Grundwissen des Fernmeldedienstes

Band XIV

Meßgeräte und grundsätzliche Meßschaltungen

DPG

Herausgeber: Deutsche Postgewerkschaft, Hauptvorstand

Frankfurt (Main)

Grundwissen des Fernmeldedienstes

Band XIV

Meßgeräte und grundsätzliche Meßschaltungen

Deutsche Postgewerkschaft, Verlag GmbH., Frankfurt (Main), Savignystraße 43

Vorwort

Dieser Band gehört bezüglich der Abschnitte „Aufbau und Wirkungsweise von Meßinstrumenten“ noch zum Inhalt der Bände I a bis II b (Einführung in die Grundlagen der Elektrotechnik), wenn man sich nach den herkömmlichen Lehrbüchern richten will. Da sich die Stoffgliederung der Bände jedoch nach der Praxis ausgerichtet hat, ist in den Bänden XIV und XV die Theorie der Meßinstrumente mit der Praxis, das heißt dem praktischen Messen, vereinigt worden, so daß der Leser bzw. Lernende neben dem Aufbau und der Wirkungsweise der bei der DBP am häufigsten verwendeten Meßinstrumente auch deren Schaltung im Prüfschrank und bei der Eingrenzung von Leitungsstörungen und Störungen innerhalb der Tln-Anlagen kennenlernt. Darüber hinaus ist ein besonderer Abschnitt den Erdungen und Erdungsmessungen gewidmet, so daß die Kräfte des AF- und BF- (einschließlich des BFt-) Dienstes mit fast allen für sie in Frage kommenden Fällen vertraut gemacht werden.

Mögen diese Bände eine ebenso freundliche Aufnahme finden wie die bisher erschienenen.

Frankfurt am Main, im Mai 1957
Savignystraße 43

Inhaltsverzeichnis

I. Physikalischer Aufbau der Meßgeräte

Begriff „messen"

(1) Allgemeines

Was verstehen wir unter „messen"? Im täglichen Leben führen wir diese Tätigkeit sehr oft durch oder beobachten sie, ohne uns Gedanken darüber zu machen. Wir „messen" einfach; so z. B. die Länge eines Raumes in Metern, den Inhalt eines Gefäßes in Litern, das Gewicht eines Gegenstandes in Gramm oder, um in der Elektrotechnik zu bleiben, die Spannung einer Spannungsquelle in Volt, die Stromstärke in einem Stromkreis in Ampere usw. Was haben wir eigentlich getan? Nichts weiter, als physikalische Größen, wie das Gewicht eines Körpers, die Spannung einer Spannungsquelle, die Stärke eines Stromes usw. in ihren Einheiten ausgedrückt.

Die Einheit des Längenmaßes ist das Meter, die Einheit des Rauminhaltes eines Körpers das Kubikzentimeter, die Einheit der Spannung das Volt. Wir messen also die Länge einer Strecke, indem wir z. B. an einem Bandmaß ablesen, wie oft die Einheit des Längenmaßes (das m) in der zu messenden Strecke enthalten ist. Das Ergebnis dieser Längenmessung kann Werte ergeben, die größer oder kleiner als die Einheit selbst sind, z. B. 2,85 m, 0,5 m usw.

Messen heißt demnach vergleichen. Wir vergleichen also, wie oft der angezeigte Wert in der Einheit der jeweiligen physikalischen Größe enthalten ist. Ein Meßergebnis von 3,5 Volt bedeutet, daß wir 3,5mal die Einheit der Spannung ablesen, 0,02 A, daß wir den $^{2}/_{100}$ Teil eines Ampere gemessen haben usw.

Die physikalischen Einheiten sind im allgemeinen international festgelegt. Z. B. ist das Meter etwa der 40millionste Teil des Erdumfanges am Äquator. Die Einheit der Stromstärke, das Ampere, ist gegeben, wenn ein elektrischer Strom in 1 Sekunde 1,118 mg Silber aus einer Silbernitratlösung ausscheidet. Die Einheit des Widerstandes ist das Ohm. Ein Ohm Widerstand hat ein Quecksilberfaden von 1 mm² Querschnitt und 1,063 m Länge bei einer Temperatur von 0° Celsius.

Zum Messen der elektrischen Größen (Strom, Spannung, Widerstand, elektrische Leistung usw.) hat man Meßinstrumente gebaut, die uns die zu messenden Größen meist in ihren Einheiten anzeigen, z. B. V, A, Ω usw. Mit der Erläuterung des Aufbaues sowie der Wirkungsweise der in der Fernmeldetechnik in überwiegendem Maße verwendeten Meßinstrumente soll sich der Band XIV befassen.

Die weitaus gebräuchlichsten Meßinstrumente sind die Zeigerinstrumente, an denen man den gemessenen Wert in den entsprechenden Einheiten unmittelbar ablesen kann. Wir können ein solches Zeigerinstrument mit einer Federwaage vergleichen, wie sie heutzutage in fast allen Lebensmittelgeschäften zu finden ist. An ihr können wir das Gewicht einer Ware unmittelbar in Gramm oder Kilogramm ablesen.

Solche Zeigerinstrumente gibt es für das Messen fast aller elektrischer Größen. Die wichtigsten sind Strom-, Spannungs- und Widerstandsmesser.

Eine weitere Gruppe von Meßinstrumenten bilden die Abgleichmeßeinrichtungen. Hier vergleichen wir einen bekannten Wert mit einem zunächst noch unbekannten, indem wir den bekannten Wert so lange verändern, bis Gleichheit (oder Verhältnisgleichheit) zwischen den Werten besteht. Diese Art der Messung können wir mit dem Feststellen des Gewichtes eines Körpers mittels einer Balkenwaage vergleichen. Wir bringen hierbei so viel Gewichtsstücke in die eine Waagschale, bis zwischen beiden Hebelarmen der Waage Gleichgewicht herrscht.

Um die elektrische Arbeit zu messen ($A = N \times t$, vgl. Band I a, Ziffer 38), benutzen wir Instrumente, die wir Zähler nennen. Die elektrische Energie bringt ein Zählwerk zum Ansprechen, das uns die verrichtete elektrische Arbeit (im allgemeinen in kWh) anzeigt. Einen solchen Zähler können wir mit einer Gas- oder Wasseruhr vergleichen.

Da es Gleich- und Wechselstrom gibt, müssen wir auch bezüglich der Meßinstrumente unterscheiden zwischen solchen, die nur für Gleichstrom, solchen, die nur für Wechselstrom, und solchen, die für beide Stromarten verwendet werden können.

Die in den Bänden I a bis II b geschilderten verschiedenen Wirkungen des elektrischen Stromes bzw. der elektrischen Spannung lassen eine Unterscheidung der Meßinstrumente auch hiernach zu.

Wir unterteilen die Meßinstrumente daher in

a) Instrumente, die auf der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes, also auf dem Elektromagnetismus, beruhen,

b) Instrumente, die auf der Wärmewirkung des elektrischen Stromes beruhen,

c) elektrolytische Meßinstrumente, die auf der elektrochemischen Wirkung des elektrischen Stromes, der Elektrolyse, beruhen,

d) Instrumente, die auf Grund eines sich aufbauenden elektrischen Feldes einen Spannungszustand anzeigen (elektrostatische Meßinstrumente).

(2) Technischer Aufbau der Zeigerinstrumente

Zeigerinstrumente enthalten in den meisten Fällen ein bewegliches System, das hauptsächlich drehbar angeordnet ist und vom elektrischen Strom abgelenkt wird. Eine Achse (im allgemeinen Spitzenlagerung auf Halbedelsteinen) trägt entweder ein Weicheisenstück oder eine Spule. Das Weicheisenstück oder die Spule werden durch Elektromagnetismus abgelenkt (Ausnahme: Hitzdrahtinstrumente). Ein mit der Achse befestigter Zeiger schlägt aus und gleitet über eine Skala, die in den entsprechenden Einheiten geeicht ist.

Um das bewegliche System wieder in die Ruhelage zurückzubringen, wird an ihm eine Gegenkraft (meist in Form einer Spiralfeder, ähnlich der Unruhspirale einer Uhr) angebracht.

Der elektrische Strom bringt das bewegliche System in Bewegung und damit den Zeiger zum Ausschlagen. Die Gegenkraft hat das Bestreben, den Zeiger in die Ruhelage zurückzuführen. Der Zeiger pendelt demzufolge so lange hin

und her, bis die Wirkung des Stromes und die Federkraft sich das Gleichgewicht halten; der Zeiger kommt damit auf einem bestimmten Ausschlag zum Stehen.

Ein solches Instrument, dessen Zeiger längere Zeit pendelt, nützt uns wenig; denn wir wollen den zu messenden Wert möglichst sofort ablesen. Um dieses zu erreichen, baut man eine sogenannte „Dämpfung" ein, die verschiedene Ausführungsformen haben kann. Meist verwendet man die Luft- oder die Wirbelstromdämpfung.

a) **Die Luftdämpfung.**

Sie beruht im Prinzip darauf, daß ein Kolben oder ein Metallrahmen, der mit dem drehbaren System in Verbindung steht, bei Ausschlag des Zeigers Z die Luft in einem Röhrchen zusammendrückt. Da der Kolben nicht fest anschließt, kann die zusammengepreßte Luft langsam entweichen (Abb. 1).

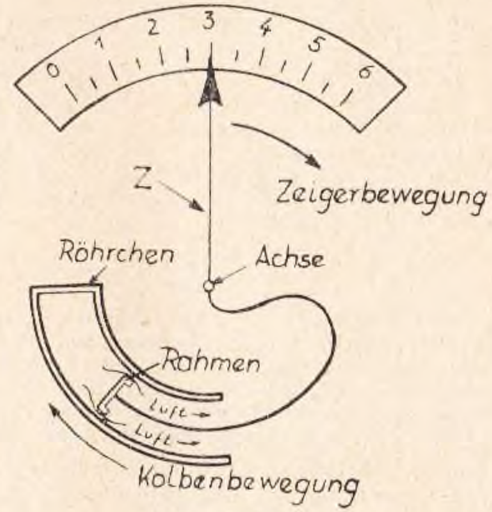


Abb. 1

Das Luftpolster, das sich zwischen Rahmen und Rohrverschluß bildet, verhindert zu weiten Zeigerausschlag. Die an den Seiten des Kolbens herausströmende Luft verhindert dank ihrer Wirbelbildung ein Zurückschlagen des Zeigers: er bleibt schnell in der ihm durch den elektrischen Strom aufgezwungenen Lage stehen.

b) **Die Wirbelstromdämpfung**

In Band II a (1. Auflage Ziffer 67, 2. Auflage Ziffer 29) wurde über Wirbelströme kurz berichtet. Hier war von Wirbelströmen die Rede, die in einem Metallstück durch ein magnetisches W e c h s e l feld entstehen. Bewegen wir ein Metallstück durch ein D a u e r magnetfeld, so werden in ihm nach der Lenzschen Regel Induktionsströme erzeugt, die den Vorgang, durch den sie entstehen, zu hemmen versuchen (Band II a, 1. Auflage Ziffer 64, 2. Auflage Ziffer 26). Die praktische Anwendung bei Meßinstrumenten führt zur Wirbelstromdämpfung gem. Abb. 2.

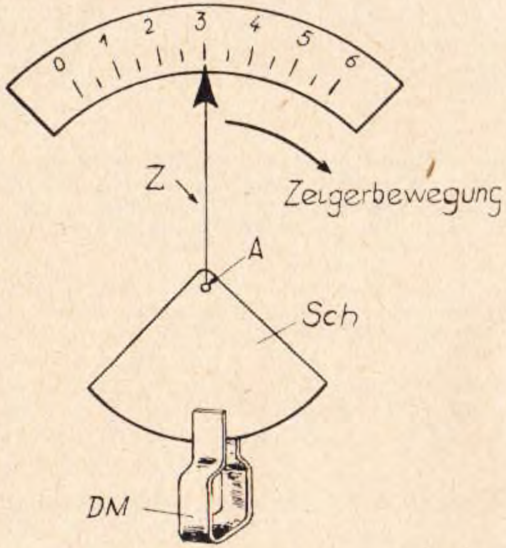


Abb. 2

Auf der Achse A, die mit dem Zeiger Z fest verbunden ist, befindet sich eine Scheibe Sch aus gut leitendem Metall (Kupfer oder Aluminium). Diese Scheibe bewegt sich bei Zeigerausschlag durch das Feld eines kräftigen Dauermagneten DM. Hierdurch entstehen in der Scheibe Sch Induktionsströme, die die Bewegung des Zeigers Z hemmen. Es tritt somit eine Dämpfung mit der gleichen Wirkung ein, wie sie bei der Luftdämpfung geschildert worden ist.

Nach diesen allgemeinen Ausführungen können wir den Aufbau und die Wirkungsweise der gebräuchlichsten Meßinstrumenttypen behandeln. Wir beginnen mit dem Hitzdrahtstrommesser.

(3) Der Hitzdrahtstrommesser

Dieses Instrument hat für praktische Zwecke eigentlich nur geschichtlichen Wert. Trotzdem wollen wir es hier behandeln, weil die Kenntnis seines Aufbaus und seiner Wirkungsweise dazu beiträgt, die später behandelten Meßinstrumente besser zu verstehen. Wir haben die Bedeutung dieses Meßgerätes bereits im Band II b bei der Besprechung des Effektivwertes von Wechselströmen kennengelernt.

Ein einfacher Versuch soll uns die Wirkungsweise des Hitzdrahtstrommessers veranschaulichen (Abb. 3).

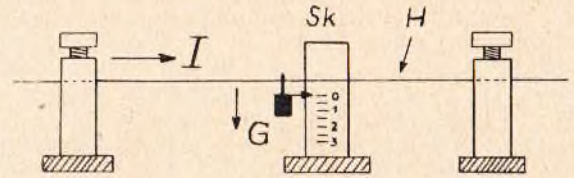


Abb. 3

Zwischen 2 Halter spannen wir einen Widerstandsdraht (Hitzdraht H in Abb. 3). In die Mitte des Drahtes hängen wir ein zylindrisches Eisenstück (Gewicht G), das einen Zeiger trägt.

Der Hitzdraht H wird so straff gespannt, daß er in der Mitte nicht durchhängen kann. Schicken wir einen Strom I in beliebiger Richtung durch den Widerstandsdraht, so wird er sich gemäß Band I a und I b (Strom- oder Elektrowärme) erhitzen und sich dabei ausdehnen. Je nach Stärke des Stromes wird die erzeugte Wärmemenge ($0{,}24 \times I^2 \times R \times t$) groß oder klein und damit auch die Ausdehnung des Hitzdrahtes H größer oder kleiner. Das Gewicht G übt dann eine Bewegung in Richtung des senkrechten Pfeiles aus, wobei der Zeiger an einer Skala Sk entlanggleitet.

Eichen wir die Skala in Ampere, so sind wir in der Lage, die Stromstärke zu messen.

Die praktische Ausführung eines solchen Hitzdrahtstrommessers zeigt Abbildung 4.

