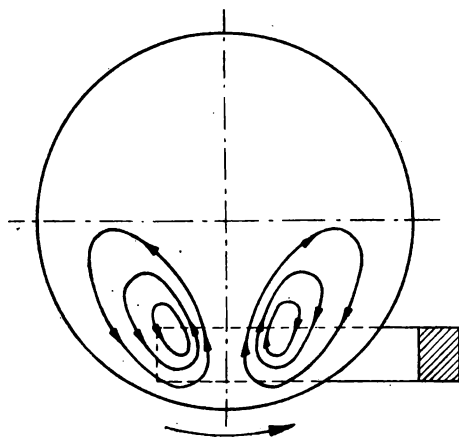


Bild 4

Induzierte Ströme in der Bremsscheibe

induziert. Nehmen Sie an, daß Φ von oben nach unten durch die Scheibe geht, dann wird etwa das gezeichnete Bild der Stromlinien in der Scheibe entstehen. Dieser Strom I ist proportional dem Fluß Φ und der Drehzahl n sowie dem Leitwert der Strombahn, der in dem Faktor c_2 enthalten ist:

$$\text{Wirbelstrom } I = c_2 \cdot \Phi \cdot n \text{ [A]} \quad (5)$$

Da das bremsende Moment proportional $I \cdot \Phi$ ist, d. h.

$$\text{Bremsmoment } M_B = c_3 \cdot I \cdot \Phi \text{ [gcm]}$$

wird mit I aus Formel (5)

$$M_B = c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi^2 \cdot n \text{ [gcm]} \quad (6)$$

und solange der Magnetfluß konstant bleibt, ist das

$$\text{Bremsmoment } M_B = c_4 \cdot n \text{ [gcm]} \quad (6a)$$

Das Bremsmoment steigt also mit der Drehzahl an. Schalten Sie den Verbraucherstrom ein, so wird der Läufer bis zu einer Drehzahl beschleunigt, bei der das Triebmoment M_T gleich dem Bremsmoment M_B ist. Demnach ist Gleichung (4) gleich Gleichung (6a), wenn wir die Reibung zunächst vernachlässigen:

$$c_1 \cdot N = c_4 \cdot n \quad \text{oder} \quad \boxed{\text{Drehzahl } n = C \cdot N \text{ [1/min]}} \quad (7)$$

Die Drehzahl, also die Winkelgeschwindigkeit des Läufers, oder auch die Geschwindigkeit eines Punktes der Scheibe sind ein Maß für die Leistung.

Der Weg des Scheibenpunktes in der Zeit t ist somit ein Maß für die Arbeit, denn Weg ist Geschwindigkeit mal Zeit, und Arbeit ist Leistung mal Zeit. Multiplizieren Sie also (7) mit t , so ergibt sich

$$n \cdot t = C \cdot N \cdot t = C \cdot A$$

und daraus

$$\boxed{A = \frac{n \cdot t}{C} = \frac{z}{C} \text{ [kWh]}} \quad (8)$$

Die Zählerkonstante C ist auf dem Leistungsschild eingeschlagen. Sie gibt die Zahl z der Ankerumdrehungen für eine kWh an. Das Zählwerk addiert die Umdrehungen, und die Getriebeuntersetzung ist so gewählt, daß die Ziffern die verbrauchte Arbeit direkt in kWh angeben.

b) Fehlergrößen und Mittel zu ihrer Kompensation

Zu der *Lager-, Bürsten- und Zählwerksreibung*, die als praktisch konstant im Drehzahlbereich angenommen werden kann, kommt die *Luftreibung*, die stärker als proportional mit der Drehzahl zunimmt.

Betrachten Sie zunächst den konstanten Reibungsanteil. Sein bremsendes Moment wirkt so, als ob das Triebmoment um diesen Betrag kleiner wäre. Durch die in Reihe mit dem Anker geschaltete Hilfsfeldspule 5 in Bild 1 wird bei konstanter Klemmenspannung ein konstantes Zusatz-Triebmoment erzeugt, das den Fehlbetrag gerade aufhebt. Die Hilfsspule ist ein Teil des Vorwiderstandes, so daß kein zusätzlicher Verlust entsteht. Sie ist verstellbar; damit wirkt sie je nach ihrer Lage zum Anker stärker oder schwächer. Der passende Wert wird bei der Einregelung gefunden.

Wenn nun das durch die Luftreibung erzeugte Bremsmoment geradlinig mit der Drehzahl ansteigen würde, könnten Sie es durch eine gleich große

Schwächung der vom Dauermagnet hervorgerufenen Bremsung genau ausgleichen, denn dieses Bremsmoment steigt nach (6a) linear an. Tatsächlich sucht man auch durch eine geringe Bremsmagnet-Verstellung im Sinne der Schwächung von M_B die Luftreibung auszugleichen. Das gelingt nicht vollständig, weil die Luftreibung etwas stärker als die Drehzahl ansteigt.

Das Zusatz-Drehmoment durch das Feld der Hilfsspule könnte Leerlauf des Zählers verursachen, also Ankerdrehung ohne Verbraucherstrom. Das könnte bei Erschütterungen der Zählerwelle eintreten, mit Sicherheit bei Überspannungen, denn mit steigender Netzspannung steigt der Strom sowohl im Anker als auch in der Hilfsspule und dadurch das Hilfsdrehmoment proportional ΔI^2 !

Den Leerlauf verhindert die aus einem Eisendrättchen bestehende Hemmfahne, die vom Streufeld des Bremsmagnets angezogen wird. Bei der Einregelung wird der Spannungspfad an die 1,2fache Nennspannung gelegt, während der Strompfad stromlos ist. Nun biegt man die Hemmfahne so, daß sie vom Magnet gerade noch zurückgezogen wird, wenn man sie in Drehrichtung etwas vom Magnet entfernt, wobei der Zähler durch Anklopfen erschüttert wird. Sie werden einwenden, daß die Hemmfahne den Anlauf des Zählers erschwert. Das ist richtig. Der Verbraucherstrom muß erst einen wenn auch sehr kleinen Bruchteil des Nennstromes erreichen, ehe die Drehung des Läufers beginnt. Dann aber bringt die Hemmfahne im Mittel keine zusätzliche Bremsung, denn sie bremst zwar kurzzeitig in Richtung vom Magnet weg, treibt aber, wenn sie sich nach einer Umdrehung der Scheibe dem Magnet nähert.

Der *Temperatureinfluß* äußert sich in der Widerstandsänderung der Strombahnen. Wie bei jedem elektrischen Gerät ist die Endtemperatur durch das Gleichgewicht zwischen zugeführter Wärme und der von der Oberfläche des Zählers abgeführten Wärme bedingt. Dieser stationäre Zustand wird erst nach einer gewissen Zeit erreicht, die von der Belastung und von der Außentemperatur abhängt. Die Einregelung und Eichung darf daher erst bei der Endtemperatur nach etwa $\frac{1}{2}$ - bis 1stündiger Einschaltung vorgenommen werden.

Überlegen Sie, welchen Einfluß eine Erwärmung aller Wicklungen um 10°C hat, die durch eine entsprechende Steigerung der Außentemperatur

entstanden sein möge! Nehmen Sie zunächst an, daß der Fluß Φ des Bremsmagnets konstant bleibt und daß der gesamte Spannungspfad aus Cu besteht.

Da der Temperaturkoeffizient von Al und Cu rund $+0,004$ je $^{\circ}\text{C}$ ist, also die Widerstandszunahme der Scheibe und der Cu-Wirkung $0,4\%$ je $^{\circ}\text{C}$ und 4% je 10°C , so werden die Ströme in der Scheibe und im Spannungspfad um 4% kleiner. Demnach würden sowohl das Bremsmoment als auch das Triebmoment um 4% abnehmen, da $M \sim I \cdot \Phi$ und die Drehzahl würde konstant bleiben, wenn die Voraussetzung der konstanten Flüsse zutrifft. Nun wissen Sie aber, daß der Magnet — abhängig vom Werkstoff und von der Gestalt — mit steigender Temperatur schwächer wird und daß das Bremsmoment nach (6) Φ^2 proportional ist. M_B nimmt also mehr ab als M_T .

Das gleicht man dadurch aus, daß der Vorwiderstand zum Anker aus Nickel gewickelt wird, das eine Widerstandszunahme von rund 6% je 10°C hat. Bei passender Bemessung des Ni-Widerstandes, wobei u. U. ein Teil des Vorwiderstandes aus Konstantan hergestellt wird, nimmt der Widerstand des Spannungspfades um soviel mehr zu, daß die Abnahme des M_T nahezu gleich der des M_B wird. Selbstverständlich wirkt der Ausgleich auch beim Sinken der Außentemperatur, wenn der Widerstand abnimmt. Wenn Sie daran denken, daß auch das von der Hilfsspule erzeugte Zusatz-Drehmoment dem Temperatureinfluß unterliegt, so wird Ihnen klar, daß der Ausgleich nicht vollständig sein kann. Bei einer Temperatur, die höher ist als die Eichtemperatur, ist der konstante Reibungsanteil zuwenig kompensiert, bei Untertemperatur zuviel. Da das konstante Reibungsmoment im Verhältnis zum Nenntriebmoment gering ist, ist der Fehler erst bei sehr kleinen Lasten bemerkbar.

Bei dem Zähler mit Nebenwiderstand für den Strompfad ist bei konstantem Belastungsstrom der Spannungsabfall am Nebenwiderstand auch bei einer Temperaturänderung konstant, weil dieser Widerstand temperaturunabhängig ist; aber der Strom in den Feldspulen wird wegen der Widerstandszunahme durch die Erwärmung kleiner, ist also nicht mehr der Bruchteil des Laststromes bei der Eichtemperatur. Infolgedessen braucht man bei diesem Zähler das Triebmoment nicht durch den Nickelvorwider-

stand zu verkleinern, sondern der ganze Vorwiderstand wird aus Konstantan hergestellt.

Der Einfluß anomaler Spannung. Ist die Netzspannung höher als die Nennspannung, für die der Zähler geeicht ist, so müßte der Ankerstrom verhältnismäßig steigen, damit die Gleichung $M = c_1 \cdot U \cdot I$ stimmt. Das ist wegen der Erwärmung des Ankerkupfers und des Nickelwiderstandes nicht der Fall. Der Ankerstrom ist dadurch relativ zur Spannung zu klein, und die Erwärmung von Scheibe und Magnet durch Leitung und Strahlung gleicht die Minderanzeige nicht aus. Zwar wird durch den größeren Strom im Anker und in der Hilfsspule das Zusatz-Drehmoment für den Reibungsausgleich verstärkt. Da diese Steigerung aber verhältnismäßig gering ist, hat der Zähler dennoch Minusfehler im größten Teil des Lastbereiches. Lediglich bei sehr kleiner Last bewirkt das erhöhte Hilfsmoment Plusfehler (Bild 5, Kurve F_2).

Bei Unterspannung sind die Verhältnisse umgekehrt. Der Zähler hat überwiegend Plusfehler und bei kleiner Last Minusfehler.

Sehen Sie diese Überlegungen nicht als überflüssige Theorie an in der Meinung, daß große Spannungsschwankungen nicht vorkommen. Es gibt viele elektrische Anlagen, die mit in weiten Grenzen veränderlicher Gleichspannung betrieben werden. Sie kennen vermutlich die Leonard-Schaltung für Schiffsantriebe, Walzenstraßen, elektrische Triebwagen, Werkzeugmaschinen u. a. zur Einstellung der Drehzahl mittels der Arbeitsspannung, die im Verhältnis 1:10 veränderlich sein kann. Wollen Sie im Gleichstromkreis mit einem normalen Zähler messen, so müssen Sie mit beachtlichen Fehlern rechnen. Ein Zähler mit Nebenviderstand und daher mit temperaturunabhängigem Anker-Vorwiderstand ist hier günstiger, weil die Temperaturänderung des Ankerkupfers dann bei veränderlicher Spannung keinen so starken Einfluß hat. Da die Hilfsspule bei den unteren Spannungen kaum noch wirkt, läßt man sie häufig fort und macht dafür das Triebmoment stärker.

Bild 5 zeigt die Fehlerkurven eines normalen elektrodynamischen Zählers zwischen 10 und 100% des Belastungsstromes bei konstanter Temperatur (Eichtemperatur). Sie sehen die Korrektur der Reibung durch die Hilfsspule, und zwar bei der Nennspannung und bei einer Spannungssteigerung von 20%.

Der *Einfluß eines äußeren Magnetfeldes* ist stark, da das *Eigenfeld* nicht eisengeschlossen ist. Bei schwacher Last verursacht schon das Erdfeld mit 0,2 G merkbare Zusatzfehler, wenn es mehr oder weniger die Richtung des Spulenfeldes hat, das mit etwa 130 ··· 150 G bei Nennstrom anzunehmen ist. Können Sie den Zähler so montieren, daß das Erdfeld senkrecht auf dem Stromfeld steht, dann entfällt dieser Einfluß. Auch das

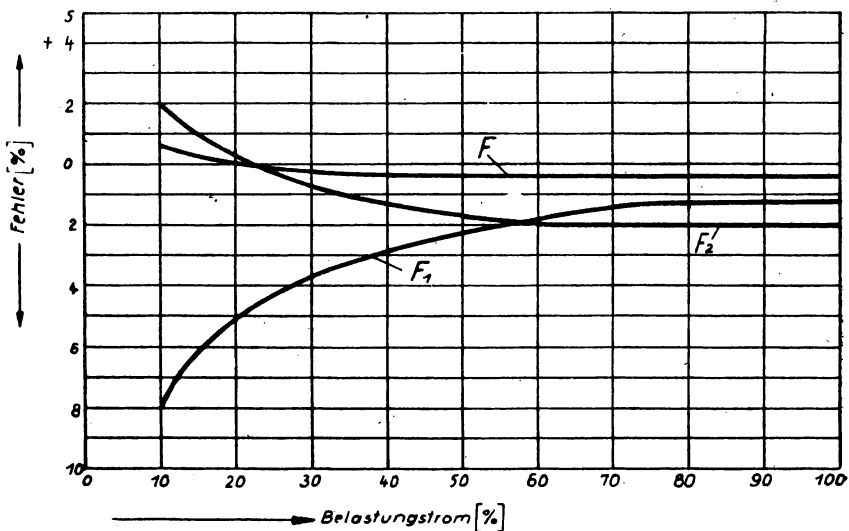


Bild 5. Fehlerkurven: F_1 ohne F mit Hilfsspule bei Nennspannung, F_2 mit Hilfsspule bei 1,2 · Nennspannung

Feld benachbarter Stromleiter und der Magnetismus von Eisenteilen sowie die Streuung benachbarter Meßgeräte sind zu beachten. Es gelten dieselben Grundsätze, die bei den anzeigenden elektrodynamischen Meßgeräten besprochen wurden. Man hat daher auch astatische Zähler mit Doppelmeßwerk entwickelt (nach der Ihnen bekannten Art geschaltet). Besser ist jedoch eine wirksame magnetische Abschirmung.

Wie schalten Sie den Zähler für ein Dreileiter-Netz?

Natürlich kommt eine Stromspule in den einen Außenleiter und die zweite in den anderen. Aber welche Spannung soll gemessen werden? Bekanntlich

können die Spannungen der beiden Netzhälften verschieden sein. Man müßte daher für eine genaue Messung je einen Spannungspfad für U_1 und U_2 haben, denn die Leistung ist

$$N = U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2$$

Entweder wird aber der Spannungspfad an einen Außen- und den Mittel-
leiter angeschlossen (Bild 6) oder mit entsprechend vergrößertem Vor-

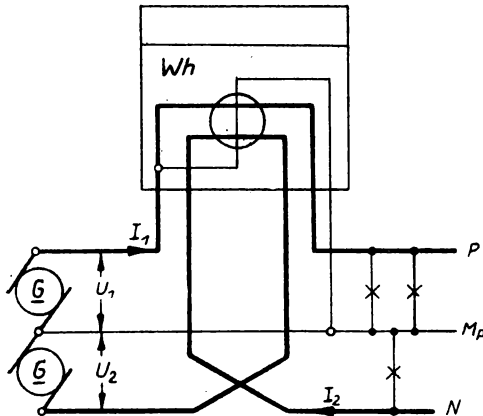


Bild 6. Dreileiter-Zähler

widerstand an die beiden Außenleiter, wobei der Zähler in beiden Fällen für die Nennspannung zwischen den Außenleitern ausgelegt wird.

Ist nun in der gezeichneten Schaltung die Netzhälfte $P-M_p$ mehr belastet, so ist ihr Spannungsabfall größer als der der anderen, $U_1 < U_2$. Der Zähler mißt also zu wenig, da seine Angabe dem Produkt entspricht:

$$2 \cdot U_1 \cdot \frac{I_1 + I_2}{2}$$

$\frac{I_1 + I_2}{2}$ ist der Mittelwert des Stromes in den beiden Stromspulen. Würde bei diesem Belastungsfall der Spannungspfad an U_2 liegen, dann würde der Zähler zuviel anzeigen.

Lehrbeispiel 1

$U_1 = 105 \text{ V}$, $U_2 = 110 \text{ V}$, $I_1 = 8 \text{ A}$, $I_2 = 1 \text{ A}$. Wie groß sind die Fehler, wenn der Spannungspfad an U_1 , an U_2 oder an $U_1 + U_2$ angelegt ist?

Lösung:

Die richtige Gesamtleistung ist $N = 105 \text{ V} \cdot 8 \text{ A} + 110 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$
 $= 840 \text{ W} + 110 \text{ W} = 950 \text{ W}$

Nach Bild 6 mißt der Zähler $N = 2 \cdot 105 \text{ V} : \frac{1}{2} (8 + 1) \text{ A} = 945 \text{ W}$, der Fehler ist $F = - \frac{5 \text{ W}}{950 \text{ W}} \cdot 100 = - \underline{\underline{0,53 \%}}$.

Wird dagegen der Anker an U_2 angeschlossen, so ist die Messung

$$N = 2 \cdot 110 \text{ V} \cdot \frac{1}{2} (8 + 1) \text{ A} = 990 \text{ W},$$

der Fehler ist $F = + \frac{40 \text{ W}}{950 \text{ W}} \cdot 100 = + \underline{\underline{4,2 \%}}$!

Liegt der Spannungspfad an den Außenklemmen, so mißt der Zähler

$$N = 215 \text{ V} \cdot \frac{1}{2} (8 + 1) \text{ A} = 967,5 \text{ W},$$

der Fehler ist $F = + \frac{17,5 \text{ W}}{950 \text{ W}} \cdot 100 = + \underline{\underline{1,84 \%}}$.

Das Beispiel lehrt, daß Sie günstiger fahren, wenn Sie den Zähler für die Außenleiterspannung wählen, weil Sie nicht wissen können, welche Netz-hälfte mehr belastet sein wird. Es kann die eine oder die andere sein. Den doppelten Leistungsverlust des Spannungspfades muß man dabei in Kauf nehmen.

Sie müssen noch wissen, daß der eisenlose elektrodynamische Zähler auch für *Wechselstrom* verwendet wird, allerdings nicht für die normalen konstanten technischen Frequenzen von 50 oder $16\frac{2}{3}$ Hz, für die der wesentlich billigere Induktionszähler geschaffen ist, sondern für sehr kleine Frequenzen und Frequenzänderungen in weiten Grenzen, wie sie z. B. bei Regelsätzen vorkommen. Für diese Verhältnisse läßt sich der Induktionszähler nicht bauen.

Da die Messung des elektrodynamischen Zählers von Frequenzänderungen praktisch unabhängig ist, sind seine Angaben auch richtig, wenn Spannung und Strom wie beim Gleichrichter *Oberwellen* enthalten.

Wie führen Sie eine *Nachprüfung der Zählerfehler* durch?

Sie belasten den Zähler und messen Strom und Spannung mit Instrumenten Klasse 0,2, deren Zeigerausschlag im letzten Skalendrittel liegen soll. Die Spannung müßten Sie nach Bild 1 an den Zählerklemmen messen. Schließen Sie den Spannungsmesser hinter dem Zähler an, falls die Klemmen nicht zugänglich sind, so entsteht ein kleiner Meßfehler, weil diese Spannung um den Spannungsabfall in den Stromspulen kleiner ist.

Sie zählen die vollen Ankerumdrehungen während einiger Minuten und messen mit einer Stoppuhr die Zeit in Sekunden. Ein zweiter Beobachter liest in Zeitintervallen von etwa 15 s U und I ab, errechnet die Mittelwerte und daraus die Leistung in kW. Das Zählerschild gibt den *Soll-Wert*, die Zahl der Ankerumdrehungen je kWh, an. Sie haben z Umdrehungen in t [s] = $t/3600$ [h] gezählt bei der Leistung N [kW], also beträgt der

$$\text{Ist-Wert} = \frac{z}{N \cdot \frac{t}{3600}} \left[\frac{1}{\text{kWh}} \right]$$

Damit erhalten Sie den Fehler $F = \left(\frac{\text{Ist-Wert}}{\text{Soll-Wert}} - 1 \right) \cdot 100$ [%].

Lehrbeispiel 2

Der Soll-Wert ist lt. Zählerschild 3000 1/kWh. Sie haben gemessen $t = 194$ s und $z = 126$ Umdr. Der Mittelwert der Spannung war 112,5 V, der der Stromstärke 7,4 A, der der Leistung $\frac{112,5 \text{ V} \cdot 7,4 \text{ A}}{1000}$ kW. Wie groß ist der Fehler?

Lösung:

$$\text{Ist-Wert} = \frac{126 \cdot 1000 \cdot 3000}{112,5 \cdot 7,4 \cdot 194} = 2820 \text{ 1/kWh}$$

$$\text{Fehler } F = \left(\frac{2820}{3000} - 1 \right) \cdot 100 = (0,94 - 1) \cdot 100 = \underline{\underline{-6\%}}$$

Natürlich gilt der Fehler nur für diese eingestellte Last, für andere Belastungen müßten Sie die Nachprüfung wiederholen.

Zusammenfassung

Der übliche elektrische Zähler integriert die Meßgröße Leistung oder Strom über die Zeit und gibt mit seinem Zählwerk die Summe in kWh bzw. Ah an. Ein Zeitzähler ist ein Motor mit konstanter Drehzahl, der ein in Zeiteinheiten geeichtes Zählwerk antreibt.

Zähler für den Verkauf elektrischer Arbeit unterliegen dem Maß- und Gewichtsgesetz. Bei der Eichung müssen die *Eichfehlergrenzen* eingehalten werden. Wachsen die Fehler im Laufe der Betriebszeit über den doppelten

Betrag, über die *Verkehrsfehlergrenzen*, so sind die Zähler instand zu setzen, neu einzuregeln und nachzueichen.

Als Wh-Zähler für Gleichstrom und in Sonderfällen für Wechselstrom ist der eisenlose elektrodynamische Zähler, der *Motor-Wh-Zähler* gebräuchlich mit einem Drehanker (Spannungspfad) im Feld fester Stromspulen. Dieser Motor wird durch Wirbelstrombremsung belastet; die stationäre Drehzahl ist ein Maß für die Meßleistung.

Fehlerquellen sind:

die Reibung, die durch ein Zusatz-Drehmoment mittels einer Hilfsspule im Spannungspfad und durch Verstellen des Bremsmagnets nahezu ausgeglichen wird;

die Temperaturänderung, nahezu ausgeglichen durch einen temperaturabhängigen Ni-Vorwiderstand im Spannungskreis;

anomale Spannung, die zusätzliche Plus- oder Minusfehler verursacht; *fremde Magnetfelder*, die durch astatische Ausführung oder durch Abschirmung des Systems ausgeschaltet werden können.

Beim Zähler für Dreileiter-Gleichstrom entstehen zusätzliche Fehler dadurch, daß nicht jede Teilspannung der Netzhälften für sich gemessen wird.

Die Feststellung des Zählerfehlers bei einer bestimmten Last, die mit Strom- und Spannungsmesser gemessen wird, geschieht durch Zählen der Ankerumdrehungen während einiger Minuten.

Bei den Einregelungen werden die Umläufe während $60 \cdot \cdot \cdot 100$ s gezählt.

[2] Magnet-Motorzähler

a) Aufbau und Schaltung

Durch die Bezeichnung dieser Bauart wird darauf hingewiesen, daß das fest stehende Feld nicht durch stromdurchflossene Spulen, sondern durch einen oder zwei *Dauermagneten* erzeugt wird. Der Spannungspfad fällt fort; es wird nur der Strom des Verbrauchers gemessen, und zwar wird ein Teilstrom durch den Anker geleitet. Sie haben damit einen Zähler, der nur Ah mißt, denn das Meßwerk ist grundsätzlich ein Strommesser, wie Sie durch Vergleich mit dem Drehspulmeßwerk feststellen. Im Feld

einen Dauermagnets (Bild 7) dreht sich die auf eine Metalltrommel gewickelte Ankerwicklung. Der Strom wird über zwei feine Bürsten aus Edelmetall und einen meist dreiteiligen Stromwender zugeführt.

Bei der zweiten Bauart (Bild 8) ist die Wicklung auf einer Al-Scheibe (Flachwicklung) untergebracht, die zwischen den Polen zweier Dauermagnete läuft. Diese sind rechts und links der Welle so angeordnet, daß

bei dem einen Magnet der Nordpol und beim anderen der Südpol oben ist. Das Ankergewicht soll möglichst niedrig sein. Daher kann die Wicklung nur für kleine Ströme (bis etwa 100mA) im Nebenschluß zum Haupt-

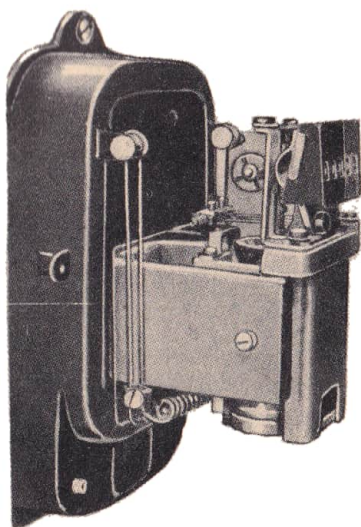


Bild 7
Magnet-Motorzähler mit Trommelanker

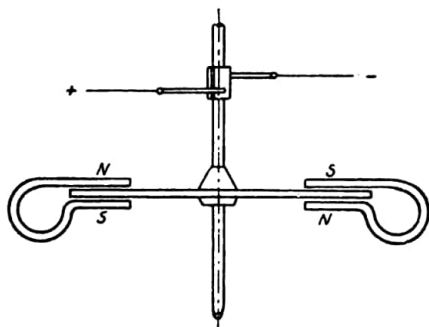


Bild 8. Scheibenanker

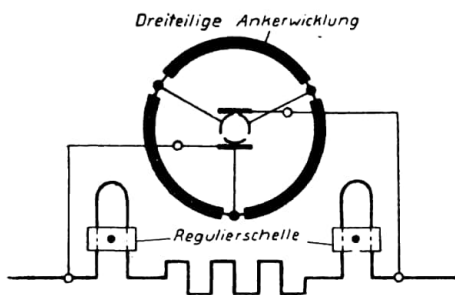


Bild 9. Schaltbild des Magnet-Motorzählers

strom ausgeführt werden (Bild 9). Mit einer oder zwei Regulierschellen wird der richtige Wert des Nebenwiderstandes bei der Einregelung eingestellt. Der Wicklungsträger, Trommel oder Scheibe, dient gleichzeitig zur Wirbelstrombremsung.

Den Nachweis, daß das Zählwerk die bezogenen Ah angibt, können

Sie auf ähnliche Weise wie beim Wh-Zähler führen. Das mittlere Triebmoment während einer Ankerumdrehung ist wie bei jedem Motor dem Produkt aus Ankerstrom I_A und magnetischen Fluß Φ proportional, also ist

$$\boxed{\text{Triebmoment } M_T = c_1 \cdot I_A \cdot \Phi \text{ [gcm]}} \quad (9)$$

Denken Sie übrigens daran, daß I_A wegen der Gegen-EMK des Ankers bei Rotation kleiner ist als bei Stillstand. Sie würden bei festgehaltenem Anker ein größeres Drehmoment messen.

Nach Formel (6a) ist das

$$\text{Bremsmoment } M_B = c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi^2 \cdot n \text{ [gcm]}$$

Bei der stationären Drehzahl sind beide Drehmomente gleich groß, wenn man die Reibung nicht berücksichtigt, also $c_1 \cdot I_A \cdot \Phi = c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi^2 \cdot n$, daraus

$$\text{Drehzahl } n = \frac{c_1 \cdot I_A}{c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi} \text{ [1/min]} \quad (10a)$$

oder

$$\boxed{n = C \cdot I_A \text{ [1/min]}} \quad (10)$$

Die jeweilige Drehzahl ist demnach ein Maß für den Verbraucherstrom I , da I_A als Nebenschlußstrom zu I in einem konstanten Verhältnis steht, und das Zählwerk addiert die Ankerumdrehungen in der Zeitspanne t [min]:

$$\boxed{n \cdot t \triangleq z \text{ [Ankerumdr.] } \triangleq C' \cdot I \cdot t \text{ [Ah]}} \quad (11)$$

Die Zahl der Ankerumdrehungen zwischen zwei Zeitpunkten t_1 und t_2 ist ein Maß für die gelieferte Elektrizitätsmenge $Q = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot dt$, wobei i beliebig veränderlich sein kann. C' ist die auf dem Zähler-schild angegebene Konstante Ankerumdrehungen je Ah, die sich durch die Getriebeübersetzung von der Ankerwelle auf das Zählwerk ergibt, wobei die Umrechnung von Minuten auf Ampere-stunden berücksichtigt wird.

Bei konstanter Netzspannung kann man das Zählwerk in kWh eichen lassen, z. B. mit der Schildaufschrift „12000 Ankerumdr. je kWh bei 220 V“.

b) Fehlergrößen

Die *Lager-, Bürsten-, Zählwerks- und Luftreibung* wirkt auch hier zusätzlich bremsend. Der konstante Reibungsanteil (Lager, Bürsten, Zählwerk) macht sich natürlich besonders bei kleiner Last bemerkbar, d. h., ohne eine Kompensation geht die Fehlerkurve in diesem Bereich stark ins Negative. Sie sehen das daran, daß der Strom erst einen gewissen Wert, den *Anlaufstrom*, erreichen muß ($0,5 \cdot \cdot 1\%$ des Nennstroms), bis das Triebmoment die Widerstände überwinden kann. Selbstverständlich sucht man die Reibung durch einen kleinen Stromwender-Durchmesser und durch eine sorgfältige Fertigung der mechanischen Teile so klein zu machen, wie es technisch und wirtschaftlich möglich ist. Außerdem kann man bei diesem Zähler das Triebmoment stärker machen als beim elektrodynamischen Zähler, weil der Dauermagnet ein starkes Feld liefert, ohne daß dafür Amperewindungen und somit Verluste nötig sind. Je größer das Verhältnis Triebmoment zum Reibungsmoment ist, um so kleiner ist der Einfluß der Reibung.

Es sei noch erwähnt, daß ein *Reibungsausgleich* gelegentlich eingebaut wird, der jedoch eine Komplikation bedeutet. Man kann den Anker zusätzlich über einen großen Widerstand an die Netzspannung legen, so daß dauernd ein schwacher Ankerstrom fließt, der die konstante Reibung gerade ausgleicht. Der Eigenverbrauch steigt dadurch um einige Zehntel Watt, und eine Hemmfahne muß Leerlauf verhüten. Eine andere Möglichkeit ist die Verlegung der Kommutierungszone dadurch, daß die Bürsten durch eine vom Laststrom durchflossene Spule (Bürstenschaukel) längs des Stromwenders geführt werden. Seine Lamellen-Trennfugen weichen von einer bestimmten Stelle von der zur Welle parallelen Richtung ab. Dadurch entsteht eine Drehmomentsteigerung, die den Abfall der Lastkurve bei kleiner Last kompensiert.

Die mit der Drehzahl ansteigende *Luftreibung* wirkt, wie früher erläutert, wie eine verstärkte Wirbelstrombremsung und kann bei der Einregelung annähernd ausgeglichen werden.

Steigende Temperatur erhöht den Widerstand der Ankerwicklung und des Wicklungsträgers; außerdem wird der Magnet schwächer. Daher werden sowohl das Treib- als auch das Bremsmoment kleiner. Das Bremsmoment nimmt aber etwas stärker ab ($c_1 \cdot I_A \cdot \Phi = c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi^2 \cdot n$), so daß der Zähler bei 10° Temperaturzunahme um einige Zehntel Prozent zu schnell läuft.

Die Magnete müssen gut gealtert sein, denn die Schwächung des Flusses Φ ergibt nach Formel (10 a) zu hohe Drehzahl, also Plusfehler. Die Alterung der Magnete erfolgt durchweg künstlich. Fabrikneue oder nachgelassene Magnete werden vorerst bis zur völligen Sättigung magnetisiert, wofür es verschiedene Einrichtungen gibt. Anschließend werden die Magnete in einem Wechselfeld um 10% der Feldstärke geschwächt, was die Möglichkeit von Messungen voraussetzt. Die hierfür benützten Geräte messen nicht absolute Werte in G, sondern ergeben lediglich Vergleichswerte, was ausreichend ist. Es empfiehlt sich, nach der Schwächung die Magnete noch einige Wochen ruhig und insbesondere in Einzelfächern zu lagern.

Klopfen der Magnete mit Werkzeugen und Vorbestreichen von Eisen oder Stahl (Schraubenzieher) am Magnetmaul sind unbedingt wegen der Gefährdung der Konstanz der Feldstärke zu unterlassen.

Gegen *Fremdfelder* ist der Magnet-Motorzähler wenig empfindlich im Gegensatz zum elektrodynamischen Zähler; das Magnetfeld ist stark, und der Anker bewegt sich in einem kleinen Luftspalt.

Bei der *Montage* müssen Sie bei jedem Zähler darauf achten, daß die Ankerwelle senkrecht steht. Schon geringe Abweichungen vergrößern die Reibung im oberen Halslager.

Eine *Nachprüfung der Zählerfehler* geschieht durch Vergleich mit dem Soll-Wert der Ankerumdrehungen je Ah oder je kWh, wie in [1] erläutert wurde.

Zusammenfassung

Beim Magnet-Motorzähler fließt ein Teil des Verbraucherstromes (Nebenwiderstand!) durch den Anker, der als *Trommel-* oder als *Scheibenanker* ausgeführt wird.

Das fest stehende Feld zur Erzeugung des Trieb- und gleichzeitig des Bremsmoments wird beim Trommelanker von einem und beim Scheibenanker von zwei Dauermagneten geliefert.

Da der Zähler nur einen Strompfad hat, zählt er lediglich *Amperestunden*. Für eine als konstant angenommene Netzspannung kann man jedoch die Zählung in kWh erreichen.

Die *Reibung* als zusätzliche Bremsung bewirkt bei kleiner Last erhebliche *Minusfehler*. Der Ausgleich des konstanten Anteils der Reibung ist möglich durch einen dauernd fließenden Hilfsstrom über den Anker, wodurch der Zähler aber auch im Stillstand Eigenverbrauch hat (selten angewandt), oder durch eine Sonderausführung des Stromwenders mit selbsttätig axial verschiebbaren Bürsten (als Bürstenschaukel häufig angewandt), was jedoch den Zähler verteuert und unter Umständen die Betriebssicherheit mindert. Wegen des starken Eigenfeldes ist der *Fremdfeldeinfluß* zu vernachlässigen.

[3] Elektrolytische Zähler. Sie wissen, daß das an der Katode einer elektrolytischen Zelle von einem Gleichstrom ausgeschiedene Metall oder Gas mengenmäßig genau der Elektrizitätsmenge proportional ist. Ein Zähler nach diesem Prinzip ist der einfachste Ah-Zähler, der sich außerdem durch große und gleichmäßige Meßgenauigkeit auszeichnet. Er hat keine bewegten Teile, die der Abnutzung unterliegen, und geringen Eigenverbrauch. Man kann ihn für eine konstante Spannung in kWh eichen.

Wegen des geringen Eigenverbrauchs und wegen seines einfachen Aufbaus, der Betriebssicherheit gewährleistet, wird er auch zur Zählung nichtelektrischer Größen verwendet, wenn sich diese in einen äquivalenten Gleichstrom umformen lassen. Wenn Sie z. B. den Strom, der bei der selbsttätigen Rauchgasanalyse durch das CO₂-Anzeigeeinstrument fließt — ein geeichtes Milliampereometer —, auch durch den Zähler schicken, so entspricht dessen Anzeige dem $\int \text{CO}_2\text{-Gehalt} \cdot dt$. Dividieren Sie also die Zähleranzeige durch die Betriebszeit t , so können Sie den mittleren CO₂-Gehalt während dieser Zeit ermitteln.

a) Quecksilber-Elektrolytzähler

Bei diesem unter dem Namen *Stia-Zähler* bekannten Gerät ist der Elektrolyt eine wässrige Lösung von *Quecksilberjodid* und *Kaliumjodid* in

einem vollkommen geschlossenen Glasgefäß (Bild 10). Sie sehen die *Quecksilberanode A* und die *Kohlekatode K*, die durch eine *poröse Scheidewand P* getrennt sind. Bei Stromdurchgang von der Anode zur Katode wird aus dem Elektrolyt Quecksilber abgeschieden und in dem *kalibrierten Meßrohr* gesammelt. Die Höhe der Hg-Säule zwischen zwei Ablesungen ist ein Maß für die in diesem Zeitintervall durch den Zähler gegangene Elektrizitätsmenge. Die Skala des Meßrohres kann also in Ah oder für eine bestimmte konstante Netzspannung in kWh geeicht werden. Die Konzentration der Lösung bleibt konstant, da durch das geschlossene Glasgefäß die Verdunstung ausgeschlossen ist und das elektrolytisch abgeschiedene Hg aus dem Vorrat im Anodenraum ersetzt wird. Der Meßbereich ist durch die Länge des Meßrohres gegeben. Das ist ein gewisser Nachteil gegenüber einem Zähler mit Rollenzählwerk. Ist der höchste Stand erreicht, dann muß das Hg durch Kippen des Rohres in den Anodenraum zurückbefördert werden. Dafür ist das Röhrchen in der

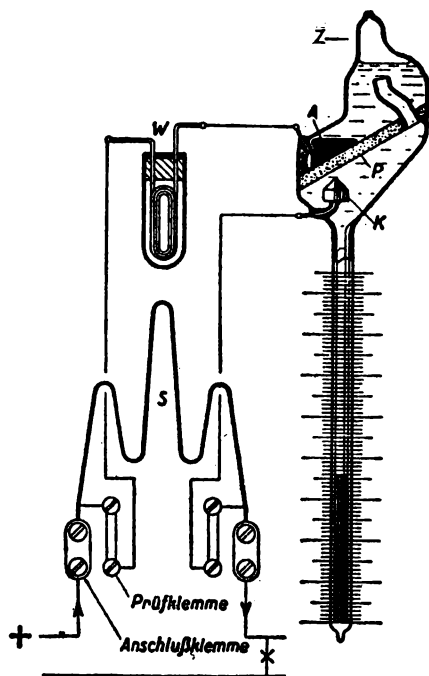


Bild 10
Elektrolytischer Zähler (Hg-Zähler)

Scheidewand *P* vorgesehen. Bei Verrechnungszählern kann das Kippen selbstverständlich nur von einer dazu berechtigten Person ausgeführt werden. Beim Nennstrom des Zählers gehen etwa 20 mA durch die Zelle, der Rest durch den *Nebenwiderstand S*, mit dem der Zähler bei der Eichung auf den richtigen Meßwert eingeregelt wird. Der Spannungsabfall beträgt etwa 0,8 V bei Nennstrom. Der *Widerstand W* ist zum Ausgleich des Temperatureinflusses nötig. Sie wissen, daß der Wider-

stand eines Elektrolyts mit steigender Temperatur sinkt (durchschnittlich -2% je $^{\circ}\text{C}$). Mit einem passend bemessener Widerstand W aus Ni ($+0,68\%$ je $^{\circ}\text{C}$) können Sie diesen störenden Einfluß ausgleichen.

b) Wasserstoff-Elektrolytzähler

Der Wasserstoff-Elektrolytzähler hat als Elektrolyt Wasser, das mit Phosphorsäure angesäuert ist, in einem allseitig geschlossenen Glasgefäß mit keinem alibrierten Meßrohr (Bild 11). Die Katode ist ein feinmaschiges Edelmetallnetz und die Anode ein Edelmetallblech; beide sind mit Rhodium überzogen.

Der an der Katode abgeschiedene Wasserstoff steigt in dem Meßrohr nach oben und drückt dadurch den Flüssigkeitsspiegel nach unten. Der Nullstrich der Skala ist also abweichend von dem oben besprochenen Zähler. Durch Kippen kann man das Meßrohr wieder mit Flüssigkeit füllen.

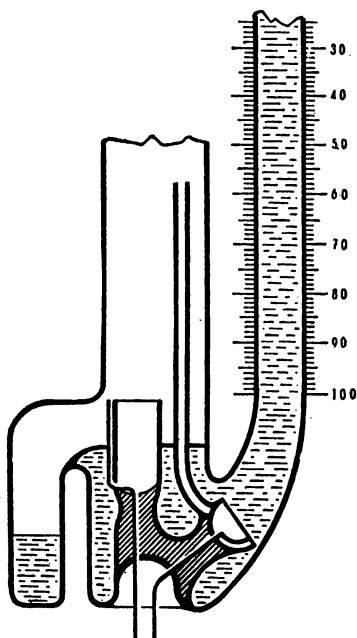


Bild 11
Wasserstoff-Elektrolytzähler

Der Zellenstrom beträgt bei Nennlast des Zählers etwa $0,1\text{ mA}$ bei etwa $0,5\text{ V}$ Spannungsabfall. Der Eigenverbrauch ist also wesentlich geringer als der des Hg-Elektrolytzählers. Wie bei diesem ist ein Nebenwiderstand erforderlich, mit dem auch der Zähler bei der Eichung justiert wird. Zur Temperaturkompensation wird der Zelle ebenfalls ein passend bemessener Widerstand vorgeschaltet.

Zusammenfassung

Der Elektrolytzähler beruht auf der chemischen Wirkung des Gleichstroms. Es haben sich zwei Ausführungen bewährt: der Zähler mit Hg- und der mit H_2 -Abscheidung an der Katode.

In beiden Fällen ist die Menge des abgeschiedenen Stoffes, die der Elektrizitätsmenge $I \cdot t$ proportional ist, in einem kalibrierten Meßrohr zu erkennen.

Der geringe Zellenstrom wird von einem Nebenwiderstand abgezweigt, durch den der Hauptstrom fließt.

Der negative Temperaturbeiwert des Elektrolytes wird durch Vorschalten eines Metalldrahtwiderstandes kompensiert.

Übungen

1. *Wie wird die Meßgenauigkeit eines Zählers im Meßbereich angegeben?*
2. *Wie sorgt der Staat dafür, daß beim Verkauf elektrischer Arbeit mit richtigem Maß gemessen wird?*
3. *Wodurch unterscheidet sich der Wh-Zähler grundsätzlich vom Ah-Zähler?*
4. *Welche Zählertypen werden bei Gleichstrom verwendet?*
5. *Welche Einflüsse verursachen bei den Motorzählern eine Änderung der Eichfehlerkurve?*
6. *Warum ist der nichtastasierte oder nichtabgeschirmte elektrodynamische Wh-Zähler empfindlich gegen ein Fremdfeld?*
7. *Ein Motor-Wh-Zähler für 110 V, 10 A, ist so montiert, daß die Horizontalkomponente des Erdfeldes mit 0,2 G das Feld der Stromspulen (150 G bei 10 A) verstärkt. Wie groß ist der zusätzliche Fehler, wenn Sie eine 40-Watt-Lampe einschalten?*
8. *Beim Motor-Wh-Zähler nimmt bei steigender Temperatur infolge der Widerstandszunahme des Spannungspfadcs (Ankerkreis) das Triebmoment ab. Der dadurch entstehende Meßfehler wird kompensiert. Warum ergibt die Widerstandszunahme der nach Bild 1 vom Hauptstrom durchflossenen Spulen 6 keinen Meßfehler?*
9. *Hat ein Motorzähler bei Rücklauf (Energierrücklieferung) dieselben Fehler wie bei Vorwärtslauf?*
10. *Warum ist der Magnet-Motorzähler bei veränderlicher Netzspannung zur Messung der elektrischen Arbeit nicht geeignet?*

11. Bei einem Elektrolytzähler ist der Widerstand der Zelle $R_Z = 10 \Omega$, der Temperaturbeiwert $\alpha_Z = -0,02 \frac{1}{^\circ\text{C}}$. Wie groß muß der Vorwiderstand R_V aus Nickel $\left(\alpha_V = +0,0068 \frac{1}{^\circ\text{C}}\right)$ sein, damit der Temperatureinfluß kompensiert ist?

3. Kapitel: Wechselstromzähler

[4] Induktionszähler für Einphasenstrom

a) Aufbau und Wirkungsweise

Der Induktionszähler nach dem Schema Bild 12 ist die gebräuchliche Bauart für den Wechselstrom der Starkstromtechnik. Ein Spannungsmagnet 1 und ein Strommagnet 2 induzieren Wirbelströme in der Al-Scheibe 3, die in der Ihnen bekannten Weise drehbar gelagert ist. Es entsteht ein Drehmoment, das der Leistung $U \cdot I \cdot \cos \varphi$ proportional ist, wenn man dafür sorgt, daß der Triebfluß Φ_U des Spannungseisens und der Triebfluß Φ_I des Stromeisens, die die Scheibe durchsetzen, die richtige Phasenverschiebung gegeneinander haben.

Wie bei den vorher beschriebenen Motorzählern sind ein Bremsmagnet 4 und die üblichen Zählerteile zur Lagerung der Welle und zur Übertragung der Drehung auf das Zählwerk vorhanden.

Betrachten Sie zunächst das *Vektordiagramm* (Bild 13) *des Zählers für induktionslose Last!* Das Diagramm ist zu konstruieren wie folgt:

Zuerst zeichnen Sie die Netzspannung U und den Verbraucherstrom I , die in Phase sind. Der von I im Stromeisen 2 erzeugte Fluß Φ_I bleibt hinter I wegen der Verluste im Eisen und wegen der Belastung durch den induzierten Scheibenstrom I um den kleinen α zurück. I_i entsteht infolge der von Φ_I in der Scheibe induzierten Wechsel-EMK, die dem Fluß Φ_I bekanntlich um 90° nacheilt; also ist I_i als praktisch reiner Wirkstrom (Wirbelstrom) in dieser Richtung anzutragen.

Der Triebfluß Φ_U im Spannungseisen 1 (Bild 12) muß bei $\cos \varphi = 1$ genau um 90° hinter Φ_I zurückbleiben (90° -Verschiebung), denn das Dreh-

moment ist dem Sinus des Winkels zwischen den Flüssen proportional. Also muß es bei reiner Wirklast am größten werden ($\sin 90^\circ = 1$), weil wir hier einen Wirkleistungszähler haben wollen.

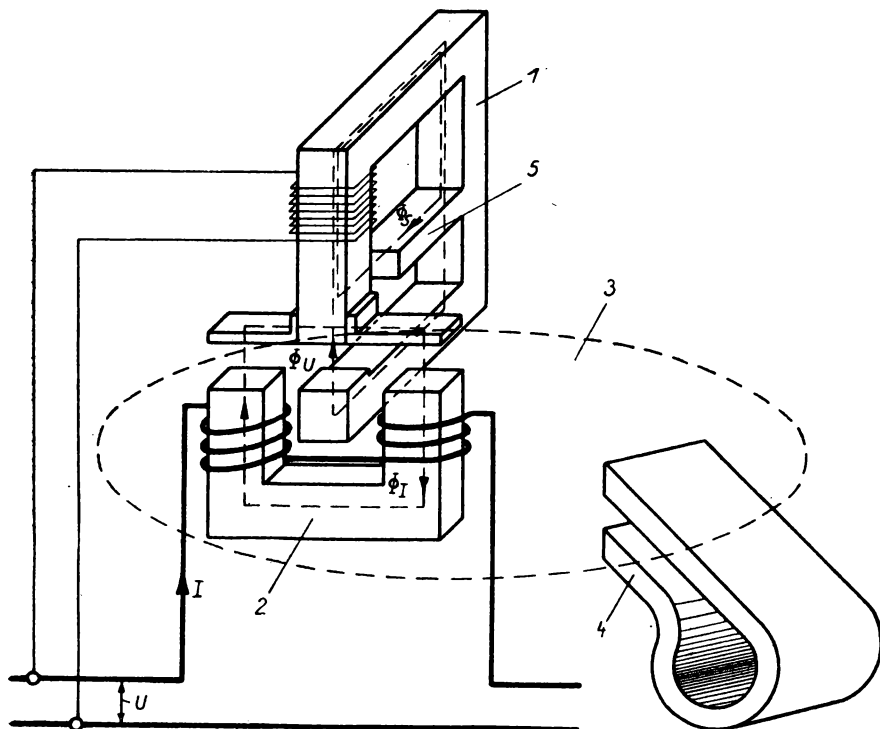


Bild 12. Schema eines Induktionszählers

Sie zeichnen Φ_U in Richtung I ; und sehen, daß der Winkel zwischen U und Φ_U auf $90^\circ + \alpha$ abgeglichen werden muß! Φ_U induziert in der Scheibe die Wirbelströme I_w , ebenfalls 90° nacheilend.