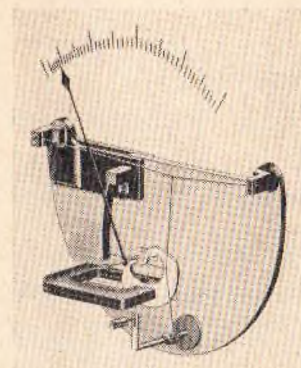


Abb. 4
(Werkfoto: Hartmann & Braun)

Wir erkennen auf der Abbildung den Hitzdraht, der zwischen zwei Winkeleisen gespannt ist, und einen Draht, der von der Mitte des Hitzdrahtes nach unten abgeht und an der Grundplatte befestigt ist. Von diesem Draht zweigt ein weiterer Draht im rechten Winkel ab. Dieser Draht führt über eine Rolle, die mit der Zeigerachse fest verbunden ist, und endet an einer Blattfeder.

Fließt jetzt ein Strom durch den Hitzdraht, so dehnt er sich aus. Darüber hinaus bewirkt die Zugkraft der Feder, daß der Zeiger nach rechts ausschlägt. Aus Abb. 4 erkennen wir weiter die Wirbelstromdämpfung (Hufeisenmagnet und Aluminiumscheibe).

Bei genauer Betrachtung der Skala fällt uns auf, daß die Abstände der einzelnen Teilstriche nicht gleich sind, sondern daß sie in Abb. 4, von links nach rechts gesehen, größer werden. Wir haben es hierbei nicht mit einer „linearen" Skaleneinteilung zu tun, d. h. mit einer Einteilung, bei der die Teilstriche gleich weit entfernt sind, sondern mit einer „quadratischen". Was eine quadratische Skaleneinteilung bedeutet, ergibt sich aus Band I b (Elektrowärme). Dort hatten wir festgestellt, daß die Wärmewirkung des elektrischen Stromes in erster Linie vom Quadrat der Stromstärke (I^2) abhängt. Bei einem schwachen Strom I ist der Wert von I^2 klein gegenüber einem starken Strom. Wenn wir also die Stromstärke bei einem Hitzdrahtstrommesser verhältnismäßig genau ablesen wollen, muß die Skaleneinteilung dem Quadrat des Stromes, der durch den Hitzdraht fließt, entsprechen.

Das Instrument ist gleichermaßen für das Messen von Gleich- und Wechselströmen geeignet. Im Band II b unter „Effektivwerte von Wechselströmen" hatten wir gesehen, daß der Effektivwert eines Wechselstromes gleich dem Wert eines gleich starken Gleichstromes ist, wenn er über einem gleich großen Widerstand die gleiche Wärmemenge erzeugt. Wir können also mit diesem Hitzdrahtstrommesser auf der gleichen Skala sowohl die Stärke eines Gleich- als auch eines Wechselstromes ablesen.

Die Empfindlichkeit eines Hitzdrahtstrommessers ist recht gering. Wir können mit ihm erst Ströme von einer Stärke ab etwa 0,1 A = 100 mA mit hinreichender Genauigkeit ablesen. Für genaue Messungen ist ein derartiges Instrument daher nicht geeignet.

(4) Weicheiseninstrumente

Weicheiseninstrumente beruhen auf der elektromagnetischen Wirkung einer stromdurchflossenen Spule.

Die beiden grundsätzlichen Möglichkeiten der Wirkungsweise von Weicheiseninstrumenten wollen wir durch Versuche kennenlernen.

Versuch 1: (Abb. 5)
An einem Stativ mit Dreifuß befestigen wir eine Klemme K mit einem Stift, der am Ende zu einem Haken gebogen ist. An diesem Haken hängen wir eine Spiralfeder auf, an deren unterem Ende ein Weicheisenstück befestigt ist. Wir stellen eine Spule von 300 Windungen so auf, daß das Weicheisenstück in den Hohlraum der Spule hineingleiten kann, und schließen die Spule über einen Schiebewiderstand R von 10 Ω an eine Gleichspannungsquelle von etwa 4 V Spannung.

Wir sehen hierbei, daß das Eisenstück in die Spule hineingezogen wird, und zwar um so mehr, je mehr wir den Widerstand von 10 Ω verringern. Befestigen wir an dem Weicheisenstück einen Zeiger, der über eine Skala gleitet, so können wir die Skala in Ampere eichen, weil die Anzugskraft der Spule mit steigender Stromstärke wächst und damit das Eisenstück weiter in das Innere der Spule hineingezogen wird. Die Spiralfeder stellt die Gegenkraft dar. Sie ist so bemessen, daß das Eisenstück nicht bereits bei einer verhältnismäßig kleinen Stromstärke völlig in den Hohlraum der Spule gleiten kann.

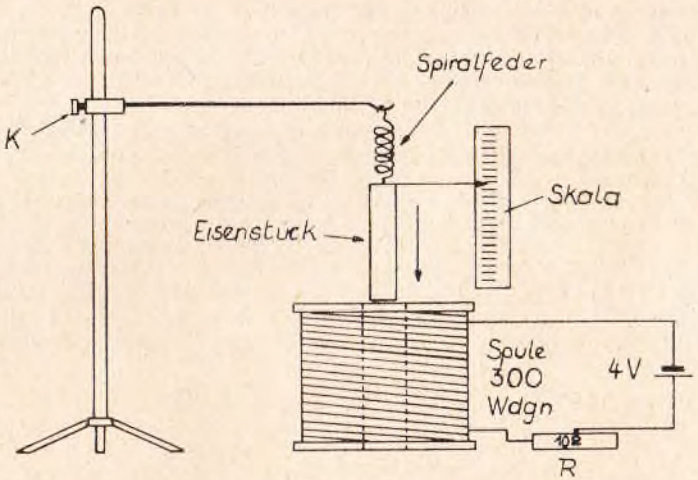


Abb. 5

Nach diesem Prinzip sind die sogenannten „Tauchspulgeräte" aufgebaut, deren gebräuchlichste Ausführung Abb. 6 zeigt.

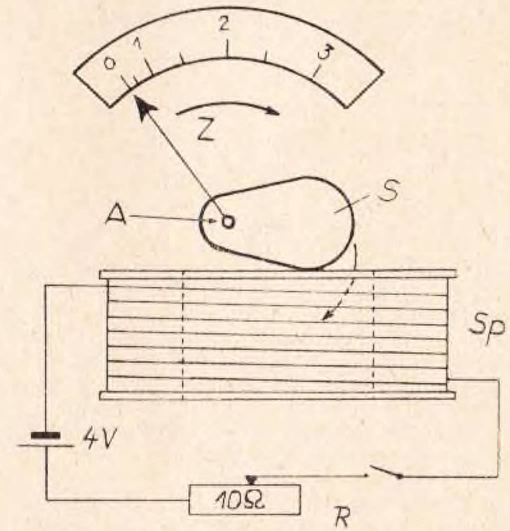


Abb. 6

Eine Weicheisenscheibe S ragt zu einem geringen Teil in den Hohlraum einer Spule Sp, die ihrerseits über einen Schiebewiderstand R und einen Schalter mit einer Spannungsquelle von 4 V Spannung verbunden ist. Auf der Scheibe ist exzentrisch eine Achse A befestigt, die mit einem Zeiger Z fest verbunden ist. Um die Achse A ist als Gegenkraft eine Spiralfeder angebracht (in Abb. 6 nicht dargestellt). Je schwächer der die Spule durchfließende Strom ist, um so mehr wirkt die Gegenkraft der Spiralfeder, und die Scheibe S wird nur um ein weniges in den Hohlraum der Spule hineingezogen.

Verkleinern wir den Widerstand *R* (Schieber nach links!), so baut der nunmehr stärker fließende Strom ein stärkeres Magnetfeld auf, das die Scheibe S tiefer in den Hohlraum der Spule hineinzieht. Dadurch schlägt der Zeiger Z weiter nach rechts aus. Der Zeigerausschlag ist abhängig von der Stärke des Kraftflusses der Spule und damit auch von dem Strom *I*, so daß man die Skala in Ampere eichen kann. Die Skaleneinteilung beim Weicheiseninstrument ist — wie beim Hitzdrahtstrommesser — ebenfalls nicht linear, weil die magnetische Kraft *P* mit dem Quadrat der Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ wächst. Durch bestimmte Maßnahmen erreichen die Herstellerfirmen jedoch auf einem Teil der Skala, meist am Anfang oder in der Mitte, eine gewisse Linearität, je nachdem in welchem Bereich die größte Ablesegenauigkeit erwünscht ist.

Versuch 2: (Abb. 7)

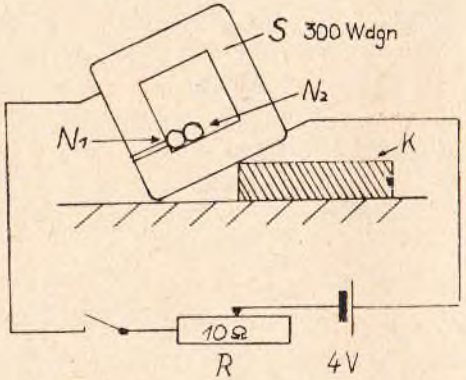


Abb. 7

Wir nehmen wiederum eine Spule mit 300 Windungen und zwei dicke Nägel, die länger sind als die Spule selbst. Einen dieser Nägel (N_1) befestigen wir mittels eines Gummibandes so, daß er — wie in Abb. 7 — fest in der linken unteren Ecke der Spule zu liegen kommt. Einen zweiten Nagel (N_2) legen wir daneben. Durch einen Holzklotz K neigen wir die Spule, so daß Nagel 1 und Nagel 2 dicht nebeneinander liegen. Schalten wir die Spule S über einen Schiebewiderstand *R* an eine Batterie von 4 V Spannung, so werden wir bemerken, daß der Nagel 2 sich von Nagel 1 um so mehr entfernt, je kleiner der Widerstand *R* gemacht wird, d. h. je stärker der die Spule S durchfließende Strom ist.

Die Ursache dieser Erscheinung ist aus Band II a, Abschnitt „Elektromagnetismus" ohne weiteres zu ersehen: die Enden der Nägel werden gleichnamig magnetisch, weil beide von einem Kraftfluß der **gleichen** Richtung durchsetzt werden; sie stoßen sich also ab. Als Gegenkraft dient bei diesem Versuch die Anziehungskraft der Erde, die durch das Schrägstellen der Spule S auf den Nagel 2 in Richtung des Nagels 1 wirkt. Die abstoßenden Kräfte der beiden gleichnamigen Pole müssen also die auf den Nagel 2 wirkende Schwerkraft

überwinden. Das geschieht um so mehr, je stärker der Strom ist, der die Spule durchfließt. Bei entsprechend starkem Stromfluß wandert der Nagel 2 bis in die entgegengesetzte Ecke des Hohlraumes der Spule.

Stellen wir die Spule S waagerecht und ersetzen den Nagel 2 durch einen Eisenblechstreifen E (Abb. 8), der an einer Seite einen Zeiger trägt, so stellen

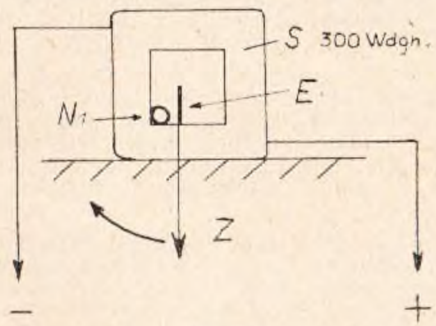


Abb. 8

wir einen ähnlichen Vorgang fest, wie im vorhergehenden Versuch beschrieben. Die gleichnamigen Pole des Nagels und des Eisenbleches stoßen sich mit stärker werdendem Spulenstrom immer mehr ab, so daß der Zeiger Z einen entsprechend großen Ausschlag nach links macht.

Die praktische Anwendung des Versuches 2 ergibt das „Dreheisenmeßwerk", dessen Arbeitsweise Abb. 9 zeigt. In dem Hohlraum einer Spule Sp ist ein

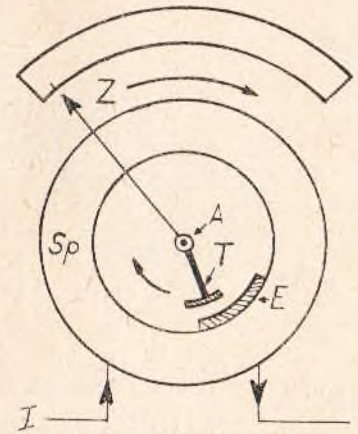


Abb. 9

Weicheisenstück E befestigt. Durch die Mitte der Spulenachse führt die Zeigerachse A, die den Zeiger Z und ein T-förmiges Weicheisenstück T trägt. Gegenkraft, Dämpfung und Achslagerung sind aus Übersichtlichkeitsgründen fortgelassen worden. Anfang und Ende der Spule sind herausgeführt. Der Strom-ein- und -austritt ist durch Pfeile dargestellt. Man muß sich die Spulenwicklung so vorstellen, daß sie im Uhrzeigersinne verläuft und die mit Sp bezeichnete Fläche den vorderen Flansch des Spulenkörpers darstellt. Nach der „Rechtehandregel" blicken wir auf den Südpol der Spule (vgl. Band II a, 1. Auflage, Ziffer 50, 2. Auflage, Ziffer 12). Die Eisenstücke E und T werden bei Stromfluß durch die Spule gleichnamig magnetisch. Da das Eisenstück T drehbar angeordnet ist, weicht es entsprechend der Stärke des Stromes mehr oder weniger im Uhrzeigersinne aus und nimmt den Zeiger mit. Die Drehrichtung ist durch Pfeile dargestellt.

Dreheiseninstrumente werden in der Praxis häufiger verwendet als Tauchspulinstrumente. Sie sind billig, dauerhaft und auch verhältnismäßig genau in den Meßwerten. Die Empfindlichkeit eines Weicheiseninstrumentes ist wesentlich größer als die eines Hitzdrahtstrommessers. Man kann mit ausreichender Genauigkeit bei guten Geräten noch Stromstärken von etwa 10 mA ablesen.

Die Ausführungsform des Dreheisenmeßwerkes der Firma Hartmann & Braun zeigt Abb. 10. Wir erkennen die Spule Sp der Abb. 9 im Schnitt, ferner das

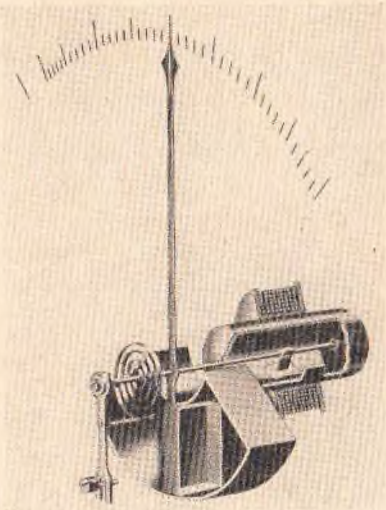


Abb. 10

(Werkfoto: Hartmann & Braun)

feste und das T-förmige Eisenstückchen sowie die Achse mit der Gegenkraft (Spiralfeder). Darüber hinaus (unten links) finden wir eine Einrichtung, die es gestattet, die Nullstellung des Zeigers zu berichtigen. Sehr deutlich hebt sich die Luftdämpfung ab.