Wie der $\neq 90^\circ + \alpha$ erzielt wird, zeigt Ihnen das Diagramm des Spannungseisens (Bild 14). Dieses Eisen hat einen magnetischen Nebenschluß 5 (Bild 12), durch den der Streufluß Φ_S geht. Das Schema zeigt eine der möglichen Konstruktionen. Die beiden Komponenten Φ_U und Φ_S er-

geben addiert den Gesamtfluß Φ im Spannungseisen, den die Spannungsspule erzeugt. Von diesem gehen Sie aus, um die Größe und die Lage von U zu finden. Φ induziert nämlich in der Spule die 90° nach-eilende, hier nicht gezeichnete Gegen-EMK E , zu deren Überwindung das Netz die gleich große $-E$ in Gegenphase liefern muß. Dazu addieren

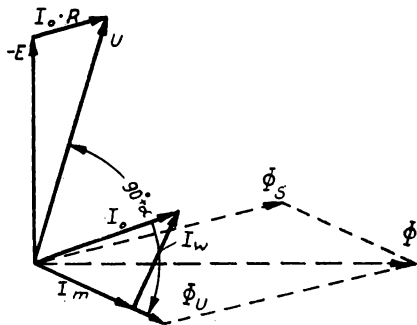
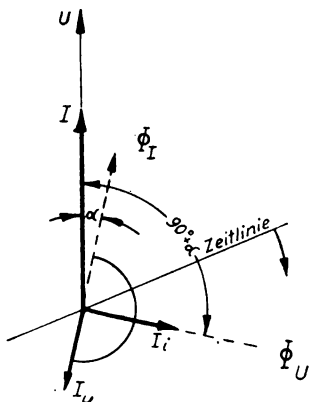


Bild 13. Zählerdiagramm bei $\cos \varphi = 1$ Bild 14. Diagramm des Spannungseisens

Sie den Ohmschen Spannungsabfall $I_0 \cdot R$, den der Spulenstrom I_0 am Widerstand R der Spule erzeugt, und erhalten dadurch den Vektor U . I_0 ist angenähert in Phase mit Φ_S .

Durch passende Wahl der Querschnitte und Luftspalte des Spannungseisens kann man die Größe und die Lage von Φ_U und Φ_S für einen bestimmten Spulenstrom I_0 so festlegen, daß sich zwischen U und Φ_U der $\angle 90^\circ + \alpha$ ergibt.

Sie glauben nicht, daß man diesen Winkel lediglich durch Berechnung der Eisen- und Luftspaltemessungen genau genug erhält? Dann haben Sie recht. Man braucht für die genaue Einstellung der 90° -Verschiebung der Flüsse regelbare Abgleichmittel. Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, setzt sich I_0 , auf Φ_U bezogen, aus dem Magnetisierungsstrom I_m und der Wattkomponente I_w zusammen. Letztere deckt die Wirkverluste der Spule und des Eisens sowie die Belastung durch die von Φ_U induzierten Scheibenströme. Ein genauer Phasenabgleich bei der Eichung auf den

richtigen Winkel ist daher durch Änderung von I_w möglich. Die Mittel dazu sind bei den einzelnen Zählerbauarten verschieden, wie auch die Formen des Spannungs- und des Stromeisens voneinander abweichen. Man kann z. B. auf einem der beiden Eisen eine passend bemessene Sekundärwicklung aufbringen, deren Strom häufig mit einem Widerstand fein geregelt wird. Die Belastung durch diesen Strom vergrößert I_w , und dadurch wird beim Spannungseisen der \angle zwischen U und Φ_U größer. Befindet sich die Zusatzwicklung auf dem Stromeisen, so ist der $\angle \alpha$ fein einstellbar. Andere Hersteller verwenden zum Phasenabgleich ein in den Luftspalt des magnetischen Nebenschlusses einschwenkbare Cu-Blech als Zusatzlast, die durch Wirbelströme hervorgerufen wird. Die Zusatzwicklung auf dem Stromeisen erkennen Sie in Bild 15. Sie ist über die nach links herausragende Widerstandsschleife geschlossen. Durch Verschieben der Schelle auf der Schleife geschieht der Phasenabgleich bei der Eichung. Darüber sehen Sie die beiden Stromspulen aus Cu-Band, durch die der Verbraucherstrom fließt. Das Spannungseisen hat eine andere Form als das in Bild 12. Die Spannungsspule sitzt auf einem Mantelkern. Der Streufluß Φ_S geht durch das rechteckige Fenster; Φ_U durchsetzt den Spulenkern, den Luftspalt für die Scheibe und schließt sich durch den hinteren Eisenbogen.

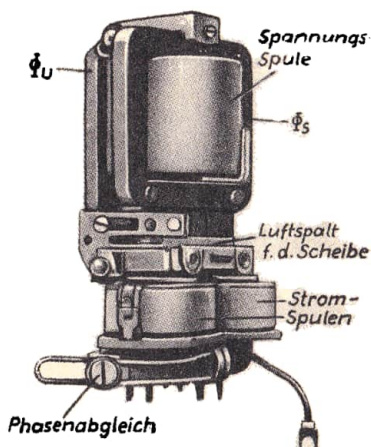


Bild 15. Zähler mit Phasenabgleich

Wie kommt nun die Drehung der Scheibe zustande?

In Bild 16 sind die Triebflüsse Φ_U und Φ_I senkrecht zur Scheibenebene je eine Strombahn der von ihnen induzierten Wirbelströme I_u bzw. I_i eingezeichnet, und zwar für die durch die Zeitlinie (Bild 13) gegebenen

Momentanwerte. Dabei ist die eingetragene Richtung der Triebflüsse als positiv angenommen. I_u ist nach Bild 13 negativ. Sie finden nach der Linke-Hand-Regel, daß I_u durch Φ_i und I_i durch Φ_U nach rechts abgelenkt werden, so daß sich die Scheibe wie ein Motoranker in Pfeilrichtung dreht. Die Drehmomente sind den Produkten $\Phi_I \cdot I_u$ und $\Phi_U \cdot I_i$ proportional und addieren sich zum Gesamtdrehmoment. Dieses wird am größten bei $\cos \varphi = 1$, wie Sie

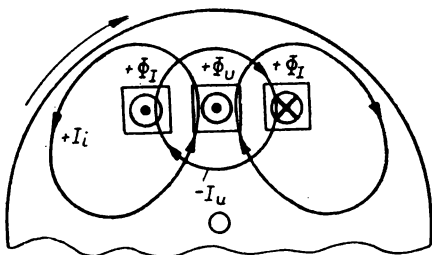


Bild 16. Scheibenströme I_u und I_i induziert von Φ_U bzw. Φ_I

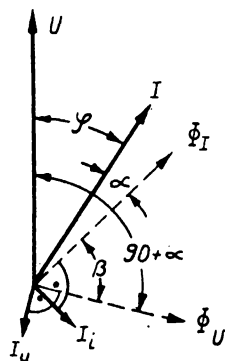


Bild 17. Zählerdiagramm bei induktiver Last

aus dem Diagramm Bild 13 ohne weiteres erkennen, weil die beiden Faktoren Φ_U und I_i bzw. Φ_I und I_u gleichzeitig den Scheitelwert erreichen; also jedes der beiden Produkte hat immer den größtmöglichen Momentanwert.

Eilt jedoch der Verbraucherstrom I um den φ der Netzspannung U nach, so müssen Sie nach Bild 17 um den gleichen Winkel die Vektoren Φ_I und I_i nach rechts drehen, während Φ_U und I_u in der alten Lage bleiben. Jetzt bildet nur die mit dem Fluß zusammenfallende Komponente des Scheibenstromes das Drehmoment. Die Einzel-Triebmomente sind also:

$$M_{T_1} = c_1 \cdot \Phi_U \cdot I_i \cdot \cos \varphi \text{ [gcm]} \text{ und } M_{T_2} = c_2 \cdot \Phi_I \cdot I_u \cdot \cos \varphi \text{ [gcm]}$$

Nun sind die Scheibenströme I_i und I_u proportional dem induzierenden Fluß, der Frequenz f und dem Leitwert κ der Scheibe, also

$$I_i = c_3 \cdot \Phi_I \cdot f \cdot \kappa \text{ und } I_u = c_4 \cdot \Phi_U \cdot f \cdot \kappa$$

$$\text{Eingesetzt: } M_{T_1} = c_5 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot f \cdot \kappa \cdot \cos \varphi$$

$$M_{T_2} = c_6 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot f \cdot \kappa \cdot \cos \varphi$$

M_{T_1} und M_{T_2} addiert, ergibt das Gesamtmoment

$$M_T = c_7 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot f \cdot \kappa \cdot \cos \varphi \quad [\text{gcm}] \quad (12)$$

↗ β zwischen Φ_I und Φ_U (Bild 17) ist $90^\circ + \alpha - (\varphi + \alpha) = 90^\circ - \varphi$.
Da $\cos \varphi = \sin (90^\circ - \varphi)$, können Sie auch schreiben

$$M_T = c_7 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot f \cdot \kappa \cdot \sin \beta \quad [\text{gcm}] \quad (13)$$

Das Drehmoment ist dem Sinus des Winkels zwischen den Flüssen proportional.

Bei rein induktiver Last ($\varphi = 90^\circ$) ist β gleich Null und $\sin \beta$ gleich Null; der Zähler muß stehen. Das ist ein Kennzeichen für die richtige Phasenabgleichung mit den beschriebenen Abgleichmitteln.

Wenn man dafür sorgt, daß Φ_U proportional U und Φ_I proportional I ist, und außerdem voraussetzt, daß f und κ konstant bleiben, dann kann man statt Formel (12) schreiben

$$\text{Triebmoment } M_T = c_8 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{gcm}] \quad (14)$$

Sie sehen also, daß das Triebmoment unter den obigen Voraussetzungen ein Maß für die Wirkleistung ist.

Sie werden sich bei der Besprechung der Zählerfehler daran erinnern. Vielleicht halten Sie diese theoretischen Ableitungen für überflüssig. Es wird auch niemand verlangen, daß Sie diese auswendig wiedergeben können. Wie aber sollten Sie anders die physikalischen Grundlagen der Meßwertbildung und die Fehlermöglichkeiten erkennen?

Das Triebmoment beschleunigt die umlaufenden Teile so lange, bis die bremsenden Momente ihm das Gleichgewicht halten. Hier sind die Gleichgewichtsbedingungen etwas komplizierter als beim Gleichstromzähler. Stellen Sie sich zunächst einen idealen Zähler vor, bei dem nur der Fluß Φ_M des Dauermagnets 4 (Bild 12) das Bremsmoment $M_B = c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi_M^2 \cdot n$ [Formel (6)] erzeugen würde, so wäre im Gleichgewichtszustand

$$c_8 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi_M^2 \cdot n$$

daraus

$$n = \frac{c_8 \cdot N}{c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi_M^2}$$

und bei konst. Φ_M

$$n = C \cdot N [1/\text{min}]$$

Die jeweilige Winkelgeschwindigkeit der Scheibe ist ein Maß für die Leistung.

Das Zählwerk addiert die Ankerumdrehungen in der Zeitspanne t [min]:

$$n \cdot t \triangleq z [\text{Ankerumdr.}] \triangleq C \cdot N \cdot t [\text{kWh}] \quad (15)$$

Die Zahl der Ankerumdrehungen zwischen zwei Zeitpunkten t_1 und t_2 ist ein Maß für die verbrauchte elektrische Arbeit.

$$A = \int_{t_1}^{t_2} N \cdot dt, \text{ wobei } N \text{ veränderlich sein kann.}$$

C ist die auf dem Zählerschild angegebene Konstante: Zahl der Ankerumdrehungen je kWh.

b) Fehlergrößen und Mittel zu ihrer Kompensation

Der *Reibungseinfluß* wurde bereits ausführlich bei den Gleichstromzählern besprochen. Der konstante Reibungsanteil läßt sich wieder durch ein Zusatzdrehmoment ausgleichen, das fein einstellbar sein muß (Kleinlastregelung). Eine der Möglichkeiten zeigt Bild 18a. In den Luftspalt zwischen Scheibe und Spannungseisen wird einstellbar ein Cu-Blech

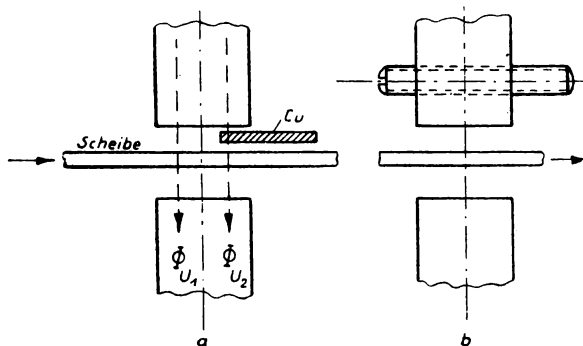


Bild 18. Einstellbare Hilfskraft (Kleinlastregelung)

geschoben, das den Pol durch Wirbelströme unsymmetrisch belastet. Der Teilfluß Φ_{U_2} durch das Blech eilt wegen erhöhter Wirklast dem Teilfluß Φ_{U_1} um einen kleinen Winkel nach, und es entsteht nach Formel 13 ein konstantes Drehmoment, das dem Produkt $\Phi_{U_1} \cdot \Phi_{U_2}$

mal dem Sinus dieses Winkels proportional ist. Bei anderen Konstruktionen ist ein Eisenstück am Spannungseisen schwenkbar befestigt, oder eine feingängige Eisenschraube geht parallel zur Scheibenebene durch den Pol (Bild 18b), wodurch ebenfalls die Unsymmetrie für den einstellbaren Reibungsausgleich erzielt wird. Den *Leerlauf* verhütet auch hier die Ihnen bereits bekannte eiserne Hemmfahne an der Zählerwelle.

Zum angenäherten Ausgleich der mit der Drehzahl zunehmenden *Luftreibung* ist der Bremsmagnet verstellbar angeordnet.

Bei der Ableitung der Formel (15) wurde nur das Bremsmoment des Dauermagnets berücksichtigt. Tatsächlich wirken aber auch der *Spannungs- und der Strommagnet zusätzlich bremsend*, so daß die genauere Gleichung für die Drehzahl lautet

$$n = \frac{c' \cdot N}{\Phi_M^2 + \Phi_U^2 + \Phi_I^2} \text{ [1/min]}$$

Der Vorgang läßt sich auch damit erklären, daß mit steigendem n die Gegen-AW der Scheibenströme größer werden und somit das Triebmoment schwächen.

Die sogenannte *Spannungsdämpfung* durch Φ_U wirkt, solange Φ_U konstant ist, wie eine Verstärkung des Dauermagnets; sie wird also bei der Eichung berücksichtigt. Bei veränderlicher Netzspannung sind die Zählerangaben aber nicht genau proportional U ; bei Überspannung z. B. hat der Zähler wegen der Dämpfung Minusfehler. Um den Fehler herabzusetzen, macht man Φ_U klein gegen Φ_M .

Die *Stromdämpfung* durch Φ_I ist natürlich mit dem Verbraucherstrom I veränderlich und bewirkt bei großer Last eine annähernd quadratische Abnahme der Drehzahl, wie aus der Lastkurve Bild 19 ersichtlich ist.

Diese Minusfehler werden kleiner, wenn Φ_I klein gegen Φ_M ist, aber andererseits darf das Triebmoment nicht zu klein werden. Man hilft sich durch einen *magnetischen Nebenschluß* zum Stromeisen. Der Querschnitt des Nebenschlußeisens ist so bemessen, daß es in den Sättigungsbereich kommt, wenn die Lastkurve abfallen würde. Dadurch steigt der durch die Scheibe gehende Fluß Φ_I stärker als proportional I an, und man kann durch geeignete Formgebung des Nebenschlusses erreichen,

daß das erhöhte Triebmoment den Drehzahlabfall infolge der Stromdämpfung aufhebt.

Zusätzlich kann ein *Stromvortrieb* durch unsymmetrische Belastung eines Poles des Stromeisens angewendet werden, wie es beim Spannungseisen zum Reibungsausgleich geschieht (Bild 18).

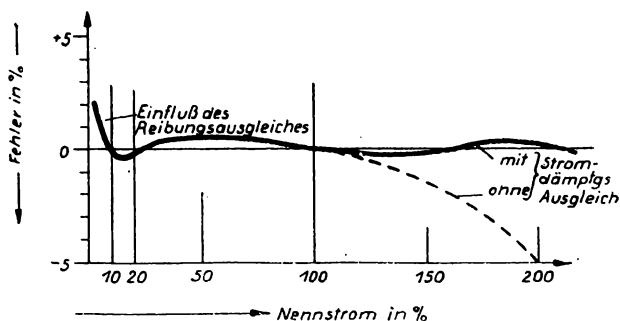


Bild 19. Fehlerkurven

Wie verhält sich der Zähler bei einer *Temperaturänderung*?

Ist die Temperatur höher als bei der Eichung, bei der der Zähler so lange angewärmt wird, bis er die Beharrungstemperatur erreicht hat, so sinken infolge des größeren Widerstandes der Scheibe die Trieb- und die Bremsströme in demselben Maße. Das hat keinen Einfluß auf die Drehzahl. Aber die Abnahme der Triebströme verstärkt die Triebflüsse Φ_U und Φ_I infolge der Verringerung der Gegen-AW, also nimmt das Triebmoment zu. Wenn auch durch die Widerstandszunahme der Spannungsspule der Fluß Φ_U kleiner wird, so läuft der Zähler doch schneller, zumal auch der Bremsmagnet durch die Erwärmung geschwächt wird. Bei einem Zähler ohne Temperatureausgleich wurde je 10°C Temperaturzunahme ein Fehler von $+1,3\%$ bei $\cos \varphi = 1$ gemessen. Abnahme der Temperatur bewirkt Minusfehler.

Es lohnt sich also der Einbau eines *Temperatureausgleichers*, der häufig als selbständig veränderlicher magnetischer Nebenschluß zum Triebfluß oder zum Bremsmagnet ausgeführt wird. Man kann erreichen, daß der Temperaturfehler innerhalb $0,5\%$ je 10°C bleibt.

Der *Frequenzeinfluß* geht aus Formel (13) hervor, in der f enthalten ist. Außerdem ändern sich die Größe und die Lage der Vektoren im Diagramm Bild 14, was eine Änderung von Φ_U und $\angle \beta$ bedeutet. Letzteres bewirkt einen besonders großen Frequenzfehler bei induktiver oder kapazitiver Last. Die Abweichungen der normalen Netzfrequenz sind zwar unerheblich, aber denken Sie an verzerrte Strom- und Spannungskurven (Stromrichter, Gasentladungsröhren, Magnetisierungsströme)!

Sie müssen wissen, daß der Zähler bei Oberwellen Zusatzfehler hat, die im allgemeinen einige Zehntel bis 1 Prozent betragen.

Bei *stoßweiser Belastung*, die z. B. im Kranbetrieb vorkommt, zeigt der Zähler richtig, weil die Anlaufzeit der Scheibe beim Einschalten durch die Auslaufzeit ohne Strom praktisch ausgeglichen wird.

Zusammenfassung

Der Induktionszähler für Wechselstrom hat einen Spannungs- und einen Strommagnet, die wattmetrisch geschaltet sind. Sie erzeugen durch induzierte Wirbelströme in der drehbaren Alu-Scheibe, die gleichzeitig in Verbindung mit dem Bremsmagnet als Wirbelstrombremse dient, ein Drehmoment.

Dieses Triebmoment ist ein Maß für die Wirkleistung $U \cdot I \cdot \cos \varphi$, wenn der Spannungs- dem Stromtriebfluß bei $\cos \varphi = 1$ um 90° nacheilt.

Bei dieser 90° -*Verschiebung der Flüsse* entsteht der Höchstwert des Triebmoments bei $\varphi = 0$ (entsprechend $U \cdot I =$ reine Wirkleistung), denn das Triebmoment ist proportional dem Produkt der Flüsse (entsprechend $U \cdot I$) und dem Sinus des von ihnen gebildeten Winkels.

Dieser Winkel wird bei induktiver Last $90^\circ - \varphi$, bei kapazitiver $90^\circ + \varphi$. Zur genauen *Einstellung der 90° -Verschiebung* der beiden Triebflüsse bei der Eichung ist ein *regelbarer Abgleich* vorgesehen, eine zusätzliche Wirkbelastung eines der beiden Eisen.

Damit der Zähler auch bei kleiner Last anläuft und mit zulässigem Fehler zählt, ist eine *Kleinlastregelung* (Reibungsausgleich) eingebaut. Man macht einen Spannungspol auf verschiedene Weise unsymmetrisch und erzielt dadurch ein Zusatzdrehmoment.

Mit denselben Mitteln erzielt man beim Stromeisen den *Stromvortrieb*, um dem Drehzahlabfall durch *Stromdämpfung* zu begegnen. Wirksamer ist ein *magnetischer Nebenschluß* zum Stromeisen, der etwa bei Nennstrom in den Sättigungsbereich kommt.

Die *Spannungsdämpfung* verursacht Zusatzfehler, wenn die Gebrauchsspannung von der Nennspannung abweicht.

Der *Temperatureinfluß* ist ohne Ausgleich verhältnismäßig groß. Zum Ausgleich benutzt man die temperaturabhängige Änderung des magnetischen Widerstandes des Trieb- oder Bremsflußweges (Veränderung des Luftspalts durch ein Bimetall oder dnrch Nebenschluß aus einer Wärmelegierung).

Abweichungen der *Frequenz* bewirken Zusatzfehler, die also auch bei verzerrter Kurvenform auftreten.

[5] Induktionszähler für Drehstrom

a) Meßprinzip der Drehstromarbeit

Sie haben sich bereits in Lehrbrief 2, 6. Kapitel, mit der Leistungsmessung bei Drehstrom beschäftigt. Da der Zähler ebenfalls ein wattmetrisches Meßwerk ist, gelten für die Messung der Drehstromarbeit grundsätzlich dieselben Überlegungen und Anschlußschaltungen. Sie müssen also folgende Fälle unterscheiden:

1. Drehstrom-Dreileiter mit gleichbelasteten Zweigen R, S, T ,
2. Drehstrom-Dreileiter mit ungleichbelasteten Zweigen R, S, T ,
3. Drehstrom-Vierleiter, also mit belastetem Mittelpunktsleiter.

Wie bei der Leistungsmessung genügt bei 1. ein einzelnes Meßwerk, dessen Angabe mal 3 zu nehmen ist oder bei dem durch die Zahnradübersetzung das Rollenzählwerk dreimal schneller läuft. Die Spannungsspule dieses Einphasenzählers liegt an der Sternspannung. Der Sternpunkt M_p des Netzes muß somit zugänglich sein oder durch sterngeschaltete Widerstände gebildet werden (Lbf. 2, Bild 21).

Letzteres ist bei *Hochspannung* nicht möglich. Um dann mit einem Einphasenwandler (Bild 20) auszukommen, können Sie einen Zähler mit $\sphericalangle 60^\circ + \alpha$ zwischen U und Φ_U statt $\sphericalangle 90^\circ + \alpha$ (Bild 13) wählen. Da

die Spannungsspule an die Außenleiterspannung U_{RT} angeschlossen ist, ergibt sich dieser Winkel aus Bild 21. Durch diese 60° -Abgleich infolge entsprechender Bemessung von Φ_U und Φ_S im Spannungseisen (Bild 14) ist der Winkel zwischen Φ_I und Φ_U wieder bei $90^\circ \cos \varphi = 1$. Der Zähler zählt also den Wirkverbrauch. Sie wissen aber, daß die Messung mit einem Meßwerk nur genau ist, wenn die drei Ströme in R , S und T und die drei Sternspannungen gleich groß sind.