Weicheiseninstrumente sind gleichermaßen für Gleich- und Wechselstrom zu gebrauchen. Vertauschen wir z. B. in Abb. 5 oder Abb. 7 die Spulenanschlüsse

an der Batterie, so ändert sich nichts an der Wirkungsweise. Beim Tauchspulinstrument Abb. 5 ist es dem Eisenstück, das in den Spulenkörper hineingezogen wird, gleichgültig, ob die Ursache von einem Nord- oder Südpol herrührt. Bei einem Dreheiseninstrument stehen sich grundsätzlich immer gleichnamige Pole gegenüber. Schicken wir einen Wechselstrom durch die Spule, so werden wir aus den obigen Gründen ebenfalls einen Zeigerausschlag feststellen. Da aber der Scheinwiderstand der Spule und die Hysteresisverluste mit steigender Frequenz zunehmen, können wir für Wechselstrom nicht die gleiche Skala verwenden wie für Gleichstrom. Für verschiedene Frequenzen (z. B. 25 Hz des Rufstromes beim Kurbelinduktor oder 50 Hz beim technischen Wechselstrom) brauchen wir zwei Skalen. Auf den Instrumenten ist daher — neben anderem — die Frequenz angegeben, auf die das Instrument geeicht ist.

(5) Drehspulmeßinstrumente

Drehspulmeßinstrumente sind bei der DBP am meisten in Gebrauch, weil sie gegenüber den bisher besprochenen Meßinstrumenten eine große Meßgenauigkeit besitzen und auch elektrisch sehr empfindlich sind. In einem besonderen Aufbau, der weiter unten behandelt wird, lassen sich selbst Ströme in der Größenordnung um etwa 10^{-8} A $= \frac{1}{100\,000\,000}$ A $= \frac{1}{100\,000}$ mA messen.

Zur Erläuterung der Wirkungsweise eines Drehspulmeßwerkes bauen wir folgenden Versuch auf (Abb. 11):

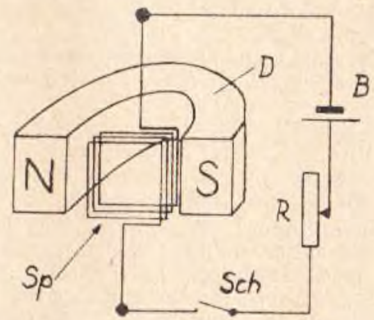


Abb. 11

Zwischen den Polen eines kräftigen Dauermagneten D hängen wir eine Spule Sp auf, die aus wenigen Windungen dicken Drahtes oder Aluminiumrohres besteht. Anfang und Ende der Spule Sp sind isoliert aufgehängt und über einen Schiebewiderstand *R* mit den Polen einer Batterie B verbunden. Schließen wir den Schalter Sch, so stellen wir fest, daß die Spule Sp sich in eine bestimmte Richtung dreht. Verstärken wir den Strom, so dreht sich die Spule noch mehr; zuletzt stellt sich die Spulenachse in Richtung des homogenen Feldes des Dauermagneten, d. h. sie hat eine Drehung von 90° vollführt. Vertauschen wir die Spulenanschlüsse an der Batterie, so erkennen wir, daß die Spule sich in entgegengesetzter Richtung dreht wie vordem.

Wie ist dieses Verhalten der Spule zu erklären? Hierzu betrachten wir Abb. 12. Hier sehen wir die Spule Sp der Abb. 11 im Schnitt dargestellt, so daß wir auf die Windungsflächen der Spule blicken. Die Spule selbst ist drehbar auf einer Achse A gelagert. Links von der Spule befindet sich der Nordpol

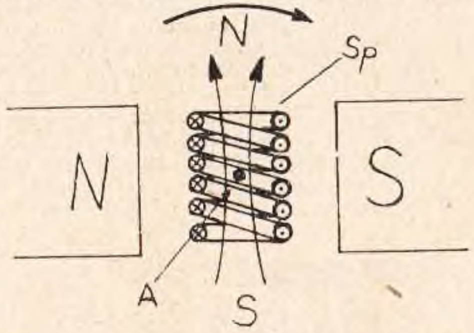


Abb. 12

des Dauermagneten und rechts der Südpol. Schließen wir die Spule gem. Abb. 11 so an, daß durch die linke Wicklungshälfte der Strom eintritt und aus der rechten austritt, so erhalten wir nach der „Rechtehandregel" einen Kraftfluß durch den Hohlraum der Spule von unten nach oben. Dieser Kraftfluß verläuft senkrecht zum Kraftfluß des Dauermagneten. Nach dem magnetischen Grundgesetz wird sich die Spule, wenn keine Gegenkraft vorhanden ist, um 90° nach rechts drehen, weil der Nordpol der Spule vom Südpol des Dauermagneten bzw. der Südpol der Spule vom Nordpol des Dauermagneten angezogen wird.

Vertauschen wir die Stromrichtung, so haben wir in der Spule unten einen Nordpol und oben einen Südpol. Die Spule wird sich demnach nach links drehen.

Bringen wir eine Gegenkraft in Form von Spiralfedern an, so ist der Drehwinkel der Spule von der Stärke des sie durchfließenden Stromes abhängig. Befestigen wir an der Achse A Abb. 12 einen Zeiger, der über eine Skala gleitet, so können wir die Skala in Ampere eichen.

Wovon ist die Stromempfindlichkeit einer solchen Anordnung abhängig? Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß die Feldstärke zwischen den Polen des Dauermagneten eine große Rolle spielt. Je größer die magnetische Feldstärke ist, um so stärker wirken sich die magnetischen Kräfte auf den Elektromagneten, den die Spule ja darstellt, aus. Vergrößern wir die Aw-Zahl der Spule gemäß Band IIa, Ziffer 51 (1. Auflage), Ziffer 13 (2. Auflage) dadurch, daß wir ihr mehr Windungen geben als in Abb. 12 dargestellt, so wird bei gleichbleibender Stromstärke der Ausschlag des Zeigers größer werden. Befestigen wir in dem Hohlraum der Spule Abb. 12 einen Weicheisenkern, so erhöhen wir die Kraftflußdichte bedeutend, nämlich um das μ-fache, (vgl. Band IIa, Ziffer 52 [1. Auflage], Ziffer 14 [2. Auflage]). Die Stromempfindlichkeit des Meßwerkes wächst durch diese Maßnahme erheblich.

Die praktische Ausführung eines Drehspulmeßwerkes zeigt Abb. 13.

Hier erkennen wir den Hufeisenmagneten, der mit Polschuhen ausgerüstet ist, um den magnetischen Widerstand der Luft so gering wie möglich zu halten. Ferner erkennen wir eine Weicheisentrommel, die einen Kupfer- oder Aluminiumrahmen trägt, auf den die Spule gewickelt ist. Dieser Kupfer-

oder Aluminiumrahmen dient gleichzeitig zur Dämpfung (Wirbelstromdämpfung). Ferner erkennen wir die Trommelachse, auf der zwei Spiralfedern als Gegenkraft befestigt sind.

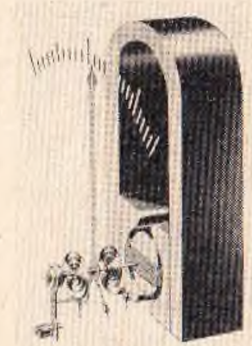


Abb. 13
(Werkfoto: Hartmann & Braun)

Das Ende einer Spiralfeder steht mit dem A n f a n g, das Ende der zweiten Feder mit dem E n d e der Spule in Verbindung; beide Federn dienen der Stromzuführung. Demzufolge müssen die Anfänge der Spiralfedern von der Achse isoliert werden. Zwischen den beiden Spiralfedern ist der Zeiger des Meßwerkes mit der Achse fest verbunden. Um den Zeiger bei jeder Lage des Instrumentes in der Ruhelage zu halten, sind an ihm unterhalb der Achse zwei Gewindestifte mit Muttern angebracht. Ein etwa notwendiger Ausgleich wird durch Ein- oder Ausdrehen der Muttern erzielt. Vorn links an der Achse erkennen wir die Null-Korrektur. Mit dieser Einrichtung läßt sich bei manchen Instrumenten der Zeiger so weit verstellen, daß seine Nullage in der Mitte der Skala liegt. Während bei den meisten Instrumenten der Zeiger von Stellung Null bis auf 90° im Höchstfall in e i n e r Richtung ausschlagen kann, ist der Zeiger bei Nullstellung „Mitte" in der Lage, um 45° nach links oder nach rechts auszuschlagen (s. Abb. 14).

Ein solches Instrument nennt man ein „Galvanometer".

Aus dem Versuch Abb. 11 und den Erläuterungen zu Abb. 12 haben wir erkannt, daß die S t r o m r i c h t u n g maßgebend ist für die Richtung des Zeigerausschlages. Haben wir ein Instrument, dessen Zeigerausschlag „Null" sich am linken Ende der Skala befindet, so kann bei r i c h t i g e m Anschluß des Instrumentes der Zeiger um 90° nach rechts ausschlagen. Bei verkehrtem Anschluß bewegt sich der Zeiger — von der Nullstellung aus gesehen — nach links und schlägt dabei gegen eine Arretierung, so daß das Instrument beschädigt werden kann. Bei Drehspulinstrumenten mit Zeigerstellung Null auf dem äußersten linken Ende der Skala ist daher auf den richtigen Anschluß (+ und —) genau zu achten. Bei einem Galvanometer nach Abb. 14 kann der Zeiger — je nach Stromrichtung — nach links u n d nach rechts ausschlagen. Mit einem solchen Instrument sind wir daher nicht nur in der Lage, die S t ä r k e eines Stromes zu messen, sondern auch dessen R i c h t u n g zu bestimmen.

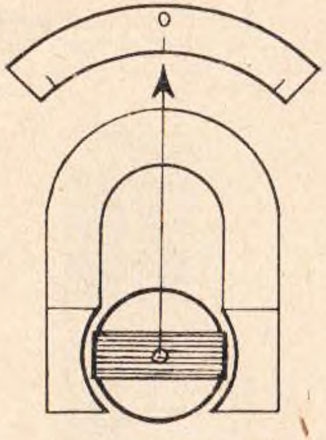


Abb. 14

Bei einem Drehspulinstrument ist die Skaleneinteilung linear, daher ist die Ablesegenauigkeit im Vergleich zu den Hitzdraht- und Weicheiseninstrumenten auch bei kleinen Stromstärken recht genau.

Aus dem Vorhergesagten ergibt sich, daß ein Drehspulmeßwerk nur zum Messen von G l e i c h s t r ö m e n verwendet werden kann. Wechselstrommessungen können nur durchgeführt werden, wenn das Meßwerk zusätzlich mit einem Gleichrichter ausgestattet ist. Für Wechselstrommessungen ist jedoch eine besondere Skala erforderlich.

Eingangs erwähnten wir, daß bei einem besonderen Aufbau des Drehspulmeßwerkes Ströme in der Größenordnung um etwa 10^{-8} Ampere gemessen werden können. Diese Meßgenauigkeit erreichen wir durch einen fabrikatorisch besonderen Aufbau der Spule. Eine Möglichkeit ist in Abb. 15 im Prinzip dargestellt.

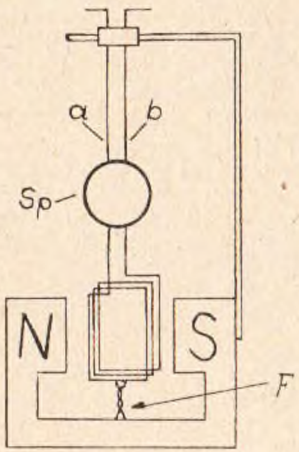


Abb. 15

Hier ist die Spule nicht um eine Achse drehbar gelagert, sondern sie hängt an zwei Zuleitungsdrähten (a und b). Damit die Spule nicht pendeln kann, ist sie unten mittels eines verdrallten Fadens F am Gehäuse (hier der Dauermagnet) befestigt. Der verdrallte Faden wirkt als Gegenkraft. An den Zuführungsdrähten ist ein kleiner Spiegel Sp angebracht, der durch eine punktförmige Lichtquelle angeleuchtet wird. Die gesamte Anordnung ähnelt stark der Abb. 11. Fließt durch die Spule ein Strom, so wird sie abgelenkt. Der reflektierte Lichtpunkt (Lichtstrahl) stellt den Zeiger des Instrumentes dar, der über eine Skala wandert. Je größer der Abstand zwischen Spiegel und Skala ist, um so genauer wird eine winzige Drehung der Spule angezeigt.

Ein solches Drehspulinstrument nennt man ein S p i e g e l g a l v a n o m e t e r. Derartige Instrumente werden in erster Linie von den Kabelmeßbeamten verwendet, um eine genaue Fehlerortsbestimmung bei Kabelstörungen zu treffen.

(6) Elektrodynamische Meßgeräte

Elektrodynamische Meßgeräte werden in der Fernmeldetechnik wenig verwendet; sie sollen daher nur kurz gestreift werden. Diese Meßwerke enthalten eine feste und eine bewegliche Spule. Beide Spulen werden so geschaltet, daß sie von einem Strom der g l e i c h e n Richtung durchflossen werden. Die Wirkungsweise ist ähnlich der der Drehspulmeßwerke, wobei der Dauermagnet des Drehspulmeßwerkes durch den Elektromagneten der festen Spule ersetzt wird. Kehren wir die Stromrichtung um, so kehrt sich sowohl die Feldrichtung in der festen Spule als auch in der beweglichen Spule um, so daß der Zeiger des Instrumentes stets in der gleichen Richtung ausschlägt. Aus diesem Grunde können elektrodynamische Meßgeräte auch für das Messen von Wechselströmen verwendet werden. Die Abbildungen 16 und 17 zeigen zwei Ausführungsformen.

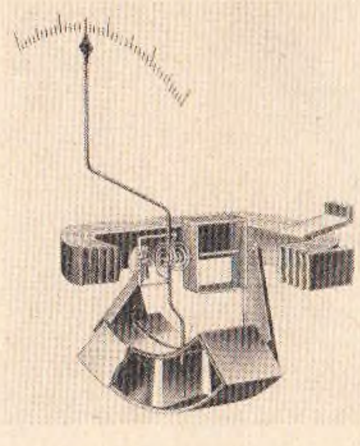


Abb. 16
(Werkfoto: Hartmann & Braun)

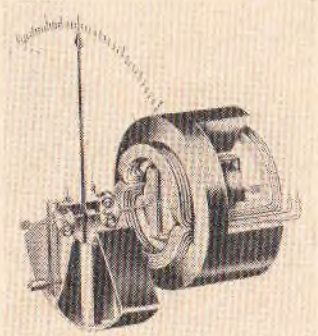


Abb. 17
(Werkfoto: Hartmann & Braun)

Auf die Verwendung von elektrodynamischen Meßgeräten als Leistungsmesser werden wir noch zu sprechen kommen.

(7) Elektrostatische Meßinstrumente

Elektrostatische Meßinstrumente sprechen nicht auf den elektrischen Strom an, sondern auf die elektrische Spannung, d. h. auf die Wirkung des elektrischen Feldes, das sich als Folge eines Spannungszustandes zwischen zwei voneinander isolierten Leitungen aufbaut. Näheres hierüber wäre im Band I b, Abschnitt V, „Ruhende elektrische Ladungen", nachzulesen.

Elektrostatische Instrumente werden in erster Linie in Laboratorien und Prüfanlagen benutzt. Die Ausführungsformen und die Spannungsempfindlichkeit sind sehr unterschiedlich. Es gibt Instrumente, die bereits auf sehr niedrige Spannungen (nur wenige Volt) ansprechen. Im allgemeinen dienen elektrostatische Instrumente jedoch dazu, hohe Spannungen zu messen.

(8) Frequenzmesser

Wie der Name schon sagt, dienen Frequenzmesser dazu, die Frequenz eines Wechselstromes festzustellen. Wir kennen Frequenzmesser aus der Praxis: sie befinden sich in der Ausführungsform als Zungenfrequenzmesser z. B. in Prüfschränken und im Nummernschalter-Prüfgerät (s. Bd. XV, Abb. 19 u. 26).

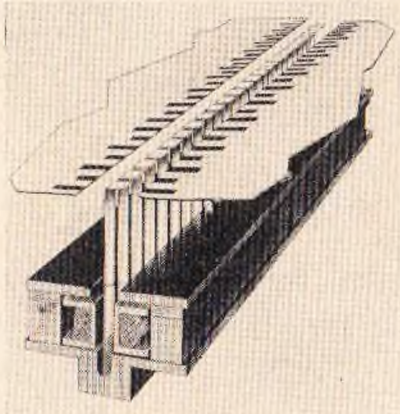


Abb. 18
(Werkfoto: Hartmann & Braun)

Stahlzungen, von denen jede auf eine bestimmte Frequenz, z. B. 48, 49, 50 und 51 Hz, abgestimmt ist, werden an einem Ende fest eingespannt. Das andere Ende kann frei schwingen. Sämtliche Stahlzungen eines Frequenzmessers befinden sich im Kraftfeld eines von Wechselstrom durchflossenen

Elektromagneten. Die Zungen werden infolge des wechselnden Kraftflusses angestoßen und geraten ins Schwingen. Am meisten schlägt die Zunge aus, deren Eigenschwingung der Frequenz des Wechselstromes entspricht. Die dieser Zunge benachbarten schwingen mit größer werdendem Abstand von der angestoßenen Zunge immer weniger mit. Die Abbildung 18 zeigt eine Ausführungsform eines Zungenfrequenzmessers, die Abbildung 19 die Draufsicht. Wir sehen, wie die Zungen bei bestimmten Frequenzen ausschlagen.

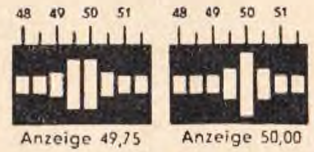


Abb. 19
(Werkfoto: Hartmann & Braun)

Hiermit haben wir den Aufbau und die Wirkungsweise der gebräuchlichsten Meßinstrumente behandelt und gehen im Nachfolgenden auf die praktische Verwendung, insbesondere auf die des Drehspulmeßwerkes ein. Vorher wollen wir uns noch mit den Zeichen befassen, die jedes gute Instrument auf der Skalenscheibe zu tragen hat.

(9) Normen für Meßinstrumente gem. VDE 0410/X 38

a) Um die Meßinstrumente bezüglich ihrer Empfindlichkeit zu kennzeichnen, hat man sie in sogenannte „Güteklassen" eingeteilt. Man unterscheidet hierbei zwischen Feinmeßgeräten, die das Klassezeichen 0,2 oder 0,5, und Betriebsmeßgeräten, die das Klassezeichen 1,0, 1,5 und 2,5 tragen. Die Zahlen geben an, bei welcher Stromstärke in mA der Zeiger des Instrumentes voll ausschlägt.

b) Auf den Skalenscheiben der Meßinstrumente ist im allgemeinen ein sogenanntes „Lagezeichen" aufgedruckt, das uns angibt, in welche Lage das Instrument zu bringen ist, wenn es genau anzeigen soll (s. Abb. 20). Ist kein Lagezeichen vorhanden, so muß das Instrument in jeder Lage genau anzeigen.

c) Um die Art des Meßwerkes, z. B. Weicheisen- oder Drehspulmeßwerk, zu erkennen und um festzustellen, für welche Stromart das Instrument verwendet werden kann, sind bestimmte Sinnbilder vorgeschrieben, die ebenfalls auf jeder Skalenscheibe aufgedruckt sein müssen. Die wichtigsten sind aus Abbildung 20 zu ersehen.

Wir haben nur einen Teil der in Abbildung 20 aufgeführten Instrumente besprochen und wollen uns deshalb nur die Sinnbilder für diese merken.

d) Auf jedem Instrument muß ein Aufdruck vorhanden sein, aus dem ersichtlich ist, welche Einheiten, z. B. V, A, Ω, gemessen werden können. Die Skalen sind dementsprechend geeicht. Ausnahmen bilden Mehrzweck-Instrumente (Universal-Meßinstrumente), bei denen die Skalen nicht in Einheiten geeicht sind. Sie tragen Teilstriche, z. B. von 0 bis 60, von denen im allgemeinen jeder 10. Teilstrich beziffert ist (s. Abbildung 21). Das, was wir

Art des Meßinstrumentes	Sinnbild
Drehspulinstrument mit Dauermagnet	
Drehspul-Quotientenmesser (Kreuzspul-Ohmmeter)	
Drehmagnetinstrument	
Dreheiseninstrument	
Elektrodynamisches Instrument	
Eisengeschlossenes, elektrodynamisches Instrument	
Elektrodynamischer Quotientenmesser	
Eisengeschlossener elektrodynamischer Quotientenmesser	
Induktionsinstrument	
Bimetallinstrument	
Elektrostatisches Instrument	
Vibrationsinstrument	
Thermoumformer allgemein	
Drehspulinstrument mit Thermoumformer	
Isolierter Thermoumformer	
Gleichrichter	
Drehspulinstrument mit Gleichrichter	

Art des Meßinstrumentes	Sinnbild
Instrument mit Eisenschirm (Sinnbild für den Schirm)	○
Instrument mit elektrostatischem Schirm (Sinnbild für den Schirm)	
Astatisches Meßwerk	ast
Gleichstrominstrument	—
Wechselstrominstrument	~
Gleich- und Wechselstrom-Instrument	
Drehstrominstrument mit einem Meßwerk	
Drehstrominstrument mit zwei Meßwerken	
Drehstrominstrument mit drei Meßwerken	
Senkrechte Gebrauchslage	⊥
Waagerechte Gebrauchslage	
Schräge Gebrauchslage mit Angabe des Neigungswinkels	∠60°
Zeigernullstellvorrichtung	
Prüfspannungszeichen Die Ziffer im Stern bedeutet die Prüfspannung in kV (Stern ohne Ziffer 500 V Prüfspannung)	☆
Achtung (Gebrauchsanweisung beachten)	⚠
Instrument entspricht bezüglich Prüfspannung nicht den Regeln	ϟ

Abb. 20

messen wollen, z. B. die Stromstärke oder die Spannung, geht aus bestimmten Schalterstellungen des Instrumentes hervor. Ein solches Instrument, auf das wir später genau eingehen werden, zeigt Abbildung 22 (Multavi).

Abb. 21

e) In der Abbildung 20 unten rechts erkennen wir das Prüfspannungszeichen in Form eines Sternes. Unter der Prüfspannung verstehen wir eine Wechselspannung zwischen dem Gehäuse und dem Meßwerk einschließlich der Stromzuführungen, oder, anders ausgedrückt, die Durchschlagsfestigkeit (vgl. hierzu Band I b, Prüfspannungen an Kondensatoren). Näheres wäre in der „Telegraphenmeßordnung" (TMO), Teil 4, ab S. 164 nachzulesen.

Abb. 22

(Werkfoto: Hartmann & Braun)

Da jedes Meßgerät infolge seines Aufbaues, seiner elektrischen Eigenschaften, der Lagerreibung, der Temperaturschwankungen usw. niemals eine hundertprozentige Genauigkeit hat, ist ebenfalls auf der Skalenscheibe die höchst zulässige Abweichung in von-Hundert-(v. H.)-Werten angegeben. Bei den Betriebsmeßgeräten gem. a) beträgt die Ablesegenauigkeit bei Endausschlag des Zeigers im Durchschnitt ± 1,5 Prozent des zu messenden Wertes. Bei einem Strommesser, der Messungen bis zu 5 A gestattet, bedeutet das, daß die Ablesegenauigkeit bei 5 A entweder zwischen 1,5 Prozent über dem Sollwert oder 1,5 Prozent unter dem Sollwert schwanken kann, d. h. zwischen 4,925 und 5,075 A der tatsächlichen Stromstärke gem. dem Ohmschen Gesetz.

II. Schaltung von Meßwerken als Strom- und Spannungsmesser

(10) Schaltung eines Meßwerkes als Strommesser

In den Bänden Ia und Ib haben wir gesehen, daß die Stärke des elektrischen Stromes I abhängig von der in der Zeiteinheit bewegten Elektrizitätsmenge Q ist $\left(I = \frac{Q}{t}\right)$. Je größer die in einer Sekunde bewegte Elektrizitätsmenge ist, um so größer ist auch die Stromstärke.

Im Band Ib haben wir die bewegte Elektrizitätsmenge Q mit einer bewegten Wassermenge Q verglichen. Um die Wasserstromstärke messen zu können, müssen wir ein Instrument so einbauen, daß es von der gesamten in der Zeiteinheit t bewegten Wassermenge durchflossen wird. Das gleiche gilt für einen (elektrischen) Strommesser: er soll uns die in der Zeiteinheit bewegte Elektrizitätsmenge Q, also die Stromstärke, anzeigen. Das Instrument ist daher **in** die stromführende Leitung zu schalten.

Zum Messen der Stromstärke I in einem Stromkreis muß das Meßwerk in die Leitung geschaltet werden.

Abbildung 23 zeigt die grundsätzliche Schaltungsanordnung. Der Strommesser ist durch einen Kreis dargestellt, in dem sich ein großes lateinisches A (Ampere) befindet.

Um die Schaltung eines Meßwerkes als Strom- und Spannungsmesser zu verstehen, müssen wir uns mit dem inneren Widerstand R_m des Meßwerkes beschäftigen. Aus dem Abschnitt I können wir ersehen, daß jedes Instrument

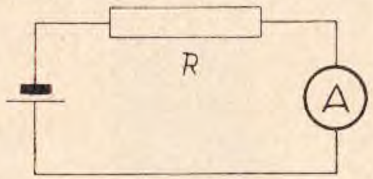


Abb. 23

einen bestimmten Eigenwiderstand (Meßwerkwiderstand R_m) haben muß. Beim Weicheiseninstrument wird dieser Widerstand durch den Widerstand der festen Spule bestimmt, beim Drehspulmeßinstrument durch den Widerstand der Drehspule.

Unseren Betrachtungen wollen wir in der Hauptsache das Drehspulmeßinstrument zugrunde legen, weil dieses das bei der DBP weitaus gebräuchlichste Instrument ist.

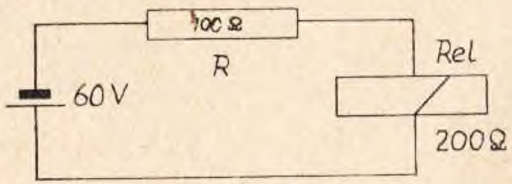


Abb. 24

Wir betrachten den Stromkreis in der Abbildung 24. Hier ist ein Widerstand R zu 100 Ohm mit einem Relais *Rel* von 200 Ohm in Reihe geschaltet. Nach dem Ohmschen Gesetz fließt demnach in dem Stromkreis ein Strom $I = \frac{U}{R} = \frac{60}{300} = 0{,}2$ A.

Um festzustellen, ob diese Stromstärke wirklich vorhanden ist, müssen wir unseren Strommesser gemäß Abb. 23 in die Leitung schalten. Hierbei ist es gleichgültig, wo wir das Instrument einbauen; denn die Stromstärke in einem unverzweigten Stromkreis ist an jeder Stelle des Stromkreises gleich (s. Bd. Ia, Ziffer 10a, letzter Absatz).

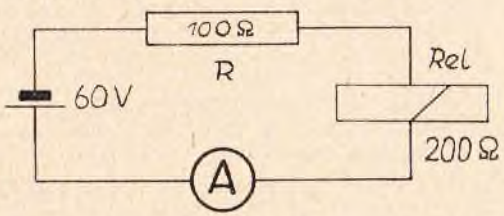


Abb. 25

Den Strommesser A schalten wir gemäß Abbildung 25. Er müßte genau 0,2 A anzeigen. Tut er das wirklich? Hierzu müssen wir einige Überlegungen anstellen.

Aus Ziffer 5 haben wir erkennen können, daß die Wicklung der Drehspule wegen der sich damit vergrößernden magnetischen Feldstärke $\mathfrak{H}$ aus verhältnismäßig vielen Windungen dünnen Drahtes besteht. Die vielen Windungen ergeben jedoch einen verhältnismäßig hohen Eigenwiderstand R_m. Wir nehmen an, daß der Widerstand R_m der Drehspule 100 Ohm beträgt und daß die Spule einen verhältnismäßig hohen Strom vertragen kann, ohne daß sie durch die auftretende Elektrowärme ($0{,}24 \times I^2 \times R \times t$, s. Band Ib, Ziffer 11) zerstört wird.

Welche Stromstärke zeigt uns dieses Instrument an?

Infolge des hohen Widerstandes der Spule (100 Ohm) hat sich der Gesamtwiderstand im Stromkreis Abb. 25 um diese 100 Ohm erhöht; er beträgt 100 Ohm (R) + 200 Ohm (*Rel*) + 100 Ohm (Strommesser A), also insgesamt 400 Ohm gegenüber 300 Ohm der Schaltung Abb. 24.

Nach dem Ohmschen Gesetz ist jetzt die Stromstärke $I = \frac{U}{R} = \frac{60}{400} = 0{,}15$ A.

Der hohe Widerstand des Strommessers A bewirkt, daß die Stromstärke in dem zu messenden Stromkreis nicht unerheblich sinkt. Der Strommesser mit einem hohen Eigenwiderstand R_m beeinflußt demnach das Meßergebnis beträchtlich.

Wie sieht es in dem Stromkreis Abb. 25 mit den Spannungsabfällen über dem Widerstand R und dem Relais *Rel* aus? Da sich gemäß Band Ia, Ziffer 16, die Spannungsabfälle wie die Widerstände verhalten, verhalten sich die Spannungsabfälle über R und *Rel* wie 1 : 2. Über R fallen 20 V und über *Rel* 40 V ab. Auch die Anwendung des Ohmschen Gesetzes führt zum gleichen Ergebnis: die Stromstärke I in dem Stromkreis Abb. 24 beträgt 0,2 A, der Spannungsabfall über R demnach $U = I \times R = 0{,}2 \times 100 = 20$ V und der Spannungsabfall über dem Relais *Rel* gleich $0{,}2 \times 200 = 40$ V. Die Summe aller Spannungsabfälle im äußeren Stromkreis ist bekanntlich gleich der Klemmenspannung U (vgl. Band Ia, Ziffer 26), in unserem Beispiel also 20 V + 40 V = 60 V.

Schalten wir unseren „Strommesser" mit einem inneren Widerstand R_m von 100 Ohm in die Leitung, so verändern sich die Spannungsabfälle. Der Spannungsabfall über R beträgt $U = I \times R = 0{,}15 \times 100 = 15$ V, der über *Rel* = $0{,}15 \times 200 = 30$ V und der über dem inneren Widerstand R_m des Meßwerkes $= 0{,}15 \times 100 = 15$ V. Zwar ist die Summe der Spannungsabfälle auch hier gleich 60 V, aber die Spannungsabfälle über den Teilwiderständen in dem Stromkreis haben sich in ihrer Höhe verkleinert.

Der hohe innere Widerstand des „Strommessers" hat also bewirkt, daß sich die Strom- und Spannungsverhältnisse in dem Stromkreis erheblich verändert haben.