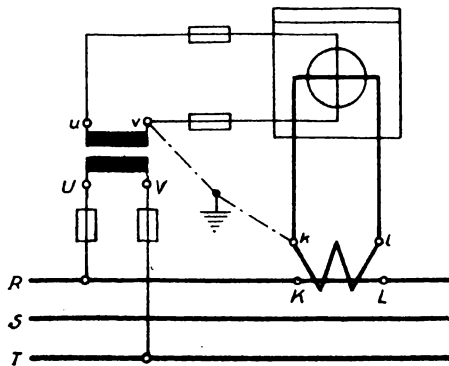


Bild 20. Zähler mit 60° Abgleich für gleichbelasteten Drehstrom

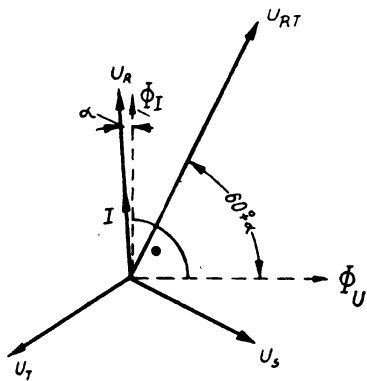


Bild 21. Zählerdiagramm für $\cos \varphi = 1$

Bei 2. wird die *Aron-Schaltung* (Zweiwattmeter-Verfahren) verwendet. Sie könnten in dieser Schaltung zwei Einphasenzähler nehmen, wobei die Drehstromarbeit die Summe der Einzelangaben ist. Üblich ist jedoch der Zusammenbau von zwei Meßwerken zu einem Zähler.

Bei 3. sind drei Meßwerke erforderlich, die ebenfalls auf einen gemeinsamen Läufer wirken, wie nachstehend beschrieben wird.

b) Aufbau und Schaltung der Zähler mit zwei und drei Meßwerken

Die übliche Bauart bei zwei Meßwerken verwendet einen Läufer mit zwei Scheiben auf gemeinsamer Welle, wobei zu jeder Scheibe ein Meßwerk und ein Bremsmagnet gehören (Bild 22). Beim Vierleiter-Zähler mit drei Meßwerken gibt es Bauarten mit drei Scheiben, wobei auf jede ein Meßwerk wirkt (Bild 23), und mit zwei Scheiben, wobei zwei Meßwerke auf die eine Scheibe und das dritte auf die andere arbeiten (Bild 24).

Wichtig sind die Abgleichmittel, um die *Drehmomente* der Einzelmeßwerke *genau gleichmachen* zu können. Das geschieht entweder durch Einstellung des Luftspalts oder durch einen zusätzlichen verstellbaren Nebenschluß zum Spannungseisen. Bei drei Meßwerken haben zwei diese Einstellungsmöglichkeit, um auf das dritte eingeregelt zu werden.

Der *Reibungsausgleich* (Kleinlastregelung) wird hauptsächlich an demjenigen Spannungseisen ein-

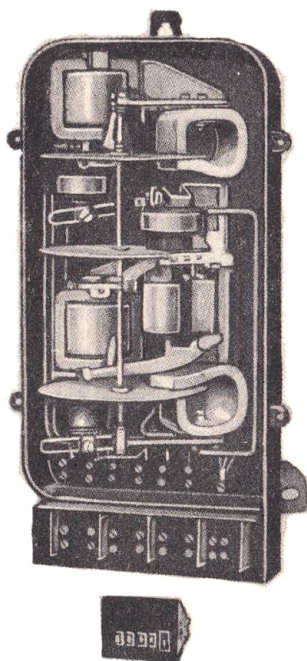
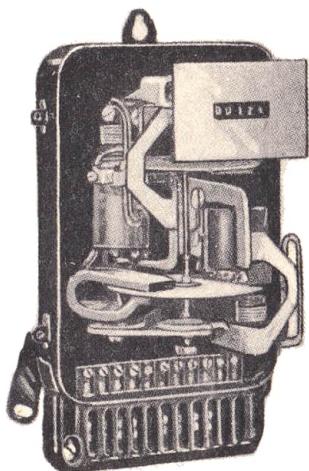


Bild 22. Dreileiter-Drehstromzähler Bild 23. Vierleiterzähler mit 3 Scheiben

gestellt, das die Bremszunge für die Hemmfahne besitzt, sonst würde bei starkem Rückgang oder Ausfall dieser Spannung Leerlauf eintreten. Die *Fehlergrößen* sind eingehend beim Einphasenzähler besprochen worden, sie treten auch beim Drehstromzähler in Erscheinung. Zusätzliche Fehler entstehen durch die *gegenseitige Beeinflussung der Meßwerke* infolge der Streuflüsse, die teilweise die nicht zugehörige Scheibe durchsetzen. Man sucht diesem Einfluß durch die räumliche Anordnung der Meßwerke, durch abschirmende Bleche und evt. durch kompensierende Hilfswicklungen zu begegnen.

Bei *Rücklieferung* von Leistung kehrt sich die Drehrichtung des Zählers um, und das Zählwerk zählt rückwärts. Sie müssen aber bedenken, daß dann das Hilfsdrehmoment zum Reibungsausgleich entgegenwirkt, was *Minusfehler* und *schweren Anlauf* bedeutet. Wollen Sie Hin- und Rücklieferung zählen, so können Sie einen Zähler mit Doppelzählwerk verwenden; das eine Zählwerk zählt nur vorwärts, das andere nur rückwärts.

Die normalen Zählerschaltbilder, die, wie gesagt, der Leistungsmessung entsprechen, finden Sie im *Tabellenbuch für Elektrotechnik, Ausgabe C*, von W. Friedrich, Fachbuchverlag, bzw. umfassend in VDE 0418 „Regeln für Elektrizitätszähler“. Es kommt vor, daß nur zwei Außen- und der Mittelpunktsleiter für eine Beleuchtungsanlage verlegt sind. Das ist der Anwendungsfall des *Zweiphasenzählers*. Er hat zwei Meßwerke, die auf einen gemeinsamen Läufer wirken, wodurch die Summe des Verbrauchs zwischen *RMp* und *SMp* angezeigt wird.

Es sei noch daran erinnert, daß die Aron-Schaltung falsche Meßwerte ergibt, wenn die vektorielle Summe der drei Leiterströme nicht Null ist und die Erde den vierten Leiter bildet (Lbf. 3 [15]).

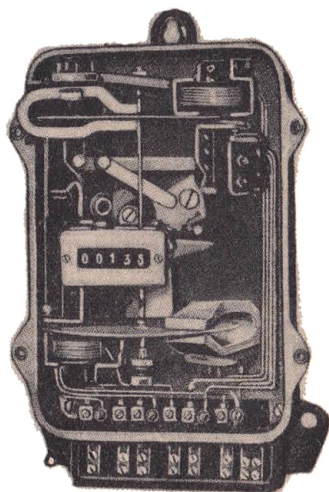


Bild 24

Vierleiterzähler mit 2 Scheiben

c) Blindverbrauch-Zähler (BV-Zähler)

Wenn Sie vergleichsweise an die Blindleistungsverluste $I_B^2 \cdot R$ durch den Blindstrom in den Leitungen und Wicklungen denken, so wird die technische und wirtschaftliche Notwendigkeit klar, die erforderliche Blindleistung möglichst beim Verbraucher zu erzeugen. Dann werden Generatoren, Umspanner und Leitungen für den Transport von Wirkenergie leistungsfähiger. Daher wird in vielen Fällen der Blindverbrauch eines Abnehmers gezählt und entsprechend den Übertragungsverlusten in

Rechnung gestellt, falls z. B. in der Ableseperiode ein bestimmter Durchschnitt des Leistungsfaktors unterschritten wurde.

In Lehrbrief 2, S. 22/23, wurde dargelegt, daß ein Wirkleistungsmesser die Blindleistung $N_B = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ [BVA] mißt, wenn der Spannungszeiger U um 90° zurückgedreht wird.

Nach Bild 25 messen Sie mit dem beschriebenen *Einphasenzähler mit 90° -Ableichung* in einem gleichbelasteten Drehstromnetz den Wirkverbrauch (WV) mit der Stromspule in R und der Spannungsspule an der Sternspannung U_R . Legen Sie die Spannungsspule (nach Umwicklung) an die Drei-

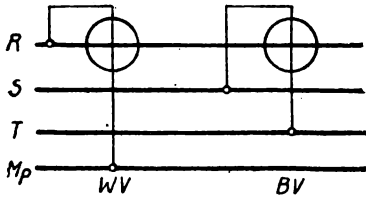


Bild 25. Wirk- und Blindverbrauch-Zähler für gleichbelasteten Drehstrom

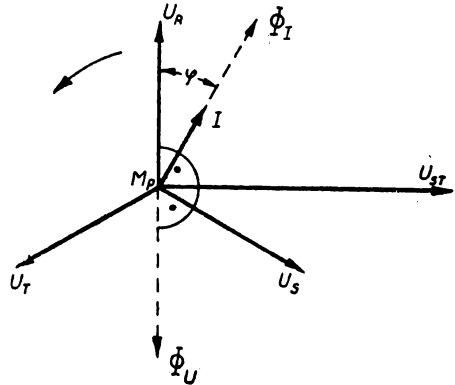


Bild 26. Diagramm des BV-Zählers

eckspannung U_{ST} , die U_R um 90° nacheilt (Bild 26), so dreht sich auch Φ_U um 90° zurück. Der kleine α im Diagramm Bild 13 ist hier und später nicht gezeichnet.

Nun ist nach Formel (13) das Triebmoment

$$M_T = c_7 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot f \cdot \kappa \cdot \sin (\text{Winkel zwischen } \Phi_I \text{ und } \Phi_U)$$

Der Winkel zwischen Φ_I und Φ_U ist $180^\circ - \varphi$; Φ_U und Φ_I werden proportional U bzw. I und f sowie κ als konstant angenommen:

$$M_T = c_8 \cdot U \cdot I \cdot \sin (180 - \varphi)$$

$$M_T = c_8 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Der Zähler mißt demnach mit der passenden Getriebeübersetzung den BV des Drehstromverbrauchers bei gleichen Strömen in den Leitungen.

Für den Vierleiter-Drehstrom kann der WV-Zähler mit drei Meßwerken und entsprechender Umschaltung der Spannungsspulen als BV-Zähler verwendet werden (Bild 27). Sie sehen, daß die Spannungspfade im Dreieck geschaltet sind. Diese Schaltung wird im Innern des Zählers ausgeführt. Äußerlich wird er wie ein WV-Zähler angeschlossen. Er ist auch für den Dreileiter-Drehstrom (ohne M_p) verwendbar. Gebräuchlicher sind die *BV-Zähler mit 60° Abgleich* im Spannungseisen. Wie bereits erwähnt (Bild 21), eilt dann der Fluß Φ_U der Spannung U um $60^\circ + \alpha$ nach. Das gelingt mit einem Vorwiderstand zur Spule und mit einem großen Luftspalt im magnetischen Nebenschluß.

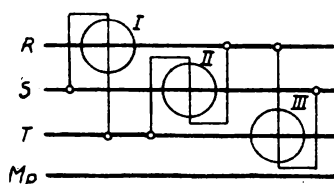


Bild 27. Blindverbrauch-Zähler mit 90° Abgleich für Drehstrom mit und ohne M_p

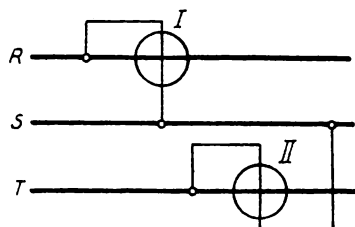


Bild 28. WV-Zähler in Aron-Schaltung

Beim WV-Zähler in Aron-Schaltung mit 90° Abgleich (Bild 28) liegen die Spannungsspulen an RS und TS . Da nun der BV-Zähler nur 60° Abgleich hat, müssen Sie die Spannungen nicht um 90° wie in Bild 26, sondern um $90^\circ + 30^\circ = 120^\circ$ zurückdrehen. Sie kommen nach Bild 30 von U_{RS} auf U_{ST} und von U_{TS} auf U_{RT} . Dementsprechend sind die Spulen in Bild 29 angeschlossen.

Beim BV-Zähler mit 60° Abgleich für Vierleiter-Drehstrom (Bild 31) kommen Sie ebenfalls auf die richtige Schaltung, wenn Sie die Spannungsspulen an die den Spannungen des WV-Zählers um 120° nacheilenden Sternspannungen anschließen.

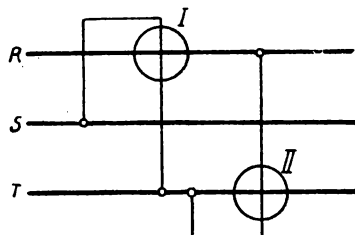


Bild 29. Blindverbrauch-Zähler mit 60° Abgleich

Alle diese BV-Zähler, bei denen dem Meßwerk eine Spannung anderer Phase zugeführt wird, zählen nur richtig, wenn das Spannungsdreieck der Außenleiterspannungen gleichzeitig ist (Spannungen gleich groß). Außerdem muß die *Phasenfolge RST*, nach der laut Schaltbild die Spannungsanschlüsse vorgenommen sind, eingehalten werden.

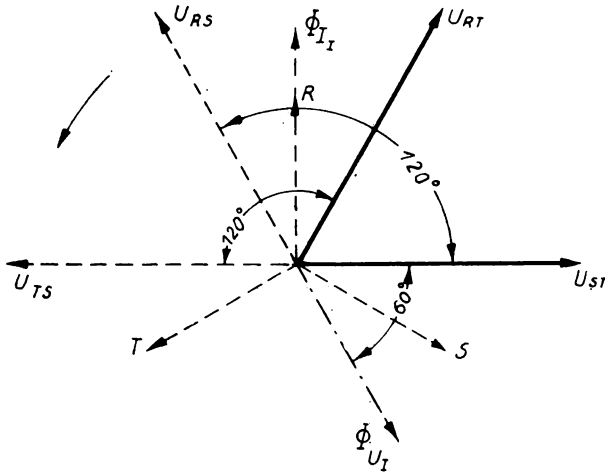


Bild 30. Diagramm des BV-Zählers mit 60° Abgleich in Aron-Schaltung bei $\cos \varphi = 1$

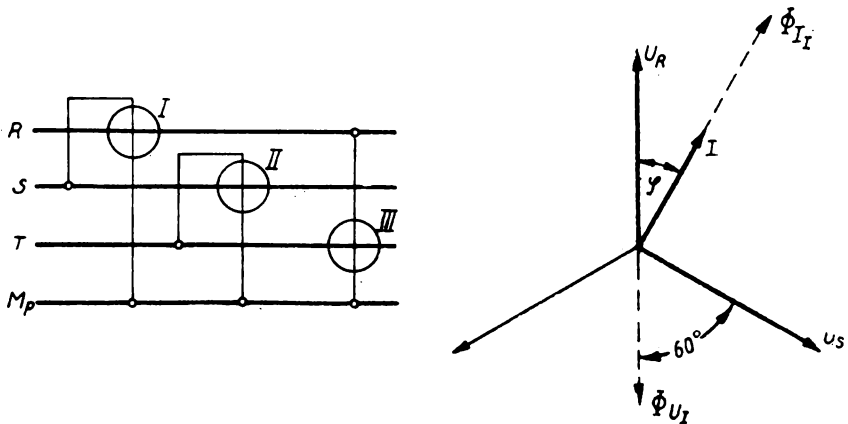


Bild 31. Blindverbrauch-Zähler mit 60° Abgleich für Vierleiter-Drehstrom

Bei den Zählerdiagrammen ist bemerkenswert, daß das Triebmoment positiv ist, der Zähler also vorwärtsläuft, wenn der Spannungsfluß Φ_U dem Stromfluß Φ_I naheilt (Winkel $< 180^\circ$). Bei kapazitiver Last läuft der Zähler rückwärts; der Winkel wird größer als 180° und sein Sinus negativ [vgl. Formel (13)]!

Die BV-Zähler mit 0° Abgleich haben gegenüber den vorher behandelten den Vorteil, daß die drei verketteten Spannungen nicht genau gleich zu sein brauchen. Sie sind auch nicht von der Phasenfolge abhängig. 0° Abgleich bedeutet, daß Φ_U und Φ_I bei $\cos \varphi = 1$ in Phase sind (Bild 32), so daß wegen $\sin 0^\circ$ das Drehmoment Null wird. Hiermit haben Sie einen reinen BV-Zähler ohne Kunstphase, also ohne Verwendung „zurückgedrehter“ Spannungen, der mit ein, zwei oder drei Meßwerken wie die entsprechenden WV-Zähler angeschlossen wird.

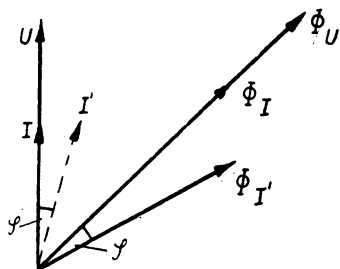


Bild 32. Blindverbrauch-Zähler mit 0° Abgleich bei Ohmscher (I) und induktiver (I') Last

Man kann erreichen, daß die Winkel zwischen U und Φ_U und zwischen I und Φ_I gleich groß werden, und zwar

bei Φ_U durch einen Vorwiderstand zur Spannungsspule sowie durch vergrößerten Luftspalt im magnetischen Nebenschluß, bei Φ_I durch einen Parallelwiderstand zur Stromwicklung, der zum genauen Abgleich veränderlich ist.

Warum wendet man dieses vorteilhafte System nur bei hohen Genauigkeitsansprüchen an? Weil der Zähler teuer ist und wegen des Parallelwiderstandes einen 3- bis 4mal so großen Eigenverbrauch hat. Auch läßt er sich nicht für alle Nennströme ausführen. Er wird insbesondere für Meßwandleranschluß geliefert.

Wenn durch den beim Abnehmer montierten BV-Zähler die Einhaltung eines Soll-Leistungsfaktors erreicht werden soll, wird zuweilen zur Erleichterung der Kostenberechnung der *Überschuß-Blindverbrauch-Zähler* verwendet. Er läuft erst bei Unterschreitung des Soll-Wertes und zählt den Überverbrauch. Mit einem Doppelzählwerk ist auch die Rückwärtszählung bei Überschreitung des Soll-Wertes möglich.

um eine senkrechte Achse schwenkbaren Gabel g gelagert ist. Seitlich wird K geführt von den Stützrollen S_1 und S_2 und den Antriebsrollen vom WV- und BV-Zähler. Die Berührungsebenen stehen aufeinander senkrecht und gehen durch den Mittelpunkt der Kugel.

Wird nur Wirkleistung entnommen, so treibt lediglich WV in Pfeilrichtung, und g stellt sich in Richtung v_w , wobei demnach m mit einer der Belastung entsprechenden Geschwindigkeit v_w umläuft. Andererseits läuft m bei $\cos \varphi = 0$ mit der Geschwindigkeit v_b nach Größe und Richtung. Treiben WV und BV gleichzeitig, so stellt sich g in eine Zwischenstellung lt. Skizze, und $\cos \varphi$ entspricht dieser Stellung und kann durch einen mit der Gabel verbundenen Zeiger auf einer geeichten Skala abgelesen werden (zwischen den beiden oberen Zählwerken für WV und BV). Meßbereich 0,8: kap...1...0 indukt.

Die Winkelgeschwindigkeit von m ist immer gleich $\sqrt{v_w^2 + v_b^2}$, also ist die Drehzahl von m , die auf das Zählwerk übertragen wird, proportional dem Scheinverbrauch $SV = \sqrt{(WV)^2 + (BV)^2}$.

Wenn man zuläßt, daß der SV nur innerhalb enger Grenzen des Leistungsfaktors annähernd richtig gemessen wird, was für die erwähnte Feststellung des Höchstwertes aus Tarifgründen zutrifft, kommt man mit einem einzigen Drehstromzähler in Sonderbauart aus. Da sein Drehmoment proportional $U \cdot I \cdot \cos \varphi$ ist, läuft die Scheibe am schnellsten bei $\cos \varphi = 1$. Bei einer Phasenverschiebung von $\pm 20^\circ$ (entsprechend $\cos \varphi = 0,94$ kapazitiv bzw. induktiv) bewegt sich die Scheibe demnach 6% langsamer, wenn es sich um den normalen WV-Zähler mit 90° Abgleich handelt. Als *SV-Zähler* eingesetzt, hätte er also bei $\cos \varphi = 0,94$ einen Minusfehler von 6%, denn er müßte den $SV = U \cdot I \cdot t$ angeben; der $\cos \varphi$ dürfte das Triebmoment nicht verringern.

Wenn Sie nun dem Zähler bei $\cos \varphi = 1$ einen Fehler von + 3% geben (Bremsmoment kleiner!), erhalten Sie bei $\cos \varphi = 0,94$ nur noch — 3%, im ganzen Meßbereich also maximal $\pm 3\%$. Damit kann man sich für den erwähnten Zweck zufrieden geben; allerdings reicht der Meßbereich nicht aus. Es gelingt aber durch ein Spannungseisen mit 135° Abgleich, einen Meßbereich von $\cos \varphi = 0,4 \dots 0,9$ mit dem Maximalfehler $\pm 3\%$ zu erhalten.

Auf weitere Möglichkeiten zur Messung des SV soll hier nicht eingegangen werden.

Zusammenfassung

Die Drehstromzähler für den *Wirkverbrauch* verwenden das Einphasenmeßwerk mit 90° *Abgleich*, und zwar für die verschiedenen Fälle der Leistungsmessung mit einem, zwei oder drei Meßwerken.

Bei gleichbelasteten Zweigen des Drehstromes mit unzulänglichem M_p wird gelegentlich der Einphasenzähler mit 60° *Abgleich* gewählt, der den künstlichen Sternpunkt erspart.

Den *Blindverbrauch* kann man mit dem Wirkverbrauchmeßwerk durch Anwendung einer Kunstphase für den Spannungspfad messen.

Haben Sie das für den Wirkverbrauch erforderliche Meßwerk mit dem 90° -*Abgleich*, so erhalten Sie die Kunstphase durch die jeweils um 90° nacheilende Spannung.

Bei den gebräuchlichen *Blindverbrauch-Zählern mit 60° Abgleich* ist die Spannungsspule an die Spannung geschaltet, die gegen die beim Wirkverbrauch-Zähler verwendete um 120° zurückliegt. Dieser Zähler könnte wegen der 60° -Abgleichung nicht als Wirkverbrauch-Zähler verwendet werden.

Alle Zähler mit Kunstphase haben bei ungleichseitigem Spannungsdreieck größere Fehler.

Das ist nicht der Fall beim *Blindverbrauch-Zähler mit 0° Abgleich* ohne Kunstphase, dessen Meßwerk $U \cdot I \cdot \sin \varphi$ direkt mißt.

Der *Scheinverbrauch-Zähler* wird häufig zur Feststellung des Spitzenverbrauchs verwendet. In physikalisch richtiger Weise wird der Scheinverbrauch als geometrische Summe der Anzeigen eines Wirkverbrauch- und eines Blindverbrauch-Zählers erhalten. Für geringere Ansprüche genügt ein für Scheinverbrauch geeichter Wirkverbrauch-Zähler in Sonderbauart.

[6] Sonderbauarten. Es ist im Rahmen dieses Lehrbriefs nicht möglich, *sämtliche* Sonderbauarten zu erklären. Wichtig für Sie sind folgende vier Sonderzähler:

a) Zähler mit Rücklaufhemmung

Ein Zähler läuft vorwärts bei der Energierichtung vom Erzeuger zum Verbraucher. Dann eilt der Triebfluß Φ_U dem Triebfluß Φ_I nach. Der Wirkstrom ist mit der Spannung in Phase, wir rechnen ihn positiv. Kehrt sich die Energierichtung um, weil der Verbraucher liefert — denken Sie z. B. an einen Hebezeug-Asynchronmotor, der von der absinkenden Last übersynchron angetrieben wird —, so wird der Wirkstrom negativ, also um 180° gegen die Spannung verschoben. Ebenso dreht sich der Vektor Φ_I , der Zähler läuft rückwärts.

Wenn die Rücklieferung nicht vom Zählwerkstand abgezogen werden soll, müssen Sie einen Zähler mit *Rücklaufhemmung* verwenden.

Wie läuft bei obigem Beispiel ein BV-Zähler? Da der Asynchrongenerator auch weiterhin Magnetisierungsstrom aufnimmt, läuft der BV-Zähler vorwärts. Wir rechnen diesen Blindstrom ebenfalls positiv. Sinngemäß ist bei Rücklieferung von Magnetisierungsstrom, also bei kapazitiver Last, negativer Blindstrom anzunehmen, wobei der Zähler rückwärtsläuft.