Mit einem solchen „Strommesser" können wir also nichts anfangen, weil er die in dem Stromkreis normalerweise vorhandenen Strom- und Spannungsverhältnisse verfälscht.

Wie groß muß nach diesen Überlegungen der innere Widerstand eines Strommessers sein? Die Antwort ist leicht zu finden: er muß so groß sein, daß er die nach dem Ohmschen Gesetz im Stromkreis herrschenden Verhältnisse nicht beeinflußt. Im Idealfalle muß $R_m = 0$ Ohm betragen. Es tritt dann über R_m kein Spannungsabfall auf; ferner wird der Gesamtwiderstand im Stromkreis nicht verändert. Da aber aus technischen Gründen — wie aus

Abschnitt I hervorgeht — jedes Meßinstrument, das auf der magnetischen Wirkung des elektrischen Stromes beruht, zwangsläufig einen Widerstand hat, der durch die Länge, den spezifischen Widerstand und den Querschnitt des Spulendrahtes bedingt ist, müssen wir versuchen, diesen Widerstand R_m so klein wie möglich zu halten.

Bei Weicheiseninstrumenten erreicht man dieses Ziel, indem man der festen stromdurchflossenen Spule nur wenige Windungen dicken Drahtes gibt. Bei Drehspulmeßwerken, deren Spulenwiderstand je nach Stromempfindlichkeit einen mehr oder weniger großen Widerstand haben kann, wird das Ziel durch Parallelschalten eines niederohmigen Widerstandes zur Drehspule erreicht. Hierdurch wird der gesamte innere Widerstand des Instrumentes kleiner als der des kleinsten Widerstandes (vgl. Band Ia, Ziffer 12). Auf diese Nebenwiderstände wird später eingegangen werden.

Wir merken uns:

Bei einem Strommesser muß der innere Widerstand R_m des Meßwerkes so klein wie möglich gehalten werden. Je kleiner R_m ist, um so genauer ist die Anzeige.

Der höchstzulässige innere Widerstand bei Strommessern ergibt sich aus folgender Rechnung:

$$R_m = \frac{1}{10 \times I}$$

(Beachte, daß der Wert von I einen Teil des Nenners darstellt!)

1. Beispiel:

Wie groß ist der höchstzulässige innere Widerstand R_m eines Meßwerkes, wenn der Meßbereich 0 — 3 A betragen soll?

Lösung:

$$R_m = \frac{1}{10 \times I} = \frac{1}{10 \times 3} = \frac{1}{30} = 0{,}033 \text{ Ohm}$$

2. Beispiel:

Wie groß darf der höchstzulässige innere Widerstand R_m eines Strommessers sein, wenn er bis zu 100 mA = 0,1 A mit hinreichender Genauigkeit anzeigen soll?

Lösung:

$$R_m = \frac{1}{10 \times I} = \frac{1}{10 \times 0{,}1} = \frac{1}{1{,}0} = 1 \text{ Ohm}$$

Bei guten Strommessern muß der innere Widerstand des Instrumentes wesentlich geringer sein als der nach obiger Formel zu berechnende. Hierauf werden wir im weiteren Verlauf dieser Abhandlung zu sprechen kommen.

(11) Schaltung eines Meßwerkes als Spannungsmesser

Um die Höhe der Spannung zwischen zwei Punkten verschiedenen Potentials*) feststellen zu können, muß man das Meßinstrument, mit dem wir die Potentialdifferenz oder Spannung messen wollen, an diese beiden Punkte legen. Fällt eine Spannung über einem Widerstand ab, so haben wir an einem Ende des Widerstandes ein höheres Potential gegenüber dem anderen. Damit wir diese Potentialdifferenz messen können, muß das Instrument **parallel** zu dem Widerstand, über dem der Spannungsabfall auftritt, geschaltet werden.

*) Anm.: Vgl. Band Ib, Ziffer 26.

Die Anordnung der Abb. 24 wollen wir in Abb. 26 noch einmal betrachten.

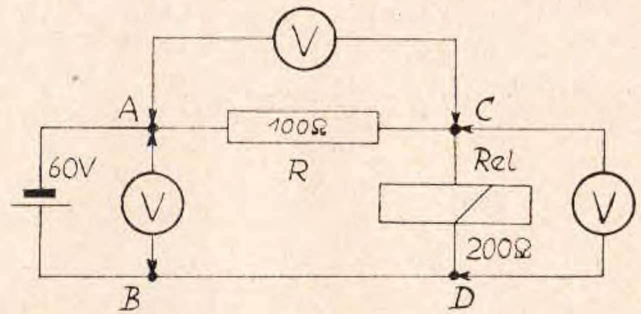


Abb. 26

Zwischen + und — der Batterie herrscht eine Spannung (eine Potentialdifferenz) von 60 V. Wollen wir diese Spannung messen, so müssen wir das Instrument parallel zu den Anschlüssen der Batterie legen (in Abb. 26 dargestellt durch die Punkte A und B). Hier messen wir also die über dem Stromkreis herrschende Gesamtspannung (Klemmenspannung U).

Aber auch die Teilspannungen, die über dem Widerstand R und dem Relais *Rel* herrschen, d. h. die Spannungsabfälle über diesen Widerständen, lassen sich ebenfalls messen. In der Ziffer 10 haben wir errechnet, daß der Spannungsabfall über dem Widerstand R 20 V und der über dem Relais *Rel* 40 V beträgt. Der Widerstand R liegt zwischen den Punkten A und C des Stromkreises; die Gesamtspannung von 60 V fällt zwischen diesen beiden Punkten um 20 V ab. Um diesen Spannungsabfall messen zu können, müssen wir unser Instrument zwischen die Punkte A und C legen, d. h. parallel zum Widerstand R. Dasselbe müssen wir tun, wenn wir den Spannungsabfall zwischen den Punkten C und D, also über dem Relais *Rel*, messen wollen. Zum Messen dieser Spannungen wollen wir das gleiche Instrument benutzen, mit dem wir die Stromstärke im Stromkreis Abb. 25 feststellen wollten. Das Meßwerk hat einen inneren Widerstand R_m von 100 Ohm. Wir hatten gesehen, daß ein Instrument mit einem derartig hohen Widerstand als Strommesser nicht verwendet werden kann, weil sich dadurch die Strom- und Spannungsverhältnisse in dem Stromkreis erheblich verändern.

Wir wollen uns überlegen, was unser „Spannungsmesser" mit seinem inneren Widerstand von 100 Ohm anrichten wird.

Der Spannungsabfall über dem Widerstand R, d. h. zwischen den Punkten A und C, beträgt rechnerisch 20 V. Schalten wir jetzt unser Instrument, das

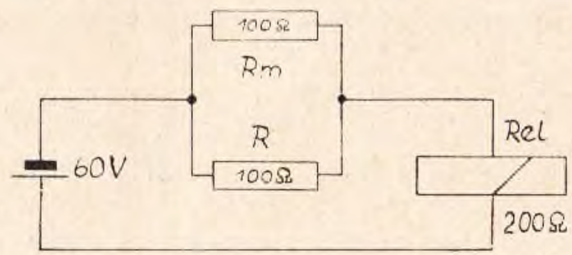


Abb. 27

wir in diesem Falle nicht in A, sondern in V eichen wollen*), parallel zu R, so erhalten wir das Ersatzschaltbild Abb. 27.

Wir erkennen, daß zu dem Widerstand R von 100 Ohm der innere Widerstand R_m des Meßwerkes von ebenfalls 100 Ohm parallel liegt. Der Ersatzwiderstand R_e dieser Anordnung beträgt 50 Ohm (vgl. Band Ia, Ziffer 12). Was ist jetzt die Folge? Es liegen in dem Stromkreis Abb. 26 nicht mehr zwei Widerstände von 100 und 200 Ohm in Reihe, sondern zwei Widerstände von 50 und 200 Ohm (siehe Abb. 28).

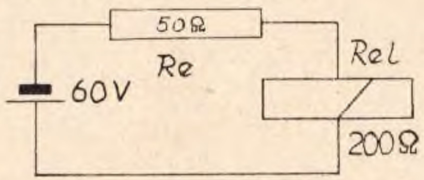


Abb. 28

Infolge des geringer gewordenen Gesamtwiderstandes (250 anstatt 300 Ohm), muß die Stromstärke wachsen; sie beträgt jetzt $I = \frac{U}{R} = \frac{60}{250} = 0{,}24$ A gegenüber 0,2 A der ursprünglichen Anordnung. Der Spannungsabfall über dem Ersatzwiderstand R_e beträgt jetzt nicht 20 V, sondern $U = I \times R = 0{,}24 \times 50 = 12$ V.

Wir schalten jetzt das Instrument zwischen die Punkte C und D der Abb. 26, d. h. parallel zu dem Relais 200 Ohm. Das Ersatzschaltbild zeigt Abb. 29.

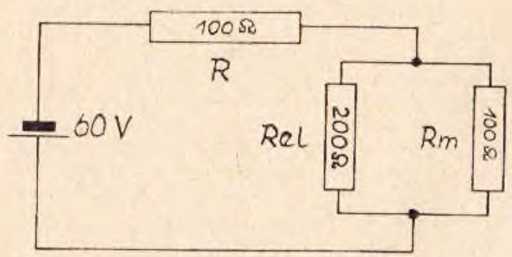


Abb. 29

Der innere Widerstand R_m des Instrumentes liegt parallel zu dem Widerstand des Relais. Der Ersatzwiderstand R_e dieser Anordnung beträgt

$$R_e = \frac{200 \times 100}{200 + 100} = \frac{20\,000}{300} = 66{,}67 \text{ Ohm.}$$

In dem Stromkreis liegen nicht mehr zwei Widerstände von $100 + 200 = 300$ Ohm, sondern zwei Widerstände von $100 + 66{,}67 = 166{,}67$ Ohm in Reihe (Abb. 30).

Der Gesamtwiderstand des Stromkreises ist fast auf die Hälfte des ursprünglichen gesunken.

*) Anm.: Über Eichung von Strom- und Spannungsmessern wäre später nachzulesen.

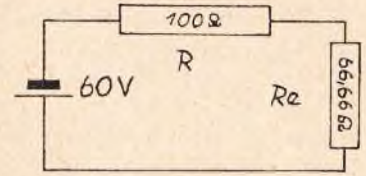


Abb. 30

Wie stark ist jetzt der in dem Stromkreis Abb. 30 fließende Strom und wie groß ist der Spannungsabfall über R_e?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{60}{166{,}67} = 0{,}36 \text{ A}$$

Der Spannungsabfall über R_e beträgt $U = I \times R = 0{,}36 \times 66{,}67\ldots = 24{,}0$ V gegenüber dem Sollwert von 40 V. Da gemäß Band Ia, Ziffer 18, in einer Stromverzweigung die Zweigströme sich umgekehrt zu den Widerständen verhalten, fließt durch den inneren Widerstand R_m des Instrumentes ein doppelt so starker Strom wie durch das Relais, nämlich 0,24 A gegenüber rund 0,117 A. Das Relais wird also nicht ansprechen, weil die für seinen Betrieb notwendige Stromstärke nicht vorhanden ist.

Ein solcher „Spannungsmesser" verändert die ursprünglichen Strom- und Spannungsverhältnisse im Stromkreis noch mehr als ein hochohmiger Strommesser.

Aus diesen Überlegungen erkennen wir, daß ein Meßwerk, das wir zum Messen von Spannungen benutzen wollen, einen sehr hohen inneren Widerstand R_m haben muß, damit der über das Instrument fließende Teilstrom die Strom- und Spannungsverhältnisse in dem Stromkreis nicht verändert.

Ein idealer Spannungsmesser müßte einen unendlich hohen Widerstand haben, so daß kein Zweigstrom über ihn fließen kann. Solche (nahezu) idealen Spannungsmesser stellen die „elektrostatischen Instrumente" dar, die aber für den praktischen Gebrauch ungeeignet sind. Bei Weicheiseninstrumenten wird dieser hohe Widerstand durch viele Windungen dünnen Spulendrahtes erreicht, bei Drehspulinstrumenten, deren Spulenwiderstand ja nicht verändert werden kann, durch Vorschalten eines hochohmigen Widerstandes zur Drehspule.

Wie bei einem Strommesser ein höchstzulässiger innerer Widerstand bestimmt ist, der sich nach Ziffer 10 zu $R_m = \frac{1}{166{,}67}$ errechnet, so gibt es auch eine Bestimmung, die den niedrigsten Widerstandswert bei einem mittelmäßigen Betriebsmeßinstrument als Spannungsmesser festlegt. Dieser Wert beträgt 100 Ohm je 1 V Spannung, die an das Instrument gelegt wird. Anders ausgedrückt: Um eine Spannung von 1 V einigermaßen genau messen zu können, muß der innere Widerstand R_m des Instrumentes mindestens 100 Ohm betragen.

Ein Spannungsmesser, dessen Meßbereich bis 30 V reicht, muß demnach einen inneren Widerstand R_m von mindestens $30 \times 100 = 3000$ Ohm, ein Spannungsmesser mit einem Meßbereich von 0 — 200 V einen inneren Widerstand R_m von mindestens $100 \times 200 = 20\,000$ Ohm haben.

Je höher der Widerstand R_m eines Spannungsmessers ist, um so geringer wird der Teilstrom sein, der über das Instrument fließt. Die Meßgenauigkeit des Meßwerkes wächst.

An einigen Beispielen soll diese Behauptung bewiesen werden.

Wir nehmen an, daß durch einen Widerstand R von 1000 Ohm ein Strom I von 0,05 A fließt. Der zu messende Spannungsabfall U über dem Widerstand beträgt nach dem Ohmschen Gesetz

$$U = I \times R = 0{,}05 \times 1000 = 50 \text{ V}.$$

Mit Hilfe unserer Faustformel, nach der der innere Widerstand R_m eines Meßwerkes mindestens 100 Ohm je 1 V Spannung betragen muß, errechnen wir zunächst R_m: Er beträgt:

$$R_m = 100 \times 50 = 5000 \text{ Ohm}.$$

Parallel zu den 1000 Ohm des Widerstandes schalten wir unser Meßwerk, das uns eigentlich genau 50 V anzeigen müßte. Da aber über das Meßinstrument ein Strom im Verhältnis 1 : 5, d. h. $^1/_6$ des Gesamtstromes fließt, wird die Anzeige aus den vorher aufgeführten Gründen nicht sehr genau sein.

Wir wählen ein Instrument, dessen innerer Widerstand bei 1 V anzulegender Spannung 500 Ohm beträgt. R_m hat jetzt die Größe 500 Ohm × 50 V = 25 000 Ohm.

Jetzt stehen die Teilströme im Verhältnis 25 : 1, d. h. daß über R_m nur $\frac{1}{26}$ des Gesamtstromes fließt. Die Meßgenauigkeit und damit die Empfindlichkeit dieses Instrumentes ist um das 5fache gegenüber der des ersten Instrumentes gestiegen.

Bei R_m = 1000 Ohm je 1 V Spannung wird die Meßgenauigkeit noch größer, nämlich um das 10fache des Instrumentes mit R_m = 100 Ohm je 1 V Spannung. R_m ist hier 1000 Ohm × 50 V = 50 000 Ohm. Die Teilströme stehen jetzt im Verhältnis 50 : 1. Aus diesen 3 Beispielen erkennen wir, daß ein guter Spannungsmesser einen hohen inneren Widerstand R_m haben muß. Der Idealfall wäre $R_m = \infty$, was praktisch dadurch erreicht wird, daß wir Spannungsmesser verwenden, die nicht auf der Wirkung des elektrischen Stromes beruhen, nämlich sog. „elektrostatische Meßinstrumente" *).