Im Verbundbetrieb der Energieversorgung kommt es in den Netzen immer vor, daß zwischen zwei Orten *A* und *B* wechselseitig Bezug und Lieferung von Wirk- und Blindleistung auftritt. Sie müssen dann für einen Meßsatz in *A* vier Fälle unterscheiden:

- | | |
|--|---|
| 1. WV-Lieferung (+) von <i>A</i> nach <i>B</i> | $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) BV von } A \text{ nach } B (+) \\ \text{b) BV von } B \text{ nach } A (-) \end{array} \right.$ |
| 2. WV-Bezug (—) von <i>B</i> nach <i>A</i> | $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) BV von } A \text{ nach } B (+) \\ \text{b) BV von } B \text{ nach } A (-) \end{array} \right.$ |

Hierbei sollen die WV und die BV in beiden Energierichtungen getrennt gezählt werden. Demnach gehören zu einem Meßsatz 2 WV-Zähler und 4 BV-Zähler, jeder mit Rücklaufhemmung, wobei die Zähler für Bezug umgepolt werden, damit sie ebenfalls vorwärtslaufen. Sie wissen, daß der Reibungsausgleich nur bei Vorwärtslauf im richtigen Sinn wirkt und bei Rückwärtslauf und geringer Last erhebliche Minusfehler verursacht. Die BV-Zähler 1a + 2a bzw. 1b + 2b dürfen nun nicht gleichzeitig eingeschaltet sein, sonst würde der Verbrauch doppelt gezählt werden. Infolgedessen erhält der WV-Zähler 1 einen *Rücklaufkontakt*, der bei WV-Bezug

schließt und ein Relais betätigt, das die Spannungspfade der BV-Zähler 1a und 1b abschaltet und gleichzeitig die der Zähler 2a und 2b einschaltet. Umgekehrt ist es, wenn der WV-Zähler 2 läuft.

Sie kommen nach Bild 35 mit zwei BV-Zählern aus, wenn diese *Doppelzählwerke* erhalten. Ein eingebauter kleiner Relais-Magnet kuppelt entweder das eine oder das andere Zählwerk mit dem Triebwerk. Alle Zähler, die übrigens an nicht gezeichnete Meßwandler angeschlossen sind, laufen

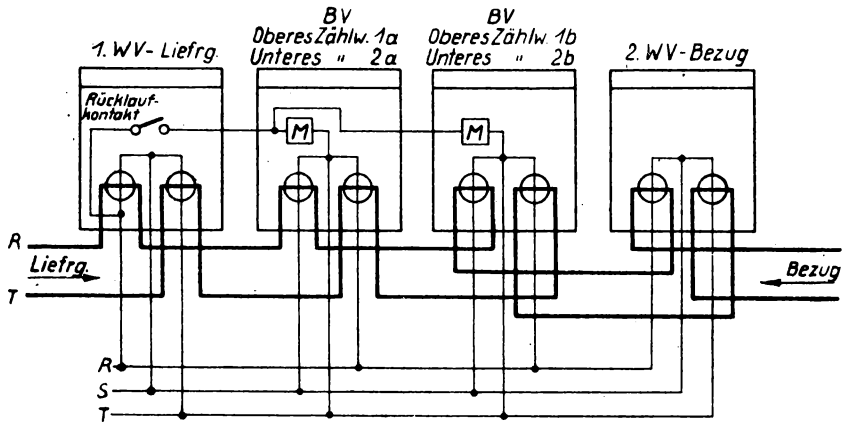


Bild 35. Meßsatz für Wirk- und Blindverbrauch

vorwärts (beachten Sie die Umpolung der Strompfade bei den Zählern für Bezug) und haben *Rücklaufhemmung*. Wenn bei Lieferung der WV-Zähler 1 läuft, so sind die Magnete der BV-Zähler stromlos und haben die oberen Zählwerke gekuppelt. Der linke Magnet zählt dann BV-Lieferung, der rechte BV-Bezug. Bei Bezug von WV läuft 2, 1 schließt seinen Rücklaufkontakt und kuppelt dadurch die unteren Zählwerke der BV-Zähler.

Bei dieser Gelegenheit kann auf die Anwendung des Doppelzählwerks beim *Doppeltarifzähler* hingewiesen werden, wobei eine *Schaltuhr* den Relais-Magnet betätigt. Es kann dadurch für einen bestimmten Zeitraum der Verbrauch für einen anderen Tarif gezählt werden. Denken Sie z. B. an billigeren Nachtstrom!

b) *Maximumzähler, -schreiber und -drucker*

Diese Geräte sind nach den Bedürfnissen der Tarifgestaltung entwickelt worden. Die Entstehungskosten der kWh setzen sich zusammen aus den reinen Erzeugungskosten durch den Verbrauch von Betriebsmitteln und aus den festen Kosten für die Verzinsung und Abschreibung des angelegten Kapitals, für die Erhaltung der Anlage, für Löhne, Gehälter usw. Man hat daher mannigfaltige Tarife erdacht, um die festen Kosten (Leistungspreis) auf die Abnehmer angemessen zu verteilen. Die Grundgebühr, die für Ihren häuslichen Anschluß bezahlt werden muß, auch wenn keine kWh verbraucht (Arbeitspreis) wird, richtet sich bekanntlich nach dem Anschlußwert. Sie ist das Entgelt dafür, daß das E. W. diese Leistung bereitstellt, und ist ein Beitrag zu den festen Kosten des Werkes.

Auch der Tarif für Industriebetriebe hat meistens eine Grundgebühr, so daß außer der Arbeitsgebühr ein Beitrag entsprechend der vom Abnehmer beanspruchten *Höchstleistung* als Leistungspreis zu entrichten ist. Dadurch soll der Abnehmer auch dazu angehalten werden, Leistungsspitzen in seinem Betrieb zu vermeiden, denn das E. W. hat bekanntlich insbesondere in den Hauptbelastungszeiten ein Interesse daran, die Spitzen abzuflachen.

Der *Zähler mit Maximumzeiger* kann als Wirk- und Blindverbrauch-Zähler geschaltet sein. Bild 33 zeigt eine Sonderausführung, dadurch gekennzeichnet, daß je 1 Wirk- und 1 Blindzähler in einem Gehäuse kombiniert sind und der Wirkzähler und das Scheinleistung zeigende Kugelmesswerk je mit Maximumzeiger gekuppelt wurden.

Außer dem normalen Zählwerk dreht der Zähler durch ein Räder-vorgelege einen Zeiger über die in Leistungseinheiten geteilte Skala, der durch einen Mitnehmer mitgenommen wird und lose auf der Welle sitzt (vgl. Bild 36). Ein kleiner Relais-Elektromagnet *R* kuppelt das Zeiger-vorgelege eine bestimmte Zeit lang (15, 30, selten 60 min) mit dem Zähler. Nach Ablauf dieser *Messperiode* wird das Relais durch eine *Schaltuhr* kurzzeitig (15 s) abgeschaltet, dadurch die Mitnehmerwelle entkuppelt und der Mitnehmer durch eine Feder auf Null zurückgedreht, während der Schleppzeiger auf dem Maximumwert stehenbleibt. Dieser ist der

mittlere Wert der Leistung während der Meßperiode. Möglicherweise wird dieser Wert bei der nächsten Meßperiode, wenn das Relais wieder kuppelt, nicht erreicht, oder aber der Mitnehmer schiebt den Zeiger ein Stück weiter. Jedenfalls gibt der Zeiger die höchste zwischen zwei Zählerablesungen aufgetretene mittlere Leistung an. Nach dieser Feststellung wird der Zeiger auf Null zurückgedreht, was natürlich nur dem dazu Berechtigten erlaubt ist. Wenn Sie das Maximum etwa nach

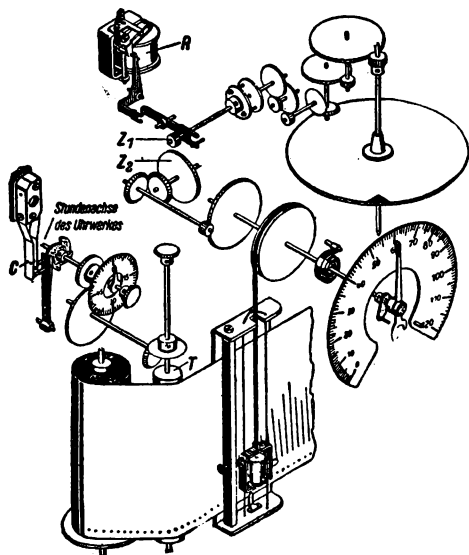


Bild 36. Schematische Wirkung des schreibenden Maximumzählers

einem Monat ablesen, können Sie nicht wissen, wann und wie oft es aufgetreten ist. Das ermöglicht nur der *schreibende Maximumzähler*, dessen Aufbau aus Bild 36 hervorgeht. Sie sehen den Relaismagnet *R*, der die Zahnräder *Z₁* und *Z₂* kuppelt, und die vorher beschriebenen Teile. Hier betätigt eine zusätzliche Seilscheibe mittels Bronzbandübertragung eine auf der Geradführung gleitende Schreibfeder. Die Länge der von ihr gezogenen Striche ist ein Maß für den Mittelwert der Leistung in der Meßperiode. Da der Diagrammstreifen die übliche Stundenteilung hat, haben Sie

täglich einen Überblick über das zeitliche Auftreten der Höchstwerte. Die Schaltuhr entfällt hier, da das Diagrammpapier zeitgerecht durch eine der Ihnen durch Lehrbrief 3 bekannten Antriebsarten bewegt wird, so daß der Kontakt, wie im Bild ersichtlich, von einer Nockenscheibe betätigt wird. Es ist auch die Feder angedeutet, die die Mitnehmerwelle nach einer Meßperiode zurückdreht und damit auch die Schreibfeder immer wieder auf Null abfallen läßt.

Wenn Sie sich an den Einfluß der Reibung erinnern, so leuchtet ein, daß Sie von diesen Zählern nicht die Meßgenauigkeit eines normalen Zählers verlangen können. Der Reibungsausgleich ist nur für den konstanten Reibungsanteil wirksam; hier wird der Zähler als Motor periodisch belastet und kurzzeitig entlastet. Um den Einfluß der Zusatzlast abzuschwächen, gibt man dem Zähler ein wesentlich höheres Triebmoment auf Kosten des Eigenverbrauchs.

Bringt man im normalen Zähler einen Kontakt an, der nach einer bestimmten Anzahl Scheibenumdrehungen geschlossen und geöffnet wird, so hat man einen *Kontaktgeberzähler*, der zur *Fernzählung* verwendet wird. Die Zeit zwischen zwei Kontaktschlüssen entspricht der kWh-Zahl. Man kann demnach mit dem Kontakt ein Fernzählwerk betätigen. Das ist im Prinzip ein Elektromagnet, ein Relais, dessen Anker bei jedem Stromimpuls ein Klinkenrad um einen Zahn weiterdreht. Die Drehung wird mit einem passenden Vorgelege auf das Rollenzählwerk übertragen. Vielleicht ist Ihnen der Gesprächszähler im Selbstanschlußamt bekannt, dessen Konstruktion ähnlich ist.

Der Kontaktgeberzähler wird für *Summenzählwerke* und auch für das *druckende Maximum-Fernzählwerk* verwendet. Das vorher beschriebene mechanische Maximumwerk ist hier durch ein elektrisches ersetzt (Bild 37). Der eingebaute Relaismagnet zieht seinen Anker jedesmal an, wenn der Kontaktgeberzähler einen Stromimpuls gibt, und dreht das Rollenzählwerk, dessen Ziffern erhaben als Drucktypen ausgebildet sind. Nach Ablauf der Meßperiode wird der Zahlenwert der in dieser Periode aufgetretenen mittleren Leistung auf das Registrierpapier gedruckt. Das besorgt ein Relaismagnet, der nach der in Bild 36 dargestellten Weise gesteuert wird. Außerdem wird auf eine zweite Druckziffernrolle für die neue Meß-

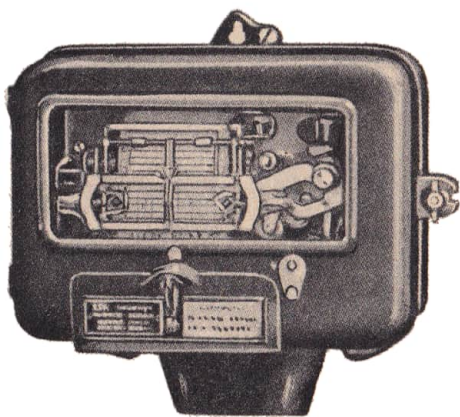


Bild 37. Druckendes Maximum-Zählwerk

periode umgeschaltet, während die erste selbsttätig auf Null zurückläuft. Grundsätzlich ist die Bildung des Meßwerkes dieselbe wie beim schreibenden Gerät. Bei diesem wirkt die Zählerscheibe *mechanisch* auf die Schreibfeder während einer Meßperiode von z. B. 15 min. Die Strichlänge ist also eigentlich ein Abbild der Anzahl der Scheibenumdrehungen, und diese entsprechen einer bestimmten Arbeit, z. B. 1500 kWmin. Da Leistung gleich Arbeit durch Zeit ist, erhalten Sie als mittlere Leistung in der Meßperiode $1500 \text{ kWmin} : 15 \text{ min} = 100 \text{ kW}$. Beim druckenden Fernzählwerk entfällt die mechanische Belastung des Zählers; die Anzahl der Scheibenumdrehungen wird elektrisch auf das druckende Zählwerk übertragen. Seine Ziffern könnten die Arbeit (1500 kWmin lt. Beispiel) angeben. Da aber die Meßperiode von 15 min bekannt ist und immer konstant bleibt, kann man die Division $1500 : 15$ mit einem passenden Untersetzungsgetriebe erzielen, so daß die gedruckte Zahl den Leistungswert angibt.

Man kann diese Maximalzähler mit einem *Grenzkontakt* versehen, der bei Überschreiten einer eingestellten Höchstleistung ein optisches oder akustisches *Warnsignal* auslöst.

Erwähnenswert ist noch der *Überverbrauch- oder Spitzenzähler*, der den Verbrauch oberhalb einer fest eingestellten Leistungsgrenze mißt. Der Tarif kann so sein, daß die Kilowattstunde oberhalb dieser Grenze zum Zwecke der Spitzensenkung teurer ist. Es gibt aber auch solche Zähler in tragbarer Form für den Haushalt, wenn Heiz- und Kochstrom zu einem billigeren Preis berechnet werden. Ein solcher Zähler läuft z. B. erst bei 200 W an, so daß er den Verbrauch einer normalen Lampe und von Kleingeräten nicht zählt, wohl aber den Verbrauch eines Zimmerofens, der auch vom Hauptzähler gezählt wird. Die Preisdifferenz wurde vergütet. Es besteht aber ein Unterschied gegenüber dem erstgenannten eigentlichen Spitzenzähler insofern, als bei diesem die Leistungsgrenze einstellbar ist.

Für die Messung des Überverbrauches gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten. Man gibt dem Zähler ein Gegendrehmoment, das der gewünschten Leistungsgrenze entspricht, so daß er erst nach Überwindung dieser Gegenkraft läuft. Das kann auf mechanischem Wege durch das periodische

Spannen einer Spiralfeder geschehen, die bei der Drehung immer wieder zurückschnellt, oder elektrisch mit einem entgegenwirkenden Ferraris-Triebwerk. In jedem Falle ist die Größe des konstanten Gegenmomentes zwecks Veränderung der Tarifgrenze vom E. W. einstellbar. Bei dem erwähnten Haushaltzähler ist dagegen die Scheibe mit passend bemessenen Schlitzen versehen, wodurch der Verlauf der Wirbelströme gestört ist und die Anlaufgrenze ohne Einstellmöglichkeit heraufgesetzt wird.

Bei der anderen Ausführungsart des Spitzenzählers ist ein Differentialgetriebe eingebaut. Das eine Sonnenrad wird vom Zähler, das andere mit konstanter Drehzahl von einem Farraris- oder Synchronmotor angetrieben. Beide Räder drehen sich entgegengesetzt. Haben sie gleiche Drehzahl, so steht das Planetenrad und das von diesem angetriebene Überverbrauchs-Zählwerk still. Es zählt, wenn der Zähler schneller läuft, wenn also die eingestellte Leistungsgrenze überschritten ist. Rückwärts kann es nicht zählen, weil die Kupplung nur in der Vorwärtsrichtung kraftschlüssig ist wie der Freilauf beim Fahrrad. Dieser Zähler hat außerdem ein normales Zählwerk für den Gesamtverbrauch.

c) Münzzähler

Das Vorbild dieses Zählers sind die bekannten Warenautomaten für Münzeinwurf. Es gibt auch bekanntlich für den Verkauf von Leuchtgas Münz-Gaszähler, die gelegentlich bei Kleinabnehmern aufgestellt sind. So sind auch für die Abgabe von elektrischer Arbeit gegen Münzen oder Wertmarken Zähler für fast alle Arten von Tarifformen entwickelt worden, auf die wir im einzelnen nicht eingehen wollen. Ein Beispiel zeigt Bild 38. Außer dem normalen Zähler enthält das Gehäuse in jedem Fall einen Kassiermechanismus mit einem Zählwerk für die Anzahl der eingeworfenen Münzen und mit einem Vorratsanzeiger für die noch nicht verbrauchten Münzen sowie einen Schalter, der die Anlage nach

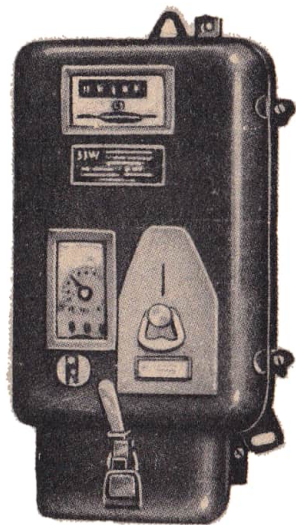


Bild 38. Münzzähler

Verbrauch der bezahlten Energie abschaltet. Diese Zähler sind besonders im Ausland eingeführt. Über ihre Zweckmäßigkeit kann man geteilter Ansicht sein. Sie sind für wirtschaftlich schwache Abnehmer gedacht, denen die Entrichtung kleiner Teilbeträge leichter fällt als die Bezahlung der Gesamtrechnung am Monatsende. Auf diese Weise sollen Zwangsmaßnahmen bei Nichtbezahlung der Rechnung vermieden werden.

d) Pendelzähler

Dieser Zähler wird lediglich aus geschichtlichem Interesse erwähnt, weil er eine beachtenswerte Lösung der genauen Wh-Zählung darstellte. Er wurde von Aron für Gleichstrom entwickelt, da man damals überwiegend Gleichstrom-Zentralen hatte, ist aber auch für Wechselstrom ausgeführt worden. Die Meßgrundlage ist die Schwingungsdauer des physikalischen Pendels. Zwei etwa 12 m lange Pendel, die unten je eine Spannungsspule haben, schwingen über je einer fest stehenden Stromspule. Die Spulen sind eisenlos, jedes System ist metrisch geschaltet. Die Stromrichtung ist so gewählt, daß bei dem einen Pendel durch Anziehung die Schwerkraft unterstützt, beim anderen durch Abstoßung geschwächt wird. Infolgedessen sind die Schwingungszahlen der Pendel verschieden, und es läßt sich mathematisch nachweisen, daß die Differenz genau proportional der Leistung $U \cdot I$ ist. Die beiden Stromspulen sind in Reihe und die Spannungsspulen parallelgeschaltet.

Die Gangdifferenz der Pendel wird durch ein Differentialgetriebe als Drehzahl auf das Zählwerk übertragen, das somit die Leistung über die Zeit integriert und die kWh anzeigt. Die Pendel werden wie bei einer Pendeluhr von einem Uhrwerk mit Hand- oder elektrischem Aufzug angetrieben. Ist nun $U \cdot I = 0$, so müßte das Zählwerk stillstehen. Das ist aber nur dann der Fall, wenn beide Pendel ohne Stromeinwirkung genau gleiche Schwingungszahlen haben, was infolge mechanischer Ungenauigkeiten und Temperatureinfluß nie zu erreichen ist. Diese Gangdifferenz, die Leerlauf bedeutet, wird dadurch unschädlich gemacht, daß die Drehrichtung des Zählwerks alle 10 min selbsttätig umgeschaltet wird. Was fälschlich gezählt wurde, wird also wieder zurückgeholt. Damit nun aber der Verbrauch richtig gezählt wird, werden gleichzeitig die beiden Spannungsspulen umgepolt. Überlegen Sie, welchen Einfluß das hat!

Der Pendelzähler ist zwar sehr genau, auch bei kleinen Belastungen, aber sehr teuer und empfindlich und daher durch den elektrodynamischen Motorzähler überholt.

Zusammenfassung

Die *Rücklaufhemmung* ist nötig, wenn der Zähler die Energie nur in einer Richtung zählen soll. Für die Messung in beiden Richtungen könnte ein Zähler mit Doppelzählwerk, das eine für Vorwärts- und das andere für Rückwärtslauf, verwendet werden. Mit Rücksicht auf den Reibungsausgleich ist es aber richtiger, zwei Zähler für Vorwärtslauf mit Rücklaufhemmung zu wählen.

Der *Maximumzähler* zeigt den Höchstwert der in einer Meßperiode von 15, 30 oder 60 min aufgetretenen Belastung als Mittelwert. Die Meßperioden wiederholen sich laufend.

Das *anzeigende* Gerät läßt nur den Höchstwert innerhalb des Zeitraumes zwischen zwei Rückstellungen des Zeigers erkennen.

Das *schreibende* Gerät schreibt den Mittelwert jeder Meßperiode auf einen Registrierstreifen mit Stundenteilung.

Das *druckende* Gerät ist zur Fernzählung geeignet, gesteuert von einem *Kontaktgeberzähler*. Die mittlere Leistung jeder Meßperiode wird als Zahl laufend auf das Registrierpapier gedruckt.

Der *Überverschub- oder Spitzenzähler* zählt den Verbrauch oberhalb einer durch das Tarifabkommen festgelegten Leistungsgrenze.

Der *Münzzähler* verkauft elektrische Arbeit gegen Einwurf von Münzen oder Wertmarken und schaltet die Anlage bei Nichtbezahlung ab.

Der *Pendelzähler* wurde hauptsächlich für Gleichstrom geschaffen. Er ist durch die billigeren und betriebssicheren Motorzähler überholt.

Übungen

12. Was bedeutet der Begriff „90° Abgleich“ beim Induktions-Meßwerk für Wirkverbrauch?
13. Wie wird dieser Abgleich erzielt?
14. Was versteht man unter Kleinlastregelung?

15. Wie wird die Stromdämpfung, die zusätzliche Bremsung durch Φ_I , annähernd ausgeglichen?
16. Warum hat der Zähler Zusatzfehler bei verzerrten Kurven?
17. Welchen Einfluß hat steigende Temperatur?
18. In welchen Ausführungen baut man das Induktions-Meßwerk als Blindverbrauch-Zähler?
19. Können Sie mit Formel (13) beweisen, daß der BV-Zähler nach dem Diagramm Bild 30 bei $\cos \varphi = 1$ stillsteht? Sie zeichnen zweckmäßig die Flüsse für Meßwerk II ein.
20. Sind die BV-Zähler im Schaltplan Bild 35 mit 90° , 60° oder 0° Abgleich ausgeführt?

Teil VII: Widerstände als Zubehör

1. Kapitel: Ohmsche Widerstände

An die Widerstände für Meßzwecke werden sowohl hinsichtlich des Werkstoffs wie auch der Ausführung hohe Anforderungen gestellt. Das Widerstandsmaterial soll einen möglichst hohen spezifischen Widerstand und einen möglichst kleinen Temperaturkoeffizienten haben. Der Widerstandswert soll sich weder infolge Alterung noch infolge Erhitzung auf die üblichen zulässigen Temperaturen ändern, und außerdem soll das Material eine kleine Thermospannung gegen Kupfer haben. Für viele Zwecke ist auch die mechanische Festigkeit wichtig. Denken Sie z. B. an Schleifdraht- und Schieb Widerstände für Meßbrücken!