Wir merken uns:

> Die in der Praxis gebräuchlichen Spannungsmesser sind in Wirklichkeit Strommesser, die einen hohen inneren (Meßwerks-) Widerstand R_m haben, und die in Volt geeicht sind.

Zusammenfassung der Ziffern 10 und 11:

Die in der Praxis gebräuchlichsten Strom- und Spannungsmesser sprechen auf die magnetische Wirkung des elektrischen Stromes an.

Zum Messen der Stromstärke wird das in Ampere geeichte Meßinstrument in die Leitung geschaltet. Das Instrument muß einen sehr kleinen Eigenwiderstand haben.

Zum Messen von Spannungen (Spannungsabfälle) wird das in Volt geeichte Instrument parallel zu den Punkten gelegt, zwischen denen eine zu messende Spannung herrscht. Das Instrument muß einen sehr hohen Eigenwiderstand haben.

*) Anm.: Auch „Röhrenvoltmeter" eignen sich besonders für genaue Spannungsmessungen.

(12) Die Empfindlichkeit eines Meßwerkes

Am Schluß der vorigen Ziffer hatten wir besprochen, daß die Meßgenauigkeit eines Spannungsmessers durch das Verhältnis des inneren Widerstandes R_m zu der an ihn angelegten Spannung von 1 V bestimmt wird. Aus diesem Verhältnis „Ohm pro Volt" $\left(\frac{\Omega}{\text{V}}\right)$ läßt sich die Empfindlichkeit eines Meßwerkes leicht feststellen. Bei einem Verhältnis von 500 Ω pro Volt $\left(\frac{500\,\Omega}{\text{V}}\right)$ erhalten wir Vollausschlag des Zeigers bei einer Stromstärke $I = \frac{1}{500} = 0{,}002$ A = 2 mA. Bei einem Verhältnis von $\frac{1000\,\Omega}{\text{V}}$ schlägt der Zeiger bereits bei einem Strom $I = \frac{1}{1000} = 0{,}001$ A = 1 mA voll aus.

Aus diesen beiden Beispielen erkennen wir, daß das Verhältnis $\frac{\Omega}{\text{V}}$ die Empfindlichkeit eines Meßwerkes angibt, d. h. bei welcher Stromstärke der Zeiger des Meßwerkes zum Vollausschlag gebracht wird. Nehmen wir den Kehrwert des Verhältnisses $\frac{\Omega}{\text{V}}$, d. h. $\frac{\text{V}}{\Omega}$, so erhalten wir A und damit den Strom, der notwendig ist, um den Zeiger voll ausschlagen zu lassen. Wir wollen im folgenden lediglich die Drehspulmeßwerke betrachten, weil diese in der Praxis am häufigsten gebraucht werden. Bei der Besprechung des Drehspulmeßwerkes hatten wir festgestellt, daß das Meßwerk um so empfindlicher ist, je kleiner der Strom ist, der die Drehspule einen Winkel von 90° beschreiben läßt. Als Beispiel für besonders empfindliche Instrumente hatten wir das Spiegelgalvanometer angeführt. Je stärker die Kraftflußdichte $\mathfrak{B}$ zwischen den Polen des Dauermagneten ist und je mehr Windungen die Drehspule hat, um so größer wird die Stromempfindlichkeit.

Wir nehmen ein Instrument an, das bei einem Strom I von 1 mA eine Drehung der Spule um 90° und damit den Ausschlag des Zeigers ebenfalls um 90° verursacht. Fließt ein Strom von 0,5 mA = 0,0005 A durch die Spule, so wird die Drehspule und damit der Zeiger nur eine Drehung von 90° × 0,5 = 45° vollführen. Der Zeigerausschlag bei Drehspulinstrumenten ist proportional der Stärke der Stromes, der durch die Drehspule fließt.

Durch diese Feststellung sind wir in der Lage, ein Drehspulmeßwerk in A, V oder Ω zu eichen.

(13) Die Erweiterung des Meßbereiches eines Spannungsmessers

Mit Hilfe des Verhältnisses $\frac{\Omega}{\text{V}}$ läßt sich sehr leicht erläutern, wie der Meßbereich eines Spannungsmessers erweitert werden kann. Wir wissen, daß ein Spannungsmesser ein Strommesser ist, der einen hohen inneren Widerstand R_m besitzt und in Volt geeicht ist.

Nun können wir bei Drehspulinstrumenten den inneren Widerstand nicht so ohne weiteres vergrößern, wie das bei Weicheiseninstrumenten möglich ist. Wir können ja nicht die Drehspule herausnehmen und sie mit entsprechenden Windungen dünnen Drahtes versehen, um damit den erforderlichen Widerstandswert zu erreichen. Wir müssen daher mit einem festen Widerstandswert R_{sp} der Drehspule, z. B. 50 Ω, arbeiten. Hat das Meßwerk eine Empfindlichkeit von $\frac{500\,\Omega}{\mathrm{V}}$, so bewirkt ein Strom von $\frac{1}{500}$ A = 0,002 A = 2mA eine Drehung der Spule um 90°. Der Zeiger schlägt hierbei von seiner Nullage bis zum Endausschlag aus und bestreicht damit einen entsprechenden Kreissektor.

Wie hoch darf in diesem Falle die Spannung sein, die unmittelbar an die Spulenenden gelegt wird?

Nach dem Ohmschen Gesetz ist diese Frage leicht zu beantworten. Der Widerstand R_{sp} der Spule beträgt 50 Ω; der durch die Spule fließende Strom I_{sp} darf den Wert von 2 mA nicht überschreiten, daher:

$$U = I \times R = I_{sp} \times R_{sp}$$
$$= 0{,}002 \times 50 = 0{,}1\ \mathrm{V}.$$

Da wir jedoch in der Praxis nicht Spannungen zwischen 0 und 0,1 V messen, sondern weit über diesen Wert hinausgehen, müssen wir durch Vorschalten eines entsprechend hohen Widerstandes dafür sorgen, daß die gesamte zu messende Spannung bis auf 0,1 V über diesem Widerstand abfällt, so daß über der Spule nur die höchstzulässige Spannung von 0,1 V herrscht. Wird die an der Spule herrschende Spannung in unserem Beispiel nur um weitere 0,1 V erhöht, so wird durch die Spule bereits ein Strom doppelter Stärke, d. h. 4 mA fließen und unter Umständen das Meßwerk beschädigen.

Wir betrachten die Abbildung 31.

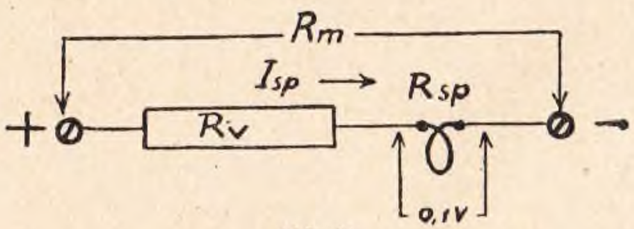


Abb. 31

Erläuterungen zu Abb. 31:

R_m = Gesamtwiderstand des Meßwerkes
R_v = Vorwiderstand
R_{sp} = Widerstand der Drehspule
I_{sp} = Strom, der über die Drehspule fließt (hier auch über R_v)
U_{sp} = Spannungsabfall über Drehspule ($I_{sp} \times R_{sp}$)

In Abb. 31 erkennen wir die beiden Instrumentklemmen (+ und —), die Spule mit ihrem Widerstand R_{sp} und den in Reihe mit der Spule zu schaltenden Widerstand R_v. Wir wissen, daß bei einer Empfindlichkeit von $\frac{500\,\Omega}{\mathrm{V}}$ durch die Spule nur ein Strom I_{sp} von 2 mA im Höchstfalle fließen darf, der über dem Widerstand R_{sp} der Spule einen Spannungsabfall von 0,1 V zur Folge hat. Wollen wir eine Spannung von (z. B.) 30 V messen, so müssen wir einen Widerstand R_v in Reihe mit der Spule schalten, dessen Größe so zu bemessen ist, daß über ihm eine Spannung von 30 — 0,1 V = 29,9 V abfällt. Soll der Meßbereich auf 300 V erweitert werden, so muß dieser Widerstand eine solche Größe haben, daß über ihm eine Spannung von 300 — 0,1 V = 299,9 V abfällt. Wie errechnen wir die Größe dieses Vorwiderstandes?

Wir nehmen an, daß wir mit unserem Meßwerk eine Spannung von 30 V messen wollen. Die Empfindlichkeit des Instrumentes beträgt $\frac{500\,\Omega}{\mathrm{V}}$, d. h. daß der gesamte innere Widerstand R_m des Meßwerkes ($R_v + R_{sp}$) bei 1 V Spannung 500 Ω betragen muß; bei 30 V also 30 × 500 = 15 000 Ω. Ist R_{sp} = 50 Ω, so muß R_v die Größe 15 000 — 50 = 14 950 Ω haben. Ist uns lediglich der höchstzulässige Strom bekannt, der durch die Spule fließen darf, um den Höchstausschlag des Zeigers zu erzielen, in unserem Beispiel also 2 mA, so errechnen wir die Größe des Vorwiderstandes R_v mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes.

Es ist $R = \frac{U}{I} = R_m = \frac{U}{I_{sp}}$,

wobei für U der höchste Meßbereichswert, in diesem Falle 30 V, einzusetzen ist.

R_m ist demnach $= \frac{30}{0{,}002} = \frac{30\,000}{2} = 15\,000\ \Omega$.

Dieser Wert stellt den Gesamtwiderstand R_m des Meßwerkes dar. Um R_v zu ermitteln, müssen wir — wie oben — von dem Gesamtwiderstand R_m den Spulenwiderstand R_{sp} abziehen.

$$R_v = R_m - R_{sp} = 15\,000 - 50 = 14\,950\ \Omega.$$

Wir erhalten somit das gleiche Ergebnis wie oben.

Auch mit Hilfe der Spannungsabfälle läßt sich die Größe des Vorwiderstandes ermitteln. Wir hatten errechnet, daß in unserem Beispiel bei einer angelegten Spannung von 30 V der Spannungsabfall über dem Vorwiderstand R_v 29,9 V beträgt. Wie groß ist R_v?

Da der Gesamtstrom, der durch das Meßwerk fließt, im Höchstfalle 2 mA betragen darf, so errechnet sich R_v nach dem Ohmschen Gesetz zu:

$$R_v = \frac{U}{I_{sp}} = \frac{29{,}9}{0{,}002} = \frac{29\,900}{2} = 14\,950\ \Omega.$$

B e i s p i e l e :

1. Ein bei der DBP häufig verwendetes Betriebs-Meßinstrument, das „Multavi" von Hartmann & Braun, hat eine Empfindlichkeit von $\frac{333\,\Omega}{\mathrm{V}}$ bei einem Widerstand der Drehspule von 50 Ω.
   a) Wie groß muß der Vorwiderstand R_v bei einem Meßbereich von 0 bis 60 V sein?
   b) Wie stark darf der höchstzulässige Strom sein, der die Drehspule durchfließt?

   Zu a)

   Bei 1 V angelegter Spannung beträgt der Meßwerkswiderstand R_m = 333 Ω, bei 60 V demnach

   $R_m = 333 \times 60 = 19\,980\ \Omega$

   R_v ist dann $R_m - R_{sp} = 19\,980 - 50 = \mathbf{19\,930\ \Omega}$.

   Zu b)

   Der höchstzulässige Strom I_{sp} beträgt grundsätzlich $\frac{1}{333}$ = 0,003 A = **3 mA.**

   Bei dieser Stromstärke haben wir Endausschlag.

2. Ein weiteres bei der DBP verwendetes Betriebs-Meßinstrument ist das UVA (Universal-Volt-Amperemeter) der Firma Gossen. Bei diesem Instru-

ment erhalten wir bereits bei einem Spulenstrom I_{sp} = 1,2 mA Endausschlag.

a) Wie groß ist R_v bei einem Meßbereich von 0 bis 300 V?

b) Wie hoch ist die an die Drehspule im Höchstfalle anzulegende Spannung, wenn der Widerstand R_{sp} der Spule 50 Ω beträgt?

Zu a)

$$R_m = \frac{U}{I_{sp}} = \frac{300}{0{,}0012} = 250\,000\ \Omega$$

$$R_v = R_m - R_{sp} = 250\,000 - 50 = \mathbf{249\,950\ \Omega}.$$

Zu b)

$$I_{sp} = 1{,}2 \text{ mA}$$

$$U_{sp} = I_{sp} \times R_{sp} = 0{,}0012 \times 50 = 0{,}06 \text{ V}.$$

Zur Berechnung des Vorwiderstandes bei einem Spannungsmesser gibt es auch eine Formel, die der Vollständigkeit halber gebracht wird. Sie lautet:

$$R_v = R_m\ (n - 1),$$

wobei R_m den Meßwerkswiderstand (nicht den Spulenwiderstand R_{sp}!) bei 1 Volt angelegter Spannung und n den Meßbereich des Instrumentes darstellen. Die Benutzung dieser Formel ist z. T. umständlich und unzweckmäßig. Außerdem wird der Spulenwiderstand R_{sp} nicht berücksichtigt, der allerdings bei hohen Vorwiderständen praktisch nicht ins Gewicht fällt und daher in vielen Fällen fortgelassen werden kann.

Ein Rechenbeispiel zu obiger Formel sei angeführt.

Ein Drehspulmeßwerk hat Vollausschlag bei 2 mA und soll als Spannungsmesser für einen Bereich von 0 bis 100 V verwendet werden. Wie groß ist der vorzuschaltende Widerstand R_v?

L ö s u n g : Bei einem Strom I_{sp} von 2 mA beträgt der Widerstand R_m bei 1 V anzulegender Spannung $R_m = \frac{1}{0{,}002} = 500\ \Omega$.

$$\begin{aligned} R_v &= R_m \times (n - 1) \\ &= 500 \times (100 - 1) \\ &= 500 \times 99 \\ &= \mathbf{49\,500\ \Omega} \end{aligned}$$

Nach dem Ohmschen Gesetz ergibt sich:

$$R_m = \frac{U}{I_{sp}} = \frac{100}{0{,}002} = 50\,000\ \Omega.$$

Um R_v zu erhalten, wäre der Spulenwiderstand in Abzug zu bringen. Wir sehen, daß wir die Formel $R_v = R_m \times (n - 1)$ nur dann mit hinreichender Genauigkeit anwenden können, wenn wir einen Spannungsmesser haben, der von vornherein auf einen bestimmten Wert, z. B. 0 — 10 V, geeicht ist. In diesem Falle wäre für R_m 10 × 500 = 5000 Ω und für n 10 einzusetzen, d. h. den Wert, um den der Meßbereich erweitert werden soll (10 V × 10 = 100 V). Es wäre dann zu den 5000 Ω des Instrumentes noch ein weiterer Vorwiderstand zu schalten, der den Wert

$$\begin{aligned} R_v &= R_m \times (n - 1) \\ &= 5000 \times (10 - 1) \\ &= 5000 \times 9 \\ &= 45\,000\ \Omega \end{aligned}$$

hat.

Wir erkennen, daß die Anwendung des Ohmschen Gesetzes schneller zum Ziele führt und — wie wir später sehen werden — auch das Verständnis für die Eichung von Strom-, Spannungs- und Widerstandsmessern erleichtert.

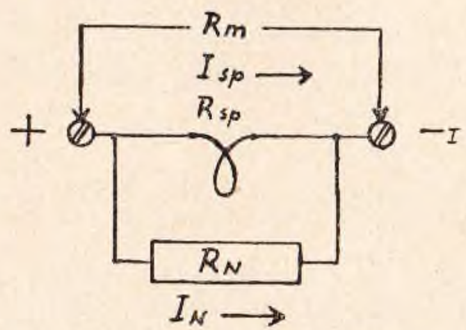
(14) Die Erweiterung des Meßbereiches eines Strommessers

Aus den bisherigen Ausführungen haben wir gesehen, daß ein Strommesser einen außerordentlich geringen Meßwerkswiderstand R_m haben muß, weil über ihm praktisch kein Spannungsabfall entstehen darf. In Ziffer 10 wurde bereits angedeutet, wie dieser niedrige Meßwerkswiderstand erreicht wird: bei Weicheiseninstrumenten durch wenige Windungen dicken Drahtes, bei Drehspulmeßinstrumenten durch Parallelschalten eines niederohmigen Widerstandes zur Drehspule.

Da uns Weicheiseninstrumente nur wenig interessieren, wollen wir lediglich Drehspulmeßinstrumente, die als Strommesser dienen sollen, besprechen.

Für unsere Betrachtungen wollen wir das gleiche Instrument verwenden, das wir als Spannungsmesser benutzt haben, nämlich ein Instrument mit einer Empfindlichkeit von $\frac{500\ \Omega}{\text{V}}$.

Wir haben gesehen, daß bei einer Stromstärke von $\frac{1}{500}$ = 2 mA der Zeiger seinen Höchstausschlag erreicht. Das bedeutet für uns, daß wir durch das Meßwerk nur einen Strom hindurchschicken dürfen, der im Höchstfalle die Stärke von 2 mA hat. Diese Stromstärke ist natürlich für das Messen höherer Stromwerte als 2 mA viel zu gering; andererseits dürfen wir das Instrument nicht höher belasten, weil infolge der Wärmeentwicklung bei stärkeren Strömen als 2 mA die Drehspule durchbrennt und daneben noch weitere Beschädigungen des Meßwerkes auftreten. Wir müssen also dafür sorgen, daß bei einem höheren Strommeßbereich durch die Spule nicht mehr als 2 mA fließen, und daß der restliche Strom „abgeleitet" wird. Diese „Ableitung" des Reststromes geschieht dadurch, daß wir parallel zur Drehspule einen entsprechend zu bemessenden Widerstand schalten, den wir mit Nebenwiderstand R_N (auch Shunt genannt) bezeichnen wollen. Die grundsätzliche Schaltungsanordnung zeigt Abb. 32.



R_m = Gesamtwiderstand des Meßwerkes

I_{sp} = Strom, der über die Drehspule fließt

R_{sp} = Widerstand der Drehspule

R_N = Nebenwiderstand

I_N = Strom, der über den Nebenwiderstand fließt ($I_{ges} - I_{sp}$)

Abb. 32

Dieser Nebenwiderstand muß in seinem Wert sehr klein sein und in einem bestimmten Verhältnis zu der Stromstärke stehen, die zu messen ist.

Wir wollen annehmen, daß unser Drehspulmeßwerk einen Strom bis zu 3 A anzeigen soll. Da durch die Drehspule im Höchstfalle nur 2 mA fließen dürfen, muß der Nebenwiderstand R_N so bemessen sein, daß er ohne besondere Erwärmung den Reststrom, in diesem Falle 3,000 — 0,002 = 2,998 A „hindurchläßt".

Soll der Meßbereich des gleichen Instrumentes 0 bis 0,1 A betragen, so muß der Nebenwiderstand R_N so gewählt werden, daß über ihn genau 0,1 — 0,002 = 0,098 A fließen.

Wir sehen, daß wir bei einem Strommesser umgekehrt zu verfahren haben wie bei einem Spannungsmesser. Bei einem Spannungsmesser kann der Meßwerkswiderstand R_m nicht hoch, bei einem Strommesser nicht klein genug sein. In beiden Fällen sind uns jedoch gewisse Grenzen gesetzt.

Wie ermitteln wir die Größe eines solchen Nebenwiderstandes?

Bei der Betrachtung der Abb. 32 kommt man schnell auf die Lösung. R_N muß so bemessen sein — wie oben gesagt —, daß er die Differenz zwischen dem Gesamtstrom I_{ges} und dem Spulenstrom I_{sp} „hindurchläßt". Wir nehmen unser erstes Beispiel, d. h. Endausschlag bei 2 mA, Meßbereich des Strommessers bis 3 A. Der Spulenwiderstand R_{sp} beträgt wie bisher 50 Ω. Es ist also die Größe des Widerstandes R_N bei einem gegebenen Gesamtstrom und zwei gegebenen Teilströmen zu bestimmen. Diese Aufgabe dürfte uns bekannt vorkommen, denn wir finden sie in ähnlicher Form im Band Ia unter der Behandlung der Kirchhoffschen Gesetze. Nach dem zweiten Kirchhoffschen Gesetz verhalten sich die Widerstände umgekehrt wie die Teilströme; formelmäßig ausgedrückt:

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1.$$

Wir wollen grundsätzlich als I_1 den Spulenstrom I_{sp} annehmen und als I_2 den Strom, der über den Nebenwiderstand R_N fließt, und den wir I_N nennen wollen. Analog hierzu sind R_1 der Widerstand der Drehspule R_{sp} und R_2 der Nebenwiderstand R_N. Die obige Formel würde also für die Berechnung des Nebenwiderstandes wie folgt aussehen:

$$I_{sp} : I_N = R_N : R_{sp}.$$

Wie wir den Wert von I_N ermitteln, ist bereits gesagt worden. I_N ist die Differenz zwischen dem Gesamtstrom I_{ges} (der stärkste Strom des jeweiligen Meßbereiches) weniger dem Spulenstrom I_{sp}, in unserem Beispiel also 3,000 — 0,002 = 2,998 A. Diese Werte setzen wir in unsere Formel ein:

$$I_{sp} : I_N = R_N : R_{sp}$$

$$0{,}002 : 2{,}998 = x : 50.$$

Wir haben es hierbei mit einer Verhältnisgleichung oder Proportion zu tun. Diese Verhältnisgleichung müssen wir nach x auflösen, ein Fall, den wir bisher noch nicht behandelt haben.

Um zu wissen, ob eine Verhältnisgleichung, z. B. 3 : 4 = 12 : 16 richtig ist, müssen wir die sogenannten „Außenglieder" (in unserem Beispiel 3 und 16) miteinander multiplizieren. Wenn dieses Produkt (3 × 16 = 48) mit dem Produkt der sogenannten „Innenglieder" (in diesem Beispiel 4 × 12 = 48) übereinstimmt, dann ist die Verhältnisgleichung richtig.

Wir wollen eine Verhältnisgleichung in allgemeine Buchstaben kleiden; sie könnte wie folgt aussehen:

Außenglieder

$$a : b = c : d$$

Innenglieder

(ausgesprochen a zu b wie c zu d).

Eine andere Schreibweise, die uns vielleicht ebenso bekannt ist, hat folgende Form:

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d}.$$

Beide Schreibweisen sind richtig, jedoch ist die erste zu empfehlen.

Die Produktengleichung lautet:

$$a \times d = b \times c.$$

In den meisten Fällen wird es vorkommen, daß eines der Glieder einer Proportion unbekannt ist und wir dessen Wert ermitteln müssen, z. B. unseren Nebenwiderstand R_N. Mit Hilfe einer Produktengleichung, die wir aus einer Proportion bilden, ist der Wert der Unbekannten x sehr schnell festzustellen.

In der Proportion a : b = c : d möge c den unbekannten Wert x darstellen. Die Verhältnisgleichung würde jetzt lauten:

$$a : b = x : d.$$

Um x bestimmen zu können und zu isolieren, bilden wir vorerst die Produktengleichung a × d = b × x. Es ist dann

$$x = \frac{a \times d}{b}.$$

Ist a die Unbekannte x, so lautet die Proportion

$$x : b = c : d$$

und die Produktengleichung:

$$x \times d = b \times c.$$

x ist dann:

$$x = \frac{b \times c}{d}.$$

Diese beiden Beispiele wollen wir näher erläutern:

Befindet sich x auf der r e c h t e n Seite der Produktengleichung, so bleibt die l i n k e Seite unverändert und wird durch die zusätzlichen Faktoren von x geteilt.

Befindet sich x auf der l i n k e n Seite der Produktengleichung, so bleibt die r e c h t e Seite unverändert; sie wird geteilt durch die Faktoren von x.

B e i s p i e l :

Proportion: a : b = c : x

Produktengleichung: a × x = b × c

$$x = \frac{b \times c}{a}.$$

Bei der Berechnung der Nebenwiderstände bei einem Strommesser hatten wir nach dem 2. Kirchhoffschen Gesetz für diese Berechnung folgende Formel aufgestellt:

$$I_{sp} : I_N = R_N : R_{sp}$$

und wollten den Wert von R_N bei einem Meßbereich von 0—3 A ermitteln. I_{sp} betrug 0,002 A, I_N 3,000—0,002 = 2,998 A. R_{sp} hatte den Wert von 50 Ω. Diese Werte, in obige Gleichung eingesetzt, ergeben

$$0{,}002 : 2{,}998 = x : 50.$$

Um x zu ermitteln, bilden wir die Produktengleichung

$$0{,}002 \times 50 = 2{,}998 \times x$$
$$0{,}1 = 2{,}998 \times x$$

und lösen diese nach x auf:

$$x = \frac{0{,}1}{2{,}998} = 0{,}0333$$

Der Nebenwiderstand R_N hat einen Wert von 0,0333 Ohm.

Was bedeutet $I_{sp} \times R_{sp}$?

Lassen wir die Indizes (Kennzeichen, hier $_{sp}$) zu den Formelzeichen fort, so erhalten wir die bildlich reine Form des Ohmschen Gesetzes

$$U = I \times R.$$

$I_{sp} \times R_{sp}$ bedeutet also den Spannungsabfall U_{sp} über dem Widerstand der Drehspule, der gleichzeitig der Spannungsabfall an den Endpunkten A und B der Widerstandsverzweigung Drehspule / Nebenwiderstand gem. Abb. 33 ist (siehe auch Band Ia, Ziffer 18).

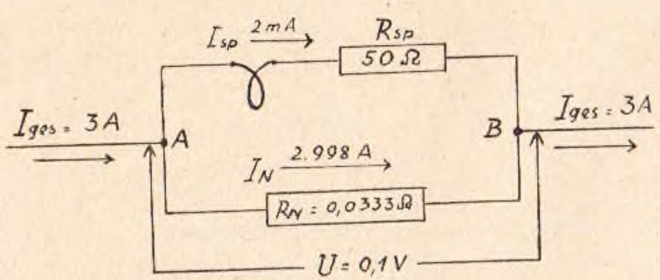


Abb. 33

In Abb. 33 ist der Widerstand R_{sp} der Spule besonders dargestellt und liegt in Reihe mit der nunmehr widerstandslos gedachten Spule. Aus dem Spannungsabfall U_{sp} und der über die Widerstände R_{sp} und R_N fließenden Ströme ergibt sich die Rechnung:

Strom über R_{sp} = 2 mA = 0,002 A

Strom über R_N = $(I_{ges} - I_{sp})$ = 3,000 — 0,002 = 2,998 A

$I_{sp} \times R_{sp}$ = 0,002 × 50 = 0,1 V.

Diese Spannung muß an den Verzweigungspunkten A und B der Abb. 33 herrschen.

R_N errechnet sich daher zu:

$$R = \frac{U}{I} = R_N = \frac{U_{sp}}{I_N} = 0{,}1 : 2{,}998 = 100 : 2998 = \mathbf{0{,}0333}\ \Omega.$$

An diesem Beispiel erkennen wir, daß das 2. Kirchhoffsche Gesetz eng mit dem Ohmschen Gesetz verwachsen ist. Ein ähnliches Beispiel ist im Band Ia, Ziffer 18, S. 39, aufgeführt.

Wir wollen einige Beispiele durchrechnen.

1. Beispiel: Ein Drehspulmeßwerk mit einer Empfindlichkeit von $\frac{333\ \Omega}{V}$ (Multavi) soll als Strommesser in einem Meßbereich zwischen 0 bis 0,3 A arbeiten. Der Spulenwiderstand R_{sp} beträgt 50 Ω. Was ist zu veranlassen?

Lösung: Es ist ein Nebenwiderstand R_N zur Drehspule zu schalten, über den die Differenz zwischen dem stärksten Strom des Meßbereiches, hier 0,3 A, und dem Spulenstrom I_{sp} fließt.

2. Beispiel: Welchen Wert hat der Nebenwiderstand zu Beispiel 1?

Lösung: Da das Instrument eine Empfindlichkeit von $\frac{333\ \Omega}{V}$ hat, ist der höchstzulässige Strom, der durch die Spule fließt $= \frac{1}{333} =$ 0,003 A = 3 mA. Der Spulenwiderstand beträgt 50 Ω.

Wir wenden das 2. Kirchhoffsche Gesetz an:

$$I_{sp} : I_N = R_N : R_{sp}$$
$$0{,}003 : 0{,}297 = x : 50,$$

bilden die Produktengleichung und lösen sie nach x auf:

$$0{,}003 \times 50 = 0{,}297 \times x$$
$$x = \frac{0{,}003 \times 50}{0{,}297}$$
$$= \frac{0{,}15}{0{,}297}$$
$$= 150 : 297$$
$$x = 0{,}505.$$

Der Nebenwiderstand R_N beträgt 0,505 Ω.

3. Beispiel: Die Drehspulmeßinstrumente der Phywe, die für Versuche gebraucht werden, haben eine Empfindlichkeit von $\frac{500\ \Omega}{V}$ und einen Drehspulwiderstand R_{sp} von 50 Ω.

Fragen:

a) Wie hoch ist der Spannungsabfall über der Drehspule?

b) Welchen Wert muß der Nebenwiderstand R_N bei einem Meßbereich von 0—1 A haben?

Lösung zu a) Zunächst müssen wir ermitteln, wie stark der Strom zu sein hat, der im Höchstfalle die Drehspule durchfließen darf. Er beträgt bei einer Empfindlichkeit von $\frac{500\ \Omega}{\mathrm{V}} : \frac{1}{500} = 0{,}002$ A.

Der Spannungsabfall über dem Widerstand R_{sp} der Drehspule ist nach dem Ohmschen Gesetz $U = I \times R = I_{sp} \times R_{sp} = 0{,}002 \times 50 = 0{,}1$ V.

zu b) An den Endpunkten der Widerstandsanordnung R_{sp}/R_N (vgl. Abb. 32 und 33) herrscht die Spannung von 0,1 V. Über R_N fließt im Höchstfalle ein Strom $I_N = I_{ges} - I_{sp} = 1 - 0{,}002 = 0{,}998$ A. R ist nach dem Ohmschen Gesetz $\frac{U}{I}$, in unserem Falle also $R_N = \frac{U_{sp}}{I_N} = \frac{0{,}1}{0{,}998} = 100 : 998 = \mathbf{0{,}1002}\ \Omega$.