Handelt es sich um einen Meßwiderstand für Wechselstrom, so müssen Sie seine Selbstinduktion und seine Kapazität beachten, denn diese verursachen eine Phasenverschiebung zwischen Strom und angelegter Spannung um einen kleinen Winkel, den *Fehlwinkel*. Im Ersatzschaltbild denken Sie sich die Selbstinduktion L in Reihe mit dem Ohmschen Widerstand R und die Kapazität C zu beiden parallel. Dann berechnet man den Fehlwinkel aus

$$\tan \delta = \omega \cdot \left(\frac{L}{R} - RC - \frac{\omega^2 C L^2}{R} \right) \quad L[H], R[\Omega], C[F]$$

Bei sehr kleinen Werten von L und C , die man doch bei einem Meßwiderstand für Wechselstrom anstrebt, kann man das letzte Glied in der Klammer vernachlässigen. Man nennt $T = \frac{L}{R} - RC$ die *Zeitkonstante*, denn der Ausdruck hat die Dimension der Sekunde, wenn Sie L , R und C durch V und A ausdrücken:

$$\left[\frac{Vs}{A} : \frac{V}{A} - \frac{V}{A} \cdot \frac{As}{V} \right] = [s]$$

Es ist also angenähert

$$\tan \delta \approx \omega \left(\frac{L}{R} - RC \right) \approx \omega T \quad (16)$$

Die Größenordnung von T ist 10^{-9} s. Der Wert liegt je nach der Ausführung der Widerstandwicklung etwa zwischen 1 und 1000 ns (Nanosekunde). Drahtwiderstände für Tonfrequenz z. B. müssen besonders induktions- und kapazitätsarm gewickelt werden, um T und damit δ vernachlässigbar klein zu erhalten.

Die Zeitkonstante T ist positiv, wenn $\frac{L}{R} > RC$, also $\frac{L}{R} = RC + \text{Konst.}$

Dann überwiegt der *induktive* Blindwiderstand, was aus der Umformung $L = R^2C + \text{Konst.} \cdot R$ hervorgeht. Der Meßwiderstand wirkt in diesem Fall wie ein Ohmscher Widerstand mit einer in Reihe geschalteten Selbstinduktion $L' = RT$. Sein Scheinwiderstand ist $Z = R + j\omega L'$, demnach $\tan \delta = \frac{\omega L'}{R} = \omega \cdot \frac{RT}{R} = \omega T$.

Ist andererseits $\frac{L}{R} < RC$, so werden T und damit δ negativ, und Sie können sich im Ersatzschema eine „wirksame“ Kapazität $C' = \frac{T}{R}$ denken,

die dem Meßwiderstand parallelgeschaltet ist.

Die wirksame Induktivität bzw. Kapazität können mit Spezial-Meßbrücken gemessen werden.

Aus der genauen Formel geht hervor, daß man zunächst sowohl L als auch C kleinhalten muß, damit das quadratische Glied der Klammer vernachlässigbar ist.

Außerdem sucht man bei der Wicklung L gegen C so abzugleichen, daß $\frac{L}{R} \approx RC$. Dann wird δ nach Formel (16) nahezu Null.

Daß δ bei Präzisionswiderständen tatsächlich sehr klein ist, zeigt Ihnen folgendes Lehrbeispiel.

Lehrbeispiel 3

Bei einem Meßwiderstand für Tonfrequenz wurden der Gleichstromwiderstand $R = 7000 \, \Omega \pm 0,02\%$ und die Zeitkonstante $T = 40 \cdot 10^{-9} \, s$ gemessen. Wie groß ist δ bei 5000 Hz und die wirksame Kapazität C' ?

Lösung: $\tan \delta \approx \omega T \approx 3,14 \cdot 10^4 (40 \cdot 10^{-9}) \approx 0,0013$

Bei so kleinen Werten können Sie für $\tan \delta$ die Bogenlänge (Radiant) setzen, also $\delta = 0,0013 \, \text{rad}$. Da $\frac{\pi}{2} \, \text{rad} = 90^\circ = 5400'$, so ist $\delta = \frac{5400' \cdot 2 \cdot 0,0013 \, \text{rad}}{\pi \, \text{rad}} \approx 4,5$.

Der Widerstand hat eine wirksame Kapazität $C' = \frac{T}{R} = \frac{40 \cdot 10^{-9} \, s}{7000 \, \Omega} = 5,7 \cdot 10^{-12} \, F$, also rund 6 pF.

[7] Normale. Normale sind feste Widerstände, für deren Ohm-Wert eine Fehlergrenze von $\pm 0,001\%$ und darunter zugesagt wird. Sie werden für Präzisionsmessungen in Prüf- und Eichräumen verwendet und für Nennwerte von $0,0001 \, \Omega$, $0,001 \, \Omega$, $0,01 \, \Omega$ und so dekadisch weiter bis $100000 \, \Omega$ geliefert. Das Widerstandsmaterial ist in der Regel Manganin wegen seines vernachlässigbar kleinen Temperaturkoeffizienten und seiner geringen thermoelektrischen Spannung gegen Kupfer und Messing, die nur $2 \dots 3 \, \mu V$ je $^\circ C$ (gegenüber etwa $40 \, \mu V$ bei Konstantandraht) beträgt.

Entscheidend für den Gebrauch als Normal ist die zeitliche Konstanz des Widerstandswertes. Daher werden die fertigen Widerstände etwa 24 Stunden lang auf $140^\circ C$ erhitzt, wenn die Drahtisolation aus Spinnstoffen besteht oder aus Lacken, die keine höhere Temperatur vertragen. Auf diese

Weise wird das Metall durch Ausgleich innerer Spannungen künstlich gealtert. Der Widerstand nimmt dabei nach Angaben der Hersteller um 1 . . . 2% ab. Danach darf das Material nicht mehr mechanisch durch Zug oder Druck beansprucht werden, und Sie dürfen auch nicht eine solche Widerstandsspule umwickeln. Auch eine übermäßige Erhitzung beim Gebrauch ist zu vermeiden, damit die Konstanz erhalten bleibt. Anschließend an die künstliche Alterung läßt man den Widerstand mehrere Monate lagern. Es hat sich gezeigt, daß die Konstanz besser wird, wenn die Glüh-temperatur zum Altern auf 300 . . . 550° C kurzzeitig erhöht wird. Das ist möglich, wenn das Widerstandsmaterial blanker Draht oder Blech ist. Neben Manganin wird gelegentlich eine Gold-Chrom-Legierung mit 2% Chrom verwendet, die eine besonders gute Konstanz nach einer Wärmebehandlung mit niedriger Temperatur aufweist, so daß dünne seidenumspinnene Drähte verwendet werden können. Allerdings ist die Thermo-spannung gegen Kupfer höher; sie beträgt etwa $7 \cdot \cdot \cdot 8 \mu V/^{\circ} C$.

Der Widerstand ist in der gebräuchlichen Ausführung des Normals in einem mit Lüftungslöchern versehenen Blechtopf untergebracht. Dieser trägt zwei starke Kupferanschlüsse mit den Stromklemmen und zwei Potentialklemmen, zwischen denen der Spannungsabfall gemessen wird, denn als Nennwiderstand gilt der Ohm-Wert zwischen den Potentialklemmen. Als Potentialklemmen bezeichnet man Klemmen, die direkt an den Enden des normalen Widerstandes ohne zwischenliegende Zuleitungen angebracht sind. Bild 39 zeigt ein Ausführungsbeispiel. Die Nennstromstärke ist so niedrig vorgeschrieben, daß bei der Messung nur eine geringfügige Erwärmung auftritt. Bei besonders genauen Messungen wird der Widerstand in ein Petroleumbad mit Rührwerk und Thermometer gebracht, um damit die gleichmäßige Erwärmung des Widerstandes sicherzustellen und mit Hilfe der Thermometerablesung auch noch die geringe Widerstandsänderung berücksichtigen zu können. Daß das keine Spitzfindigkeit ist, erläutert Ihnen folgendes Lehrbeispiel.



Bild 39
Widerstandsnormal

Lehrbeispiel 4

Ein Manganin-Normal mit $10\ \Omega$ Nennwiderstand bei 20°C wird gleichmäßig um 10°C erwärmt. Für Manganin ist $\alpha_{20} = 1 \cdot 10^{-5}\ ^\circ\text{C}^{-1}$. Wie groß ist die Widerstandszunahme ΔR ?

Lösung:

$$\Delta R = R_{20} [\Omega] \cdot \alpha_{20} [^\circ\text{C}^{-1}] \cdot \Delta t [^\circ\text{C}] = 10 \cdot 10^{-5} \cdot 10 = \underline{\underline{10^{-3}\ \Omega}}$$

Die Widerstandszunahme $0,001\ \Omega$ ist um eine Zehnerpotenz größer als die Fehlertoleranz $\pm 0,001\%$ des Normals $\triangleq \pm 0,0001\ \Omega$! Allerdings hat diese Überlegung nur für physikalische Messungen Interesse, weil die meisten Messungen der Praxis mit technischen Geräten die Genauigkeit des Normals nicht auszunutzen gestatten.

Der Widerstand zwischen den Kupferanschlüssen wird bei kleinen Werten bis $1\ \Omega$ aus bifilar angeordneten Manganinblechen gebildet, so daß die Induktivität verschwindend klein wird, denn bei kleinem R muß nach Formel (16) L kleingehalten werden. Das trifft auch noch für Drahtwiderstände bis etwa $100\ \Omega$ zu, die in der Ihnen bekannten Weise durchgehend bifilar gewickelt werden. Die Eigenkapazität, die dadurch entsteht, daß Hin- und Rückdraht mit verschiedenem Potential nebeneinanderliegen, ist in diesem Widerstandsbereich noch verhältnismäßig klein. Darüber hinaus muß man kapazitätsarm wickeln, damit das Glied RC in der Klammer nicht zu groß wird.

Bei der Wicklungsart nach Chaperon (siehe „Grundlagen der Elektrotechnik“ Lbf. 7.) für Spulen über $100\ \Omega$ unterteilt man den Gesamtwiderstand in Einzelspulen, die nebeneinander auf einem Metallzylinder sitzen. Bei der Einzelspule wird nach jeder Lage der Wicklungssinn umgekehrt. Dadurch wird die Induktivität nahezu kompensiert, und durch die Unterteilung wird die Lagenspannung bei jeder Spule klein und damit auch die Eigenkapazität. Außerdem kann man L gegen C so abgleichen, daß $\frac{L}{R} \approx RC$ wird, und erhält somit eine praktisch vernachlässigbare kleine Zeitkonstante.

Dasselbe ist bei der Wicklung nach Wagner und Wertheimer für hochohmige Widerstände der Fall. Die Unterteilung in Einzelspulen ist hier

noch weitergetrieben, und jede Spule sitzt für sich auf einem geschlitzten Metallzylinder (Wirbelströme!), der ihr ein bestimmtes Potential gibt. Die Spulen und Metallzylinder sind durch Isolierscheiben voneinander getrennt und auf ein gemeinsames Isolierrohr geschoben.

[8] Veränderliche Präzisionswiderstände. Ein Widerstandssatz, bestehend aus Einzelwiderständen nach den beschriebenen Wickelmethode[n] und untergebracht in einem Kasten, ergibt einen in Stufen veränderbaren Meßwiderstand, bei dem die Widerstandsrollen an einer Isolierplatte be-

festigt sind. Diese Platte bildet den Deckel des Kastens. Sie trägt oben Messingkontakte. Je nachdem,

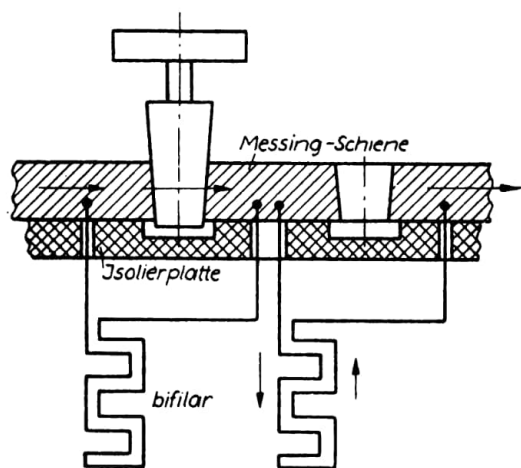


Bild 40. Schema der Stöpselschaltung

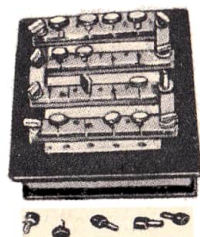


Bild 41. Stöpselwiderstand

wie diese geschaltet werden, unterscheidet man Stöpsel- und Dreh-schalterwiderstände.

Beim *Stöpselwiderstand* kann jede Einzelspule durch einen kegelförmigen Stöpsel mit isoliertem Handgriff kurzgeschlossen werden, wie aus Bild 40 hervorgeht. Ist also der Stöpsel herausgezogen, so ist der an dem betreffenden Stöpselloch vermerkte Widerstandswert *eingeschaltet*. Die Anordnung zeigt Bild 41. Die Anordnung ist verschieden, aber die Abstufung der Einzelwiderstände ist immer dekadisch, indem man z. B. hintereinanderschaltet:

0,1 — 0,2 — 0,2 — 0,5 — 1 — 2 — 2 — 5 — 10 usw.

Auf diese Weise kann man Widerstandswerte im Abstand von $0,1 \, \Omega$ einschalten. Wie Sie aus dem Bild erkennen, sind die Messingklotz-Reihen mit Laschen in Reihe geschaltet. Nach Entfernung dieser Laschen können Sie jede Widerstandsreihe für sich benutzen. Jeder Messingklotz hat außerdem ein Loch für einen Klemmenstöpsel. Da zwischen zwei Klötzen der Einzelwiderstand liegt, kann er für sich allein eingeschaltet werden, d. h. ohne die Übergangswiderstände der Verbindungsstöpsel. Auch kann man mit einem solchen Stöpsel die Spannung zwischen den Anschlußklemmen unterteilen (Potentiometer).

Der Vorteil der Stöpselschaltung ist der geringe Übergangswiderstand, der bei guter Pflege der Kontaktflächen in der Größenordnung $5 \cdot 10^{-5} \, \Omega$ liegt. Es wird empfohlen, die Flächen häufig mit etwas Petroleum zu reinigen, sehr selten mit feinstem Schmirgelpapier. Die Stöpsel werden mit etwas Drehung mäßig fest eingesetzt und bei Nichtgebrauch gelockert.

Sie müssen sorgfältig darauf achten, daß die *Widerstände nicht überlastet* werden. Die vom Hersteller angegebene zulässige Stromstärke ist etwa bei den Zehnteln 1 A, bei den Einern 0,5 A, bei den Zehnern 0,15 A, bei den Hunderten 0,05 A, bei den Tausendern 15 mA.

Als *Fehlergrenze* wird bei guter Ausführung angegeben: bei Widerständen von $1 \, \Omega$ aufwärts $\pm 0,02 \, \%$, unter $1 \, \Omega \pm 0,1 \, \%$ bei Gleichstrom und bei Wechselstrom dementsprechend bis 1000 Hz über $10 \, \Omega$ bei 100 Hz unter $10 \, \Omega$.

Bei höheren Frequenzen macht sich die Kapazität zwischen den Messingklötzen störend bemerkbar, die bei Drehschaltern mit ihrem größeren Kontaktabstand geringer ist.

Der *Drehschalterwiderstand* ist zwar etwas bequemer in der Schaltung, weil Sie den Widerstandswert einer Dekade einfach durch Drehen des Schalters auf den entsprechenden Kontakt erhalten, aber der Übergangswiderstand zwischen der Schleifbürste und dem Kontaktklotz ist etwas größer (etwa $2 \cdot 10^{-4} \, \Omega$). Dafür ist, wie gesagt, die Kapazität zwischen den Anschlüssen geringer, so daß diese Bauart für höhere Frequenzen geeigneter ist. Bei älteren Geräten finden Sie die im Halb- oder Vollkreis angeordneten Kontaktklötze offen auf dem Deckel aus Isolierstoff und

eine Kurbel mit den Schleifbürsten, bei der die Gefahr der unsicheren Kontaktgabe besteht. Bei neueren Geräten ist die Isolierplatte mit den Kontakten durch eine Blechplatte als Schutz gegen Licht und Staub abgedeckt, die gleichzeitig gegen ein elektrisches Fremdfeld abschirmt. An Stelle der Kurbel hat man heute den Drehschalter mit einer kräftigen Feder, die einen gleichmäßig hohen Kontaktdruck erzeugt, und einer fühlbaren Raste in jeder Kontaktstellung. An dem Schalter ist eine Nummernscheibe befestigt. Die Ziffer der Schalterstellung erscheint in einer Aussparung der Deckplatte (Bild 42), wodurch die Ablesung der Gesamteinstellung erleichtert wird. Man hat 10 oder 11 Schalterstellungen; $0 \dots 9$ oder $0 \dots 10$; im letzten Fall greift also die 11. Stellung in die nächste Dekade über. Außer diesen Mehrdekaden-Widerständen werden auch Einzeldekaden-Widerstände gebaut, z. B.

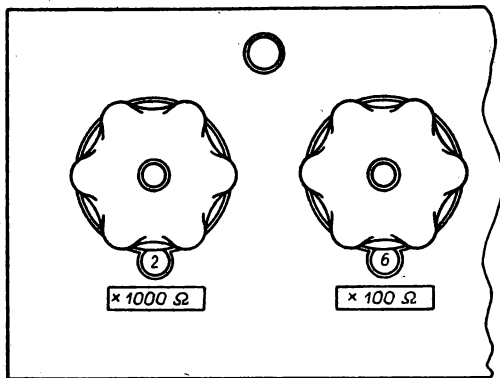


Bild 42. Drehschalter-Dekadenwiderstand

$$10 \times 0,1 \, \Omega \text{ oder } 11 \times 10000 \, \Omega$$

Sie können damit vorhandene Widerstände erweitern.

Präzisions-Meßsätze mit Drehschaltern werden für Tonfrequenz bis etwa 10^4 Hz mit den oben für Stöpselwiderstände angegebenen Fehlergrenzen gebaut. Die Kästen haben eine Metallauskleidung zur Schirmung, die mit einer Erdklemme verbunden ist.

[9] Hochohmwiderstände. Als Vorwiderstände für Meßgeräte werden bei geringen Genauigkeitsansprüchen *Drahtwiderstände nach DIN 41410* bis $100 \, \text{k}\Omega$ hergestellt, wobei der Draht bifilar auf ein kleines Porzellanrohr gewickelt ist, das an den Enden Schellen mit Lötfahnen oder Anschlußschrauben erhält und gegen Beschädigung und Feuchtigkeitseinfluß lackiert wird. Ein solcher Widerstand für z. B. $10 \, \text{k}\Omega$ hat die Abmessun-

gen 10 mm \varnothing und 45 mm Länge. Die Widerstandstoleranzen sind 5 oder 10% in Sonderausführung 1%.

Für höchste Ohmwerte und insbesondere für Ton- und Hochfrequenz hat sich der *Schichtwiderstand* bewährt, bei dem auf einem Isolierkörper eine Kohleschicht aufgebracht ist. Sie kennen ihn vermutlich in Form eines Stäbchens mit Lötflächen, wie er in verschiedenen Größen im Rundfunkapparat eingebaut ist. Auf einem Porzellanstäbchen oder -röhrchen — die Größe richtet sich nach der zulässigen Belastung — wird im elektrischen Vakuumofen bei Glühtemperatur aus einem Kohlenwasserstoff eine feinkristalline Kohleschicht von im Mittel $0,1 \cdot 10^{-3}$ mm Stärke abgeschieden. Man kann die Bekohlung so steuern, daß man ohne Nachbehandlung Widerstandswerte von etwa $20 \Omega \dots 100 \text{ k} \Omega$ erhält. Für höhere Werte bis über $100 \text{ M} \Omega$ schleift man aus der zylindrischen Kohleschicht eine Wendel heraus, so daß um den Porzellanstab ein Kohleband in Form einer Schraubenlinie läuft. Je nach der Steigung dieses „Gewindes“ und der Breite des Kohlebandes erhält man verschiedene Widerstandswerte.

Die *Dauerbelastbarkeit* hinsichtlich der Erwärmung ist durch die Abmessungen des Stabes bestimmt. Es werden Widerstände für 0,5 W bis über 200 W hergestellt.

Die *Eigenkapazität* ist gering. Sie beträgt beim 1-W-Widerstand etwa 0,4 pF. Die *Induktivität* läßt sich selbst bei höchsten Frequenzen und einer Wendel mit vielen Windungen durch ein Spezial-Schleifverfahren nach dem Chaperon-Prinzip so herabsetzen, daß der Fehlwinkel praktisch Null wird.

Dieser Schichtwiderstand erhält bekanntlich an den Enden Kontaktkappen oder Schellen. Die Kohleschicht wird durch einen Lacküberzug geschützt.

Wenn Sie diesen Widerstand als Meßwiderstand benutzen, müssen Sie wissen, daß die Fehlertoleranz im allgemeinen $\pm 5\%$ und bei den billigen Erzeugnissen für Rundfunkzwecke sogar nur $\pm 10\%$ ist. Bei Sonderanfertigung läßt sich eine kleinste Toleranz von $\pm 1\%$ erreichen. Außerdem hat die Kohleschicht einen negativen Temperaturkoeffizienten von $-0,2 \cdot 10^{-3}$ bis $-2 \cdot 10^{-3}/^\circ \text{C}$. Der Wert ist vom Herstellungsverfahren und von der Schichtdicke abhängig; er ist hoch bei dünnen Schichten.

Schichtwiderstände in Stabform werden auch für Hochspannung hergestellt, wobei der Ausschleiß der Wendel entsprechend der Windungsspannung bemessen wird.

Einen hochohmigen Begrenzungswiderstand für Messungen im Hochspannungsprüffeld können Sie sich leicht dadurch beschaffen, indem Sie einen passenden Gummischlauch mit reinem Wasser füllen und beide Enden mit Stopfen verschließen, durch die die Stromzuführungen hindurchgehen.

[10] Eisen-Wasserstoff-Widerstand. Sie haben gesehen, daß man für Präzisionswiderstände einen Werkstoff nehmen muß, dessen Temperaturkoeffizient möglichst Null ist. In anderen Fällen ist die Änderung des Widerstandes mit der Temperatur erwünscht. Denken Sie an die bereits erwähnte Verwendung eines Widerstandes als Thermometer! Bei einer Kohlefadenlampe ist der Widerstand bei der Glühtemperatur etwa die Hälfte des Wertes in kaltem Zustand. Eine ähnliche Charakteristik haben bekanntlich Metalloxyde, so daß Sie entsprechend bemessene Vorwiderstände in Sonderfällen als selbsttätige Anlasser verwenden können.

Im Gegensatz dazu steigt der Widerstand der Metalldrahtlampe vom kalten zum warmen Widerstand auf das 8- bis 10fache. Sie können die Lampe z. B. als Vorwiderstand für ein Realis benutzen, das bei niedrigen Spannungen hochempfindlich ist, weil der Widerstand klein ist, während bei hohen Spannungen ein Durchbrennen durch den steigenden Widerstand verhütet wird (Erdschlußrelais, Nullspannungs-Voltmeter zum Synchronisieren).

Der Eisen-Wasserstoff-Widerstand ist eine mit Wasserstoff gefüllte Glühlampe, deren Leiter nicht aus Wolfram, sondern aus Eisen besteht, weil dieses einen höheren Temperaturkoeffizienten hat. Der Wasserstoff hat nur den Zweck, die Wärme des Eisendrahtes rasch abzuleiten. Dazu ist H_2 wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit besonders geeignet.

Sie sehen in Bild 43 die Kennlinie eines solchen Widerstandes. Durch passende Wahl der Abmessungen erhält man eine praktisch konstant bleibende Stromstärke im Bereich einer Spannungsschwankung von etwa 1 : 3 an den Klemmen des Widerstandes, weil der Widerstand des

Eisendrahtes in diesem Bereich etwa linear mit der Spannung steigt, so daß $I = \frac{U + \Delta U}{R + \Delta R} = \text{konst.}$

Darüber hinaus ist ΔR nicht mehr verhältnismäßig ΔU ; demnach steigt I an, und jetzt besteht die Gefahr der Überlastung der Lampe,

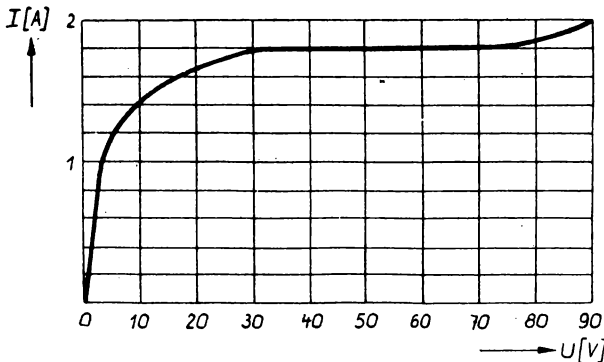


Bild 43. Strom-Spannungskennlinie eines Eisen-Wasserstoff-Widerstandes

weil mehr Wärme erzeugt wird, als die Oberfläche zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichtszustandes abführen kann: Der Faden kann durchbrennen.

Aus der Kennlinie ersehen Sie, daß Sie den Widerstand im geradlinigen Teil als einen einfachen selbsttätigen Regler verwenden können, um die Stromaufnahme eines Gerätes, dem Sie diesen Widerstand vorschalten, bei Spannungsschwankungen der Stromquelle annähernd konstant zu halten. Der Eisen-Wasserstoff-Widerstand muß für den Nennstrom dieses Gerätes und für die nötigen Spannungsgrenzen an seinen Klemmen bemessen sein.

Lehrbeispiel 5

Der Nennstrom 1,8 A eines Gerätes mit 95 Ω Widerstand soll bei einer Schwankung der Netzspannung (220 V) von ± 10 V konstant bleiben.

Lösung:

Der Spannungsabfall am Gerät ist $1,8 \text{ A} \cdot 95 \Omega \approx 170 \text{ V}$. Bei 220 V Netzspannung muß somit der Abfall am Vorwiderstand $220 \text{ V} - 170 \text{ V} = 50 \text{ V}$

bei 1,8 A sein. Dafür paßt der Eisen-Wasserstoff-Widerstand mit der Kennlinie Bild 43. Ändert sich die Netzspannung um ± 10 V, dann ist der Spannungsabfall am Widerstand 60 V bzw. 40 V bei konstantem Strom von 1,8 A.

Sie haben natürlich bemerkt, daß dieser thermische Stromregler als Vorwiderstand einen dauernden Leistungsverlust bedingt.

Zusammenfassung

Der Ohmsche Widerstand ist ein wichtiges Zubehör für elektrische Messungen, sowohl der einfache feste oder regelbare Widerstand zur Strombegrenzung als auch der Meßwiderstand, von dessen Präzision hinsichtlich Ausführung und Fehlertoleranz das Meßergebnis abhängt. Zeitliche Konstanz sowie geringste Temperaturabhängigkeit und Thermospannung werden mit sorgfältig hergestelltem und gealtertem Widerstandsmaterial (hauptsächlich Manganin) erreicht.

Zur Verwendung bei technischem Wechselstrom und insbesondere für Tonfrequenz muß außerdem der Fehlwinkel, die Phasenverschiebung zwischen durchfließendem Strom und angelegter Spannung, durch induktions- und kapazitätsarme Wickelarten möglichst klein gehalten werden.

Ein Widerstandsnormale ist ein auf die höchste erreichbare Genauigkeit abgeglicher fester Vergleichswiderstand zur Eichung von Meßgeräten. Veränderliche Meßwiderstände erhält man durch Reihenschaltung verschiedener Stufen zu einem Widerstandssatz. Die gewünschten Ohm-Werte werden in Dekaden entweder mit Stöpseln oder mit Drehschaltern geschaltet.

Kohleschichtwiderstände werden bis zu den höchsten üblichen Ohm-Werten hergestellt und sind insbesondere für Hochfrequenz geeignet. Der Eisen-Wasserstoff-Widerstand wird als Stromregler verwendet, weil seine Kennlinie $I = f(U)$ in einem bestimmten Spannungsbereich praktisch geradlinig ist.

Übungen

21. Können Sie mit Hilfe der symbolischen (komplexen) Rechnung nachweisen, daß bei einem Meßwiderstand mit negativer Zeitkonstante T der Zahlenwert T/R die wirksame Kapazität C' angibt?

22. Was versteht man unter der Alterung eines Widerstandes?
23. Welchen Zweck hat die bifilare Wicklung?
24. Vergleichen Sie die Vor- und Nachteile der Stöpsel-Widerstandssätze mit den Drehschalterwiderständen!
25. Warum läßt sich ein Kohle-Schichtwiderstand nicht als Präzisions-Widerstand ausführen?

2. Kapitel: Induktive Widerstände

[11] Normale. Um induktive Widerstände, als Drosselspulen, zu messen, können Sie wie bei Ohmschen Widerständen eine Meßbrücke benutzen. Das Meßverfahren wird später beschrieben. Es handelt sich grundsätzlich um den Vergleich der unbekannten mit einer bekannten Induktivität in einer Wheatstone-Brücke für Scheinwiderstände.

Da der induktive Widerstand durch ωL definiert ist, braucht man also für diesen Vergleich *Normale* des Koeffizienten L [H], der bekanntlich

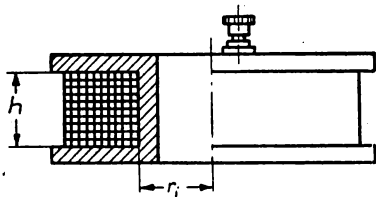


Bild 44. Normal der Selbstinduktion

hauptsächlich durch die Abmessungen einer Spule (Bild 44) bestimmt ist. Die Spule ist auf einen Körper aus Marmor oder Porzellan gewickelt. Es darf kein Werkstoff verwendet werden, der Eiseneinschlüsse hat; auch soll Eisen bei sorgfältigen Messungen nicht in das Streufeld der Spule gebracht werden, denn

die Magnetisierung des Eisens bewirkt wegen seiner nicht konstanten Permeabilität eine geringe Abhängigkeit des L von der Stromstärke.

Für Wechselstrom bis 10^4 Hz sind Normale in den Abstufungen 0,0001 H, 0,001 H usw. bis 1 H gebräuchlich.

Sie wissen, daß eine solche Spule kein reiner Blindwiderstand ist, weil die Wicklung Ohmschen Widerstand und außerdem Eigenkapazität hat. Letzte wird durch eine kapazitätsarme Wickelart so klein wie möglich gehalten, so daß sie bei Nieder- und Mittelfrequenz vernachlässigt werden kann. Sie liegt etwa zwischen 25 und 250 pF. Die Phasenverschie-

bung zwischen Strom und Spannung errechnet sich demnach aus $\tan \varphi = \frac{\omega L}{R} = \omega T$. Dabei ist $T = L/R$ die *Zeitkonstante* der Spule, die aber nicht konstant, sondern etwas frequenzabhängig ist, weil R infolge Stromverdrängung durch Wirbelströme mit steigender Frequenz zunimmt. Durch die Verwendung von Litze mit etwa 100 bis 200 isolierten Einzeldrähten statt eines Leiters mit einem vollen Cu-Querschnitt erzwingt man durch die gleichmäßige Verdrillung der Einzeldrähte die volle Ausnutzung des Querschnitts, so daß ΔR bis zur Grenzfrequenz, für die die Spule gebaut ist, geringfügig bleibt. Unter Grenzfrequenz versteht man die Frequenz, bis zu der die Widerstandszunahme des Ohmschen Widerstandes vernachlässigbar klein bleibt. Gleichzeitig wird dadurch auch L hinreichend frequenzunabhängig, denn bei einer Volldrahtwicklung würde durch die Stromverdrängung in Richtung zu der Spulenachse infolge der Wirbelströme eine Verringerung des wirksamen Spulendurchmessers und damit des L eintreten.

Da R nie gleich Null sein kann, ist der Phasenwinkel φ niemals 90° , wie es bei einem reinen Blindwiderstand sein müßte. Der Winkel $\delta = 90^\circ - \varphi$ wird als *Verlustwinkel* bezeichnet und $\tan \delta = \frac{R}{\omega L}$ als *Verlustfaktor* in Anlehnung an die Bezeichnungen beim Kondensator.

Gegeninduktions-Normale haben eine Primär- und eine Sekundärspule.

[12] Regelbare Induktivitäten. *Stufenweise veränderbare Normale* werden gelegentlich hergestellt, indem man die Wicklung der Spule mit Anzapfungen versieht. Bequemer im Gebrauch sind *stetig veränderbare Induktivitäten*, die auch als *Variometer* bezeichnet werden. Es sind zwei in Reihe geschaltete Spulen, deren Lage zueinander Sie stetig verändern können. Entweder ist die bewegliche Spule innerhalb der festen Spule um eine Achse drehbar, die parallel zu den Windungsebenen geht, oder eine Flachspule wird gegen eine feste Flachspule seitlich verschoben. Die Stellung der beweglichen Spule ist durch einen Zeiger über einer Skala erkennbar, und man wählt die Spulenform derart, daß die Eichkurve für den größten Teil der Skala nahezu geradlinig wird. Die Wicklungen können in Gruppen unterteilt sein, um mehrere Meßbereiche zu erhalten.

Wenn Sie die Spulen nicht in Reihe schalten, sondern die eine als primäre und die andere als sekundäre verwenden, haben Sie ein *Variometer der Gegeninduktivität*.

[13] Spulen für Hochfrequenz. Hochfrequenz-Normale der Selbstinduktivität müssen besonders sorgfältig aufgebaut sein hinsichtlich geringster Widerstandserhöhung durch Stromverdrängung, kleinster Eigenkapazität und möglichst geringer dielektrischer Verluste der Kapazität. Außerdem soll der Isolationswiderstand sehr hoch sein. Diese Forderungen müssen erfüllt werden, damit L möglichst frequenzunabhängig ist.

Auch bei Spulen, die zum Aufbau von Schwingkreisen, Übertragungs- und Sperrgliedern dienen, müssen die Verluste möglichst niedrig sein, wie Sie aus „Grundlagen der Elektrotechnik“ wissen. Die Größe des *Verlustfaktors* $\tan \delta = \frac{R}{\omega L}$ — der reziproke Wert wird als *Gütefaktor* G bezeichnet — ist außer von ω noch von dem Wirkwiderstand R abhängig, der bestimmt ist

1. durch den Ohm-Wert der Wicklung, ansteigend bei Verminderung des wirksamen Querschnitts infolge Stromverdrängung,
2. durch Wirbelströme in allen Leitern, die im Spulenfeld liegen,
3. durch dielektrische Verluste in der Leiterisolation und im Spulenträger,
4. durch Strahlungsverluste, die aber erst bei höchsten Frequenzen und großem Spulendurchmesser merkbar werden.

Punkt 1 erfordert bei mehrlagigen Spulen die *Hochfrequenzlitze* mit verdrehten isolierten Einzeldrähten unter Verwendung einer kapazitätsarmen Wickelart. Der Vorteil der Litze gilt allerdings nur bis zu einer *Grenzfrequenz*, die vom Durchmesser der Litze, ihrer Ganghöhe und der Anzahl der Einzeldrähte abhängt. Oberhalb dieser Frequenz ist Volldraht günstiger. Kommt man bei kleineren Werten von L mit einer einlagigen Spule aus, so hat eine freitragende *blanke* Wicklung den Vorteil, daß Verluste durch die Isolation und den Spulenkörper fortfallen (Punkt 3). Wegen der Stromverdrängung zur Oberfläche versilbert man dann den Leiter und nimmt auch gelegentlich Kupferrohr statt Vollkupfer. Die freitragende Spule setzt genügende mechanische Festigkeit voraus, andernfalls ist ein

Träger mit niedrigen dielektrischen Verlusten unerlässlich, auf den die Wicklung unter Zug möglichst in eingeschnittene Rillen eingelegt wird. Für Präzisionsspulen werden als Träger *keramische Spezialmassen mit niedrigem Verlustfaktor* verwendet, die noch bei den Hochfrequenz-Kondensatoren besprochen werden. Um eine einlagige Wicklung unverrückbar festzulegen, wird sie als Silberbelag in die Oberfläche eingebrannt; diese Silberwicklung kann nachträglich galvanisch beliebig verstärkt werden (Bild 45).

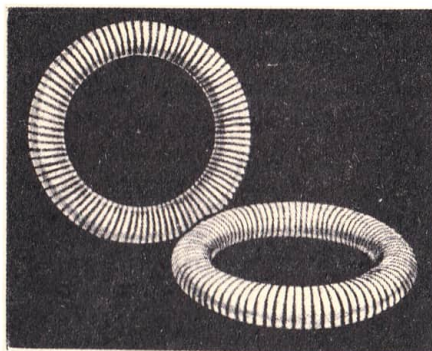


Bild 45. Ringspulen mit keramischem Träger und aufgebrannten Windungen

Wenn Sie eine Spule mit einem Eisenkern versehen, dann brauchen Sie bekanntlich für ein bestimmtes L erheblich weniger Windungen als bei Luft wegen der besseren magnetischen Leitfähigkeit. Also werden die Kupferverluste kleiner, dafür haben Sie aber die Eisenverluste. Durch Verwendung der *Massekerne* aus feinstem Eisenpulver (chemisch gewonnenes Karbonyleisen mit einer Kugelchengröße von $2 \cdot \cdot \cdot 6 \text{ m } \mu$), mit isolierenden und bindenden Stoffen derart gemischt, daß jedes Kugelchen allseitig isoliert ist, gelingt es bei passender Wahl der Abmessungen, daß die Abnahme der Kupferverluste größer wird als die entstehenden Eisenverluste. Damit wird der Gütefaktor $\omega L/R$ der Spule mit HF-Massekern für den vorgesehenen Frequenzbereich besser als bei einer Luftspule, und der Raumbedarf ist außerdem um etwa $75 \cdot \cdot \cdot 80\%$ kleiner.

Durch Verlagerung des Kerns im Spulenfeld (z. B. Abstimmerschraube) können Sie L verändern und auf einen gewünschten Wert abgleichen.

Zusammenfassung

Normale der Selbstinduktion sowie der gegenseitigen Induktion werden für Meßzwecke als genaue induktive Vergleichswiderstände gebaut. Für

einen festen Wert hat man für Nieder- und Mittelfrequenz Kreisspulen mit rechteckigem Wickelquerschnitt, die auf einen Keramikkörper eisenfrei gewickelt sind.

Veränderbare Induktivitäten (Variometer) erhält man mit zwei in Reihe geschalteten Spulen, deren Lage zueinander stetig geändert wird.

Infolge der Wirkverluste ist ein reiner Blindwiderstand ωL nicht erreichbar. Man sucht den Verlustfaktor $\tan \delta = \frac{R}{\omega L}$ durch konstruktive Maß-

nahmen möglichst klein bzw. den Gütefaktor $G = \frac{R}{L \omega}$ möglichst groß zu bekommen. Zu diesem Faktor gehört noch die Angabe der Frequenz. Bei Hochfrequenz steigen die Wirkverluste infolge der Stromverdrängung, der Wirbelströme und der kapazitiven Ströme im Dielektrikum stark an, so daß nicht nur ein Normal-, sondern auch Spulen für Schwingkreise usw. besonders sorgfältig aufgebaut sein müssen.

Die HF-Massekerne ermöglichen die Verringerung des Spulenvolumens.

Übungen

26. Sie erhalten die kleinste Drahtlänge für einen gegebenen L -Wert, wenn die Spule wie in Bild 44 einen quadratischen Wicklungsquerschnitt hat, dessen Seitenlänge h gleich dem Innenradius r_i ist. Dann gilt bei n Windungen die Formel

$$L = 25,4 \cdot h \cdot n^2 \cdot 10^{-9} [H], \text{ wobei } h \text{ in cm umzusetzen ist.}$$

a) Sie sollen hiernach mit einem Draht von $d = 0,105 \text{ cm } \varnothing$ einschl. Isolation eine Spule mit $L = 0,01 \text{ H}$ wickeln. Welche Abmessungen erhält sie?

Lösungsweg: Sie haben in der Formel scheinbar zwei Unbekannte, aber beim quadratischen Querschnitt sind in einer Lage rund \sqrt{n} Windungen, demnach ist $h = \sqrt{n} \cdot d$.

b) Wie groß ist $\tan \delta$ dieser Spule bei 50 Hz und 20° C , wenn der obige Draht Vollkupfer (1 mm \varnothing ohne Isolation) ist? Stromverdrängung und Eigenkapazität sind zu vernachlässigen.

27. Warum verwendet man Massekerne nicht für Niederfrequenz-Spulen?

3. Kapitel: Kapazitive Widerstände (Kondensatoren)

[14] **Konstante und regelbare Normale.** Zum Messen kapazitiver Widerstände braucht man Kapazitätsnormale, sogenannte *Gebrauchs- oder Sekundärnormale*. Ein solches kann nach einem *absoluten oder Primärnormal* geeicht werden. Das ist ein Kondensator, dessen Kapazität genau aus den Abmessungen berechnet werden kann. Sie denken jetzt an den Plattenkondensator. Vergessen Sie aber nicht, daß die einfache Formel zur Berechnung von C aus der Dielektrizitätskonstante (DK), aus der Fläche der Platten und deren Abstand *nicht* das inhomogene Feld an den Rändern berücksichtigt. Beim *Schutzring-Kondensator* nach dem Schema Bild 46

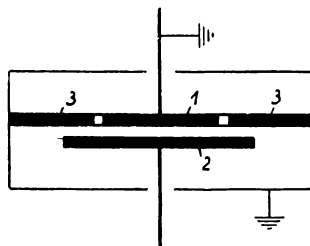


Bild 46. Schema des Schutzring-Kondensators

kann jedoch die Kapazität der Kreisplatten 1 und 2 mit Luft als Dielektrikum exakt berechnet werden. Durch den Schutzring 3, der mit dem abschirmenden Gehäuse verbunden ist, wird die Randwirkung beseitigt, wenn 1 und 3 gleiches Potential haben.

Ein Gebrauchsnormal, das z. B. nach einem solchen absoluten Normal geeicht wird, kann in einfacherer Bauart hergestellt werden. Die Genauigkeit seines Eichwertes ist aber durch die unvermeidlichen Meßfehler und durch die Unvollkommenheiten des Materials begrenzt. Von einem guten Kondensator verlangt man

1. zeitliche Konstanz des Kapazitätswertes;
Diese Forderung ist nicht vollkommen zu verwirklichen, da mechanische Änderungen, Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse sowie Alterungserscheinungen die Konstanz verhindern.
2. möglichst kleine dielektrische Verluste bei großer DK;
3. hohen Isolationswiderstand und hohe Durchschlagfestigkeit;
4. Abschirmung zur Begrenzung des Feldes nach außen.

Wie Sie sich erinnern werden, ist der Kondensator der Praxis kein reiner Blindwiderstand, sondern er hat Wirkverluste durch den Isolationsstrom

und zusätzlich bei Wechselstrom durch die ständige Umelektrisierung des Dielektrikums. Das Verhältnis dieser Wirkverluste N_w zur reinen Blindleistung ist der *Verlustfaktor* $\tan \delta$, wobei δ der sehr kleine sogenannte *Verlustwinkel* ist, der im Vektordiagramm an dem idealen Phasenwinkel von 90° zwischen Strom und Spannung fehlt. Die im Dielektrikum verbrauchte Leistung ist also

$$N_w = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \tan \delta \text{ [W]}.$$

Eingesetzt wird dabei U [V] und C [F].

$\tan \delta$ ist ein Kennzeichen des Isolierstoffes; aber dieser Wert ist *keine Konstante*, sondern abhängig von der Frequenz, der Temperatur und der Feuchtigkeit. Bei manchen Stoffen steigt $\tan \delta$ mit der Frequenz, bei anderen fällt der Wert, und es können auch Maxima und Minima vorkommen, insbesondere bei inhomogenen Stoffen. Dasselbe gilt für die Temperaturabhängigkeit. Angaben über den Frequenz- und Temperaturgang von $\tan \delta$ finden Sie in den Listen der Hersteller von Isolierstoffen oder in Tabellen.

Bemerkenswert ist der Einfluß der Spannung auf $\tan \delta$. Die Kurve verläuft mit wachsender Spannung etwa linear bis zu einem Knickpunkt (Ionisierungspunkt), von dem ab sie mehr oder weniger steil ansteigt, was man durch die hier einsetzende Ionisation eingeschlossener Gase erklärt. Wichtig ist diese Erscheinung für Hochspannungskondensatoren, deren Betriebsspannung *unterhalb* dieses Knickpunktes liegen muß.

Bei Luft ist ein Verlustfaktor praktisch nicht nachweisbar. Daher sind *Luftkondensatoren* gute Normale mit einer Tragisolation zwischen den beiden Plattensystemen aus Quarz. Um dessen hohen Isolationswert zu sichern, muß der Kondensator gut trockengehalten werden.

Feste Kondensatoren werden für $10 \cdot \cdot \cdot 100000$ pF gefertigt. Die Abgleichung erfolgt auf einen runden Wert mit $\pm 0,1\%$ Toleranz, unterhalb 200 pF auf $\pm 0,2\%$. Die Abhängigkeit von der Temperatur ist gering. Sie beträgt etwa $+0,01\%$ je 10° Temperaturanstieg.

In derselben sorgfältigen Ausführung werden *veränderbare Normale* in der Ihnen bekannten Form der Drehkondensatoren bis etwa 3000 pF gebaut. Diese haben drehbare halbkreisförmige Platten, die eine lineare Eichkurve ergeben, allerdings nicht bis auf Null, da der Kondensator eine Anfangskapazität hat.

Für hochwertige Meßkondensatoren bei Nieder- und Mittelfrequenz wird *Glimmer* wegen seiner höheren DK als Dielektrikum verwendet, wenn man den Kapazitätswert mit einem Luftkondensator nicht darstellen kann oder wenn man Wert auf geringe Abmessungen legt. Allerdings hat Glimmer einen geringen frequenzabhängigen Verlustfaktor. Für Meßkondensatoren werden nur beste durchsichtige Glimmerblätter ausgewählt. Als Belegung wird nach modernem Verfahren eine Silberschicht aufgebracht, die unverschiebbar fest sitzt. Dadurch wird auch vermieden, daß eindringende Luft und Feuchtigkeit als Zwischenschicht eine Änderung der Kapazität bewirken. Die Glimmerblätter werden in der für den Kapazitätswert erforderlichen Anzahl geschichtet, durch Lötung geschaltet, auf den runden Kapazitätswert abgeglichen und zum Schutz gegen Feuchtigkeit mit einer wärmebeständigen Isoliermasse getränkt. Sie können solche Blöcke als Einzelkondensatoren in einem abschirmenden und mechanisch schützenden Metallgehäuse erhalten. Bequemer beim Messen ist ein *Kapazitätssatz*, bei dem Sie wie beim Widerstandssatz mit Stöpselschaltung oder mit Drehschaltern [8] den gewünschten Wert aus den im gemeinsamen Kasten untergebrachten Stufen zusammenschalten können. Die Kondensatoren sind alle parallelgeschaltet. Mit den Stöpseln schließen Sie die nicht gewünschten Werte kurz. Dasselbe geschieht mit dem Drehschalter. Das abschirmende Gehäuse hat eine Erdklemme. Der Abgleich der Kapazitätswerte wird in der Regel bei 800 Hz vorgenommen mit den Fehlergrenzen $\pm 0,5\%$ bei den Werten $0,01 \cdot 0,4 \mu F$ und $\pm 1\%$ bei $0,001 \cdot 0,004 \mu F$. Dieser Abgleich geschieht erst nach längerer Lagerzeit, damit die Kondensatoren genügend gealtert sind. Trotzdem müssen Sie noch mit geringen Kapazitätsänderungen rechnen, die auch von der Temperatur abhängig sind.

[15] Hochfrequenz-Kondensatoren. Für die Hochfrequenztechnik hat die keramische Industrie Kondensatoren mit keramischen Isolierstoffen entwickelt, die bei hoher DK einen niedrigen Verlustfaktor haben. DIN 40685 enthält sämtliche Eigenschaften keramischer Stoffe.

Die Spezialmassen für Hochfrequenz sind unter den Handelsnamen *Calit*, *Condensa*, *Tempa* (Werk Hescho-Kahla in Hermsdorf) und unter anderen Namen bekanntgeworden. Die Auswahl eines dieser Werkstoffe für Kon-

densatoren richtet sich nach den Anforderungen an den Kapazitätswert, an die Höhe der dielektrischen Verluste und an die Konstanz bei einer Änderung der Temperatur und der Frequenz.

Ein Stoff wie Calit aus einer an Magnesiumsilikat reichen Masse hat eine DK von etwa $\epsilon = 6,5$ (Glimmer ≈ 7), und bei 10^6 Hz ist $\tan \delta \leq 8 \cdot 10^{-4}$. Bei anderen Massen, wie Condensa und Tempa, erzielt man durch Zusatz

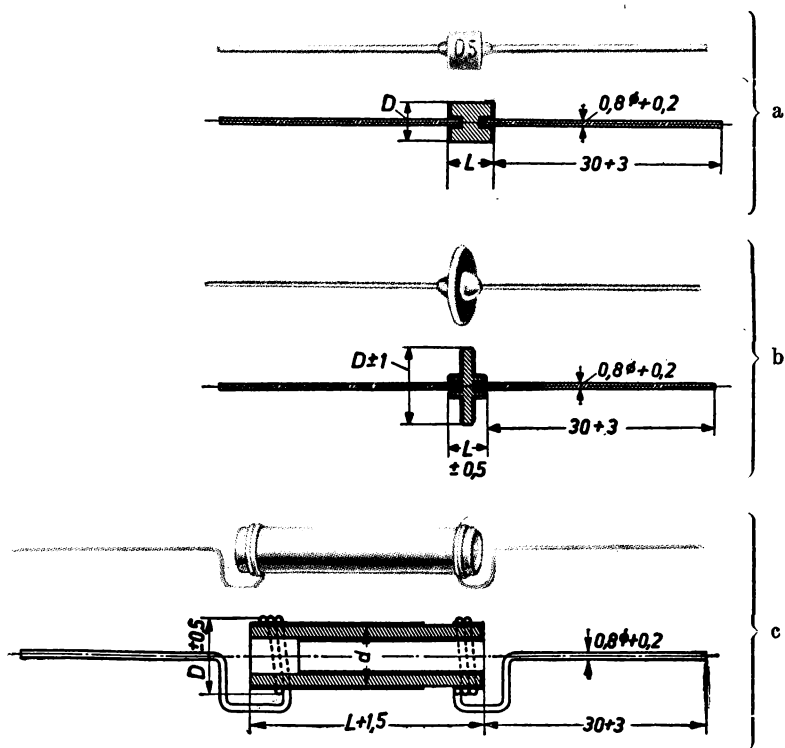


Bild 47. a Perl-, b Scheibchen- und c Rohr-Kondensatoren

von Titanverbindungen hohe Werte der DK (Condensa $\epsilon = 40 \dots 80$, Tempa $\epsilon = 14$), so daß sich kleine Abmessungen des Kondensators erreichen lassen. Dabei ist $\tan \delta$ bei Condensa-Massen maximal etwa $10 \cdot 10^{-4}$, bei Tempa nur $4 \cdot 10^{-4}$ bei 10^6 Hz und 20° C. Wichtig ist ferner, daß die Änderung der Kapazität mit der Temperatur geringfügig ist, und zwar

positiv, bis auf die *Condensa-Kondensatoren*, die einen *negativen Temperaturgang* haben. Bei diesen nimmt also die Kapazität mit steigender Temperatur ab.

Dadurch wird es bei passender Bemessung möglich, die Kapazitätzunahme eines anderen Kondensators auszugleichen oder auch die Zunahme der Induktivität einer Spule in einem Schwingungskreis zu kompensieren.

Für kleine Kapazitäten von $0,5 \dots 1000 \text{ pF}$ werden für Kleingeräte die Perl-, Scheibchen- und Rohr-Kondensatoren nach DIN E 41342 bis 41346 hergestellt (Bild 47), letztere statt mit Draht- auch mit Löt-fahnenanschluß.

Der Belag beiderseits des Dielektrikums ist eine eingebrannte Silber-schicht mit angelöteter Stromzuführung. Gegen Luftfeuchtigkeit, die den Verlustfaktor beeinflußt, schützt eine Lackschicht, deren Farbe das verwendete Dielektrikum bezeichnet.

Der Kapazitätswert kann auf Wunsch mit einer Toleranz von $\pm 0,5\%$, jedoch nicht unter $\pm 0,2 \text{ pF}$, abgeglichen werden.

Einen stetig veränderbaren Kleinkondensator, einen sogenannten *Trimmer*, mit keramischem Hochfrequenz-Dielektrikum sehen Sie in Bild 48.

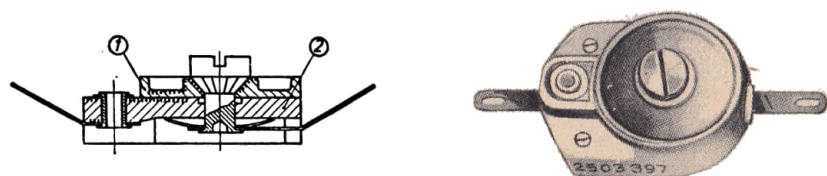


Bild 48. Scheibentrimmer

Die drehbare Scheibe 1 hat oben einen eingebauten halbkreisförmigen Silberbelag, ebenso der Sockel 2. Die aufeinandergleitenden Flächen sind plangeschliffen. Mit einem Schraubenzieher können Sie die Scheibe wie bei einem normalen Drehkondensator drehen und die Trimmerkapazität von einem Anfangs- bis zum Höchstwert stetig ändern.

[16] Meßkondensatoren für Hochspannung. Wegen des Verlustfaktors wäre auch bei Hochspannung die Luft das geeignete Dielektrikum für

genaue Kapazitätsnormale. Nachteilig sind ihre geringe DK und Durchschlagsfestigkeit. Man kann daher Luft nur für kleine Kapazitätswerte bei verhältnismäßig großem Platzbedarf verwenden. Das Normal erhält dann die Form des Zylinderkondensators mit Schutzringen an beiden Enden zur Beseitigung des inhomogenen Randfeldes (absolutes Normal nach Petersen).

Wenn Sie aber ein Gas komprimieren, dann steigt seine Durchschlagsfestigkeit. Nach dem Vorschlag von Schering-Vieweg baut man daher

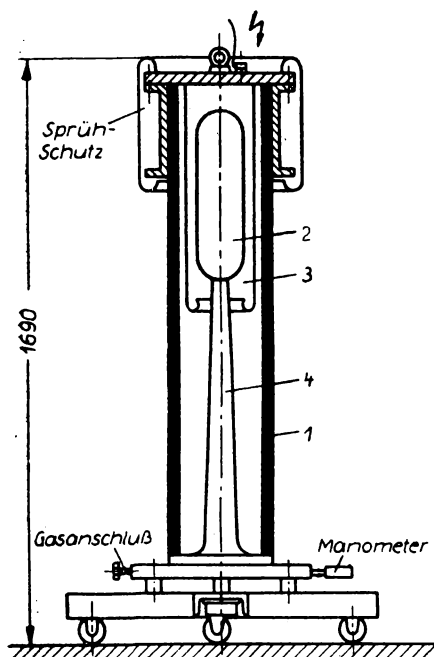


Bild 49. Preßgas-Kondensator, 100 pF
Betriebsspannung 250 kV
Prüfspannung 300 kV

Preßgas-Kondensatoren für Betriebsspannungen bis 500 kV (Bild 49) mit verhältnismäßig geringem Platzbedarf und guter Transportmöglichkeit. Am besten ist Stickstoff als Füllgas geeignet, mit dem der Isolierzylinder 1 bis auf einen Überdruck von 14 at gefüllt wird.

Die Kapazität von 50 oder 100 pF wird durch zwei konzentrisch angeordnete zylindrische Körper 2 und 3 gebildet. 3 ist am metallenen Deckel befestigt und 2 isoliert auf der Säule 4, durch die die Zuleitung gasdicht nach außen führt. Diese Anordnung ergibt eine genau bestimmbare Kapazität, wenn das Fahrgestell geerdet wird. Der Nennwert wird auf $\pm 0,1\%$ abgeglichen.

Der Sprühschutz besteht aus einer gut abgerundeten Blechver-

kleidung. Wissen Sie, wozu man ein solches nicht gerade billiges Normal braucht? Man verwendet es als Vergleichskondensator in der Schering-Meßbrücke zur Messung der dielektrischen Verluste, der Kapazität und der DK von Prüflingen unter Hochspannung.

Bei geringeren Ansprüchen an den Verlustfaktor und an die Konstanz kommen für Spannungen über 1 kV und Niederfrequenz Porzellan, Glas und Hartpapier in Frage. Bei Porzellan und Glas wird der Kondensator in der Regel in Flaschenform mit innerem und äußerem Metallbelag, ähnlich einer Leydener Flasche, gebaut. Ein Spezialglas, das Minosglas, ist mit seinem niedrigen Verlustfaktor (etwa $4,5 \cdot 10^{-4}$ bei $5 \cdot 10^5$ Hz) für Hochfrequenz geeignet.

Als Beispiel einer Meßkapazität mit Hartpapierisolation wurde in Lehrbrief 2 [11] die Kondensator-Durchführung kurz beschrieben. Sie erinnern sich an die Spannungsmessung mit dem elektrostatischen Meßwerk. Für hochfrequente Hochspannung sind die „Edelporzellane“ Calit, Condensa und Tempa bei entsprechender Formgebung der Kondensatoren vorzüglich geeignet. Bild 50 zeigt Ihnen eine Zusammenstellung üblicher

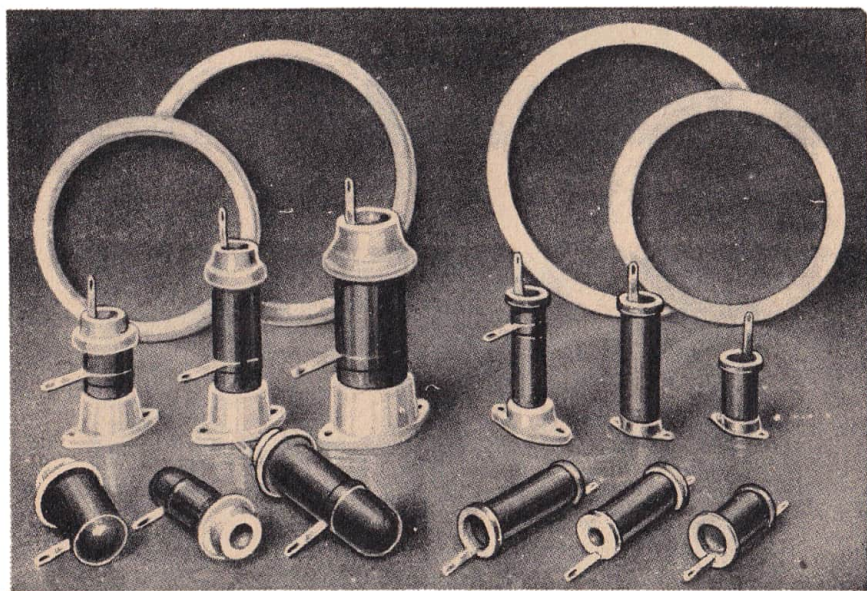
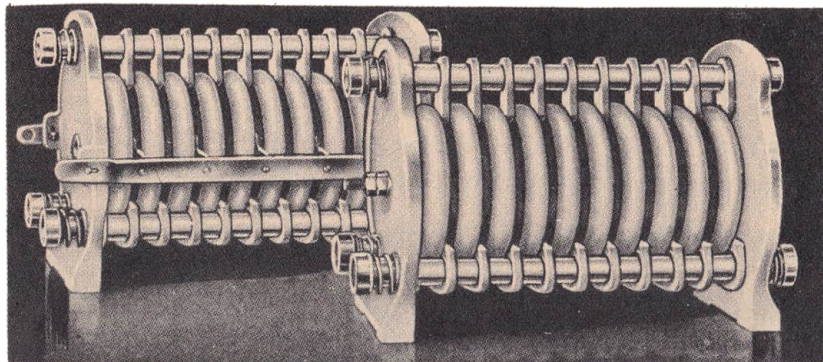
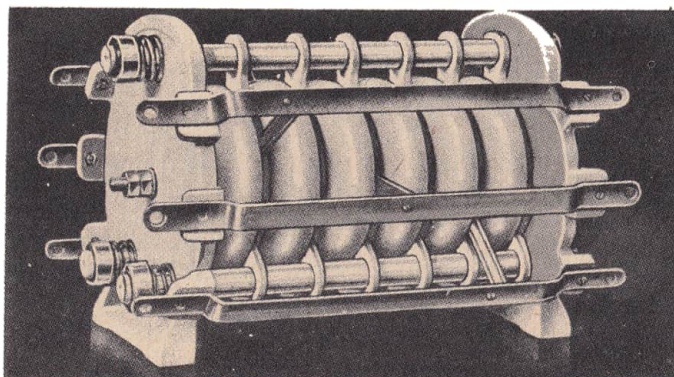


Bild 50. Platten-, Topf- und Wulstrohr-Kondensatoren mit aufgebranntem metallischem Belag und verdicktem oder wulstförmigem Rand bzw. kräftigem Schirm oder Wulst als Sprühschutz

Formen. Diese sind durch die erforderliche Spannungsfestigkeit bedingt, und das Material ist nach den geforderten elektrischen Eigenschaften auszuwählen. Sie sehen die kreisförmigen Plattenkondensatoren, links mit Wulstrand, rechts mit verdicktem flachen Rand. In der Mitte ist vorn und hinten der Silberbelag aufgebracht. Die Stromzuführungen werden angelötet. Eine Platte ist bis max. 10 kV bzw. 5 kV HF-Spannung vorgesehen.



a



b

Bild 51. Kondensatorblöcke in Parallel- und Serienschaltung

In der Anordnung nach Bild 51 werden Einzelplatten für höhere Spannungen hintereinander- oder zur Erzielung eines größeren Kapazitätswertes parallelgeschaltet. In einer Sonderausführung für Meßzwecke lassen sich die Einzelplatten in verschiedenen Kombinationen durch Anzapfungen parallel- und in Reihe schalten, um verschiedene Stufenwerte zu erhalten.

Zusammenfassung

Kapazitätsnormale sind feste oder veränderbare Kondensatoren großer Genauigkeit hinsichtlich Konstanz des Kapazitätswertes und mit den geringsten dielektrischen Verlusten. Als Dielektrikum wird daher nach Möglichkeit Luft oder bei Hochspannung Preßgas gewählt.

Glimmer wird wegen seiner günstigen Eigenschaften für Normale und Meßkondensatoren bei Nieder- und Mittelfrequenz bis etwa 1 kV verwendet, insbesondere für Kapazitätssätze, bei denen durch Stöpsel oder Drehschalter die gewünschten Werte eingeschaltet werden.

Hochfrequenz-Kondensatoren werden überwiegend mit Edelporzellanen wie Calit, Condensa, Tempa u. a. isoliert.

Übungen

28. *Was bedeutet der Begriff $\tan \delta$ bei einem Kondensator?*
29. *Welche Eigenschaften schätzt man bei einem Kondensator-Isolierstoff außer den niedrigen dielektrischen Verlusten?*
30. *Wodurch werden bei den Edelporzellanen hohe Dielektrizitätskonstanten bis zu 80 erreicht?*

Antworten und Lösungen

1. Durch die Lastkurve, die den Zählerfehler als Funktion des Laststromes bei konst. Spannung, Frequenz, Temperatur und Leistungsfaktor darstellt. Der Fehler ist die Abweichung der Anzeige vom Sollwert in % des Sollwertes.
2. Durch die Festlegung der Eichfehlergrenzen und der Verkehrsfehlergrenzen. Werden letztere überschritten, so ist der Zähler auszuwechseln.

3. Der Wh-Zähler hat einen Spannungspfad.
4. Der Motor-Wh-Zähler (fest stehende Stromspulen und drehbarer Anker als Spannungspfad), der Magnet-Motorzähler (konst. Feld durch Dauermagnet, Anker als Strompfad) für Ah sowie der Elektrolytzähler für Ah.
5. Die Zunahme der Reibung während der Betriebsdauer, die Änderungen der Temperatur und der Spannung sowie die Beeinflussung durch ein Fremdfeld und durch Alterung des Dauermagneten.
6. Er hat wegen der eisenlosen Bauart ein schwaches Eigenfeld.
7. Beim Lampenstrom $\frac{40 \text{ W}}{110 \text{ V}} \approx 0,36 \text{ A}$ müßte das Stromfeld, der Eichung entsprechend, $150 \text{ G} \cdot \frac{0,36 \text{ A}}{10 \text{ A}}$ sein. Nun kommen aber $0,2 \text{ G}$ dazu, also ist der zusätzliche Fehler $\frac{0,2 \text{ G}}{150 \text{ G} \cdot \frac{0,36 \text{ A}}{10 \text{ A}}} \cdot 100 \approx + 3,7\%$.
8. Die Widerstandszunahme der Hauptspulen vermindert nur geringfügig den Belastungsstrom, da die Spulen einen praktisch zu vernachlässigenden Vorwiderstand für den Verbraucher darstellen. Der Zähler mißt also den tatsächlichen Laststrom, der dem Verbraucher zufließt.
9. Das Hilfsdrehmoment zum Reibungsausgleich wirkt beim Rücklauf in der falschen Richtung und verursacht besonders bei kleiner Last merkbare Minusfehler.
10. Der Zähler zählt nur Ah, ein Spannungspfad fehlt.
11. Die Widerstandsänderung soll Null sein, d. h.

$$-0,02 \frac{1}{^\circ\text{C}} \cdot 10 \Omega + 0,0068 \frac{1}{^\circ\text{C}} R_V = 0; R_V = \frac{0,02 \frac{1}{^\circ\text{C}} \cdot 10 \Omega}{0,0068 \frac{1}{^\circ\text{C}}} = 29,5 \Omega$$
12. Der Phasenwinkel zwischen dem Spannungs-Triebfluß Ω_U und dem Strom-Triebfluß Φ_I ist auf 90° bei $\cos \varphi = 1$ abgeglichen.

13. Durch einen magnetischen Nebenschluß des Spannungseisens, Feinabgleich durch Sekundärbelastung mit verschiebbarem Cu-Blech oder mit Zusatzwicklung und Widerstandsschleife.
14. Die Erzeugung eines einstellbaren Zusatzdrehmomentes zum Reibungsausgleich, indem man einen Pol des Spannungseisens unsymmetrisch macht. Leerlauf ist selbst bei 20% Überspannung durch Bremszunge und Hemmfahne zu verhüten.
15. Durch einen magnetischen Nebenschluß des Stromeisens, der mit steigendem Strom in den Sättigungsbereich kommt.
16. Abweichung von der Sinusform bedeutet Oberwellen, wodurch der Frequenzfehler auftritt.
17. Der Zähler hat Plusfehler, besonders bei $\cos \varphi = 1$, wegen der verringerten Gegen-Aw der Scheibenströme und wegen der Bremsmagnet-Schwächung.
18. Mit 90° und mit 60° Abgleich der Flüsse unter Verwendung von Kunstphasen und mit 0° Abgleich ohne Kunstphase als reines BV-Meßwerk.
19. Der Winkel zwischen den Flüssen ist bei Meßwerk I 150° ($\sin 150^\circ = +\frac{1}{2}$), bei II 210° ($\sin 210^\circ = -\frac{1}{2}$). Die Drehmomentsumme ist Null.
20. 60° Abgleich.
21. Der Widerstand R mit parallelgeschalteter Kapazität C' hat den Scheinwiderstand (nach der allg. Formel $\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$)

$$\mathfrak{Z} = \frac{\frac{1}{j\omega C} \cdot R}{\frac{1}{j\omega C} + R} = \frac{R}{1 + j\omega C' R} \text{ durch Erweitern mit } 1 - jC' R$$

$$\mathfrak{Z} = \frac{R \cdot (1 - j\omega C' R)}{1 + \omega^2 C'^2 R^2} = \frac{R}{1 + \omega^2 C'^2 R^2} - j \cdot \frac{\omega C' R^2}{1 + \omega^2 C'^2 R^2}$$

(Wirk) (Blind)

$$\tan \delta = \frac{\text{Blindwiderstand}}{\text{Wirkwiderstand}} = -\frac{\omega C' R^2}{R} = -\omega C' R = -\omega T, \text{ also } C' = T/R$$

22. Der Ohm-Wert bleibt nach dem Wickeln des Widerstandsdrahtes infolge nachträglicher Änderung des Kristallgefüges nicht konstant. Dieser Vorgang wird durch künstliche Alterung, durch Erwärmung nach dem Wickeln, beschleunigt.
23. Weitgehende Aufhebung der Wicklungs-Induktivität.
24. Die Stöpselkontakte haben kleinere Übergangswiderstände als die Schalterkontakte, letztere besitzen aber eine kleinere Eigenkapazität. Die Stöpselschaltung ist weniger bequem und übersichtlich.
25. Der Abgleich auf den Soll-Wert ist bei der dünnen Kohleschicht erheblich schwieriger als bei einem Draht. Dazu kommen die Einflüsse von Temperatur und Feuchtigkeit.
26. $L = 25,4 \cdot n^2 \cdot \sqrt{n} \cdot d \cdot 10^{-9}$ [H]

$$n^{5/2} = \frac{L \cdot 10^9}{25,4 \cdot d} = \frac{1 \cdot 10^7}{25,4 \cdot 0,105}$$

$$\lg n = \frac{2}{5} \cdot [7 - (1,4048 + 0,0212 - 1)] = 2,6296$$
 $n = 426 \text{ Wdg.}, \text{ gewählt } 441 \text{ Wdg. zum Abgleich.}$
 $\sqrt{441} = 21 \text{ Wdg. je Lage, } h = r_i = 21 \text{ Wdg.} \cdot 0,105 = 2,2 \text{ cm}$
Probe: $L = 25,4 \cdot h \cdot n^2 \cdot 10^{-9}$
 $= 25,4 \cdot 2,2 \cdot 441^2 \cdot 10^{-9} = 0,0108 \text{ H}$
Drahtlänge $l = 2 \pi \cdot r_m \cdot n = 2 \pi \cdot 3,3 \cdot 441 \text{ Wdg.} = 9150 \text{ cm}$
Drahtquerschnitt $\frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1^2}{4} = 0,785 \text{ mm}^2$
Widerstand $R = \frac{l}{\kappa \cdot F} = \frac{91,5}{56 \cdot 0,785} \approx 2,1 \Omega, \tan \delta = \frac{R}{\omega L}$

$$= \frac{2,1}{314 \cdot 0,01} = 0,67 \quad \delta \approx 33^\circ 50'$$
27. Die Verwendung von Spezialeisen lohnt nur, wenn die durch die Hochfrequenz bedingten Zusatzverluste im Kupfer und im Dielektrikum dadurch wesentlich kleiner werden, so daß die Spulengüte trotz der zusätzlichen Eisenverluste steigt. Bei Niederfrequenz ist der teure Massekern nicht lohnend.
28. Er ist ein Kennzeichen für die Güte des Dielektrikums als Verhältnis der dielektrischen Verluste (Wirkleistung) zur Blindleistung des Kon-

densators. Zur eindeutigen Kennzeichnung gehört die Angabe der Frequenz, Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei der Messung des $\tan \delta$.

29. Hohe Dielektrizitätskonstante und Durchschlagsfestigkeit sowie zeitliche Konstanz.
30. Durch Zusatz von Verbindungen des Titans.

Formelzusammenstellung

Formel-Nr.	Formel	Seite
1	$F = \frac{A - S}{S} \cdot 100 = \left(\frac{A}{S} - 1 \right) \cdot 100$	5
2	$\pm F = 3 + 00,5 \cdot \frac{N_n}{N} + 0,5 \cdot \left(1 + 0,1 \frac{N_n}{N} \right) \cdot \tan \varphi$	6
3	$\pm F = 2 + 0,03 \cdot \frac{N_n}{N} + 0,3 \cdot \left(1 + 0,05 \cdot \frac{N_n}{N} \right) \cdot \tan \varphi$	6
4	$M_T = c_1 \cdot U \cdot I = c_1 \cdot N$	10
5	$I = c_2 \cdot \Phi \cdot n$	10
6	$M_B = c_2 \cdot c_3 \cdot \Phi^2 \cdot n$	10
7	$n = C \cdot N$	11
8	$A = \frac{n \cdot t}{C} = \frac{z}{C}$	11
9	$M_T = c_1 \cdot I_A \cdot \Phi$	21
10	$n = C \cdot I_A$	21
11	$n \cdot t \triangleq z \triangleq C' \cdot I \cdot t$	21
12	$M_T = c_7 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot f \cdot \kappa \cdot \cos \varphi$	33
13	$M_T = c_7 \cdot \Phi_U \cdot \Phi_I \cdot f \cdot \kappa \cdot \sin \beta$	33
14	$M_T = c_8 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$	33
15	$n \cdot t \triangleq z \triangleq C \cdot N \cdot t$	34
16	$\tan \delta \approx \omega \left(\frac{L}{R} - RC \right) \approx \omega T$	59

Quellenverzeichnis der Bilder

**Varduhn-Nell, Handbuch der Elektrotechnik, Band II, 3. Auflage. Fachbuch-
verlag, Leipzig 1951:**
Bild 10, 33, 36, 37, 38

Henze, Einführung in die Elektrotechnik. Fachbuchverlag, Leipzig 1953;
Bild 11

Firma Hescho-Kahla, Hermsdorf/Thür.:
Bild 47, 48, 50, 51

Bestell -Nr. 5016 – 04 /60

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur - Fernstudium

Ag 616/ 24 /60