Nach den nunmehr gewonnenen Erkenntnissen können wir uns der Eichung von Strom- und Spannungsmessern zuwenden.

(15) Die Eichung von Drehspulmeßwerken als Strom- und Spannungsmesser

Nach allem, was wir bis jetzt über Strom- und Spannungsmesser gelesen haben, ist die Besprechung der Eichung von Drehspulmeßwerken als Strom- und Spannungsmesser eine einfache Angelegenheit. Wir wissen, daß der Endausschlag einer Drehspule in erster Linie durch den Spulenstrom I_{sp} bestimmt wird. Ferner haben wir auch gesehen, daß mit schwächer werdendem Spulenstrom der Ausschlag des Zeigers proportional dem Strom kleiner wird.

Als Beispiel wollen wir wieder ein Meßinstrument wählen, dessen Endausschlag bei 2 mA liegt, und betrachten hierzu die Abb. 34.

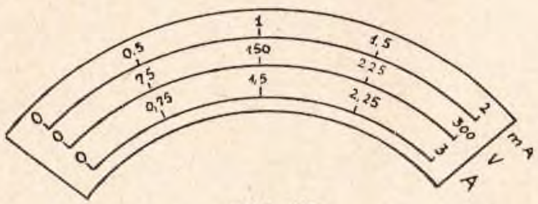


Abb. 34

Wir erkennen hier 3 Skalen, eine obere, die in mA geeicht, eine mittlere, die in V geeicht, und eine untere, die in A geeicht ist. Aus den Ziffern 13 und 14 haben wir gesehen, daß der Meßbereich eines Spannungsmessers durch die Größe seines Vorwiderstandes R_V, und daß der eines Strommessers durch die Größe des Nebenwiderstandes R_N zur Drehspule bestimmt wird. Fließt der volle Strom von 2 mA durch die Drehspule des als Spannungsmesser geschalteten Meßwerkes (Spule mit Vorwiderstand), so entspricht dieser Ausschlag einer bestimmten Spannung. Je größer der Wert

des Vorwiderstandes ist, um so höher wird im allgemeinen die Spannung sein, die wir messen können. Den Gesamtwiderstand R_m des Meßwerkes errechnen wir gemäß Ziffer 13 zu

$$R_m = \frac{U}{I_{sp}},$$

wobei U die oberste Grenze des jeweiligen Meßbereiches darstellt.

Für einen Strommesser gilt das Umgekehrte: je kleiner der Nebenwiderstand R_N ist, um so größer ist der Meßbereich. Hier gilt für die Bestimmung der Größe des Nebenwiderstandes R_N die Formel

$$R_N = \frac{U_{sp}}{I_N},$$

wobei U_{sp} gleich dem Produkt aus $I_{sp} \times R_{sp}$ ist.

Es entsprechen also die 2 mA, die durch die Spule fließen, einer ganz bestimmten Spannung und einer ganz bestimmten Stromstärke.

Nehmen wir an, daß unser Spannungsmesser von 0 bis 300 V anzeigen soll. Der Drehspule wäre in diesem Falle ein Widerstand solcher Größe vorzuschalten, daß bei einer angelegten Spannung von 300 V trotzdem nur ein Strom von 2 mA fließt. R_m ist in diesem Falle: $\frac{U}{I_{sp}} = \frac{300}{0{,}002} = 150\,000\ \Omega$.

Jetzt können wir in Abb. 34 an Stelle von 2 mA **300 V** schreiben.

Soll das gleiche Instrument einen Strom bis 3 A zeigen, so wissen wir, daß wir parallel zur Spule einen Nebenwiderstand zu schalten haben, über den die Differenz zwischen dem Gesamtstrom und dem Spulenstrom fließt.

Da $I_N + I_{sp} = I_{ges}$ ist, schreiben wir auf der untersten Skala an Stelle von 2 mA **3 A.**

Dadurch, daß der Zeigerausschlag proportional dem Strom ist, der die Drehspule durchfließt, können wir jetzt eine lineare Einteilung unserer Skalen vornehmen. Schlägt der Zeiger genau bis zur Mitte aus, dann entspricht dem Spulenstrom von 1 mA = **150 V** oder **1,5 A.** Bei einem Spulenstrom von 1,5 mA schreiben wir **225 V** oder **2,25 A** auf die Skala, bei einem Spulenstrom von 0,5 mA **75 V** oder **0,75 A.**

Ein sehr großer Teil unserer Betriebsmeßinstrumente sind sogenannte „Universal-Meßinstrumente", von denen eine Ausführung in Abb. 22 dargestellt ist*). Diese Instrumente haben im allgemeinen eine 60teilige Skala, wie sie in Abb. 35 noch einmal gezeigt wird. Ein großer Schalter läßt sich auf verschiedene Strom- und Spannungsmeßbereiche stellen, die je nach Fabrikat des Instrumentes unterschiedlich sind. Wir stehen hier vor der Aufgabe, aus den Teilstrichen, auf denen der Zeiger steht, den entsprechenden Strom-

Abb. 35

*) Anm.: Vgl. auch Anhang Bd. XV: „Selbstbau eines Universal-Meßinstrumentes für Strom-, Spannungs- und Widerstandsmessungen."

oder Spannungswert zu ermitteln. An zwei Beispielen wollen wir diesen Fall behandeln.

1. Bei einer Schalterstellung von 0,3 A schlägt der Zeiger auf 43 Teilstriche aus. Welcher Stromstärke entsprechen diese 43 Teilstriche?

Hierzu müssen wir unsere Kenntnisse des einfachen Dreisatzes wieder auffrischen:

60 Teilstriche entsprechen 0,3 A
43 Teilstriche entsprechen ? A

$$\frac{0{,}3 \times 43}{60} = \mathbf{0{,}215\ A}$$

2. Wir stellen unseren Meßbereichsschalter auf 3 V und messen 28 Teilstriche. Welche Spannung ermitteln wir?

60 Teilstriche entsprechen 3 V
28 Teilstriche entsprechen ? V

$$\frac{3 \times 28}{60} = \mathbf{1{,}4\ V}$$

Universal-Meßinstrumente, die für Gleich- und Wechselstrom benutzt werden können, haben zwei übereinanderstehende Skalen, die durch einen Kreisbogen voneinander getrennt sind. Die Wechselstromskala ist **nicht** linear. Wir müssen bei der Benutzung derartiger Instrumente genau darauf achten, daß von der richtigen Skala, die an den Zeichen — oder ~ erkenntlich ist, abgelesen wird. Darüber hinaus ist ein Schalter — oder ~ zu betätigen. Bei Stellung ~ wird ein kleiner Trockengleichrichter in den Spulenstromkreis geschaltet.

III. Widerstandsmesser

(16) Das Drehspulmeßwerk als Widerstandsmesser

A. Widerstandsmesser für hochohmige Widerstände

Ein Drehspulmeßwerk als Widerstandsmesser ist ein in Ohm geeichtes Milliamperemeter. Die grundsätzlichen Schaltungen eines Meßwerkes zum Messen verhältnismäßig hochohmiger Widerstände zeigen die Abb. 36, 37 und 38. Die offenen Klemmen + und — des Instrumentes sind in Reihe mit einem Vorwiderstand R_v, der Drehspule S_p des Meßwerkes und einer Meßbatterie MB geschaltet. Die Spannung der Meßbatterie MB muß eine solche Höhe haben, daß bei angepaßtem Vorwiderstand und Kurzschluß der Klemmen + und —

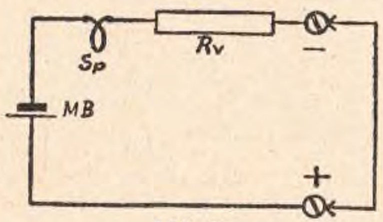


Abb. 36

(wie in Abb. 36 dargestellt) ein gerade so starker Strom fließt, daß die Spule S_p, ohne überlastet zu werden, sich um 90° dreht und damit den Zeiger zum Endausschlag bringt. Durch den Kurzschluß der Klemmen ist die Spannung der Meßbatterie unmittelbar an das Meßwerk gelegt. Die richtige Bemessung des Vorwiderstandes R_v ergibt sich (wie bei einem Spannungsmesser) aus der Formel $R_v = \frac{U}{I_{sp}}$ (s. Ziffer 13), wobei U die Spannung der Meßbatterie MB ist. Betrachten wir die Abb. 36 in der Darstellung der Abb. 37, so wird das Vorhergesagte noch deutlicher.

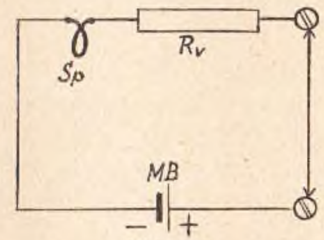


Abb. 37

Am Anfang dieser Ziffer haben wir herausgestellt, daß ein Drehspulmeßwerk als Widerstandsmesser ein in Ohm geeichtes Milliamperemeter ist.

Wozu dient ein Widerstandsmesser? Mit ihm können wir den Wert eines unbekannten Widerstandes ermitteln oder feststellen, ob der Wert eines ursprünglich bekannten Widerstandes mit seinem Sollwert noch übereinstimmt.

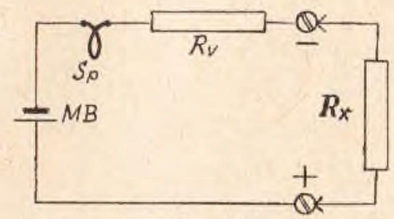


Abb. 38

Den zu messenden Widerstand bezeichnen wir in Zukunft grundsätzlich mit R_x oder einfach x und legen ihn an die Klemmen + und — des Instrumentes (Abb. 38).

Selbstverständlich braucht der zu messende Widerstand nicht ein Festwiderstand in irgendeinem Apparat zu sein. Wir bezeichnen mit R_x z. B. den zu messenden Leitungswiderstand einer Doppelleitung, den Widerstand bei einer Schleife, den Erdungswiderstand usw.

Legen wir gemäß Abb. 38 diesen unbekannten Widerstand R_x an die Klemmen des Instrumentes, so wird der Strom in dem nunmehr geschlossenen Stromkreis Minus MB, Drehspule S_p, Vorwiderstand R_v, Minusklemme des Instrumentes, unbekannter Widerstand R_x, Plusklemme des Instrumentes, Plus MB, um so schwächer sein, je größer der Wert des unbekannten Widerstandes R_x ist; denn nach dem Ohmschen Gesetz ist $I = \frac{U}{R}$. Aus der Stromstärke und der Spannung der Meßbatterie läßt sich der Wert des zu messenden Widerstandes leicht ermitteln. Es ist bekanntlich $R = \frac{U}{I}$.

Wir können jetzt zur Eichung des Meßwerkes schreiten und betrachten vorerst die Fälle $R_x = 0$ und $R_x = \infty$ (unendlich). R_x ist gleich 0 Ohm, wenn die Klemmen des Instrumentes kurzgeschlossen werden, also kein unbekannter Widerstand angeschlossen ist. Es fließt jetzt der gesamte Spulenstrom durch den Stromkreis der Abb. 36. Bei Vollausschlag des Zeigers schreiben wir daher 0 Ω auf die Skala. R_x ist unendlich groß, wenn die Klemmen des Instrumentes offen sind. Es fließt jetzt kein Strom; der Zeiger bleibt in der Nullage. Wir können hier an Stelle von 0 mA das Zeichen für unendlich setzen. Zwischen 0 Ω und ∞ liegen alle meßbaren Widerstandswerte.

Wir wollen für unsere weiteren Betrachtungen vorerst wieder das Meßinstrument nehmen, dessen Zeiger bei 2 mA Endausschlag hat. Nach den obigen Überlegungen können wir bei Kurzschluß der Instrumentenklemmen bei $I_{sp} = 2$ mA an Stelle dieses Wertes 0 Ω setzen. Die Skala Abb. 34 gilt, um eine in Ohm geeichte erweitert, sinngemäß und entspricht der Abb. 39.

Abb. 39

Die Meßwerte $R_x = 0\ \Omega$ und $R_x = \infty$ sind festgelegt. Es entspricht dem Spulenstrom I_{sp} von 2 mA der Wert $R_x = 0\ \Omega$ und dem Spulenstrom von 0 mA der Wert $R_x = \infty$. Hieraus ersehen wir auch das 2. Kirchhoffsche Gesetz, nach dem der Strom sich umgekehrt wie der von ihm durchflossene Widerstand verhält (s. Band I a, Ziffer 18).

Die weitere Eichung der Skala geschieht nach dem Ohmschen Gesetz. Hierzu folgende Versuche:

Wir benutzen unser Phywe-Vorführinstrument, das eine Empfindlichkeit von $\frac{500\ \Omega}{\mathrm{V}}$ hat ($I_{sp} = 2$ mA), und schalten es als Widerstandsmesser gemäß Abb. 40.

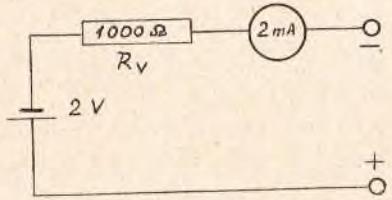


Abb. 40

1. Die Spannung der Meßbatterie betrage 2 V. I_{sp} darf 2 mA nicht überschreiten, folglich muß $R_v = \frac{U}{I} = \frac{2}{0{,}002} = 1000\ \Omega$ betragen. Verbinden wir die Klemmen + und — miteinander, so zeigt das Instrument 2 mA an; R_x ist dann gleich 0 Ω.
2. Wir entfernen die Klemmenverbindung; der Zeiger des Instrumentes geht auf Null zurück; R_x ist jetzt praktisch unendlich groß.
3. Wir schalten zwischen + und — einen Widerstand. Der Zeiger schlägt auf 1,8 mA aus. Der Gesamtwiderstand R_{ges} des Stromkreises errechnet sich zu:
$$R_{ges} = \frac{U_{MB}}{I_{sp}} = \frac{2}{0{,}0018} = \text{rund } 1110\ \Omega.$$
Von diesem Wert ist der Meßwerkswiderstand R_m (1000 Ω) abzuziehen. Es ist:
$$R_x = R_{ges} - R_m = 1110 - 1000 = \mathbf{110}\ \Omega.$$
4. Der angezeigte Strom betrage 1,5 mA. Wie groß ist R_x?
$$R_{ges} = \frac{U_{MB}}{I_{sp}} = \frac{2}{0{,}0015} = \text{rund } 1330\ \Omega$$
$$R_x = 1330 - 1000 = \mathbf{330}\ \Omega.$$
5. Der angezeigte Strom betrage 1 mA. Wie groß ist R_x?
$$R_{ges} = \frac{2}{0{,}001} = 2000\ \Omega$$
$$R_x = 2000 - 1000 = \mathbf{1000}\ \Omega.$$
6. Der angezeigte Strom betrage 0,4 mA. $R_x = ?\ \Omega$
$$R_{ges} = \frac{2}{0{,}0004} = 5000\ \Omega$$
$$R_x = 5000 - 1000 = \mathbf{4000}\ \Omega.$$
7. Der angezeigte Strom betrage 0,1 mA. $R_x = ?\ \Omega$
$$R_{ges} = \frac{2}{0{,}0001} = 20\,000\ \Omega$$
$$R_x = 20\,000 - 1000 = \mathbf{19\,000}\ \Omega.$$

Aus diesen Beispielen ersehen wir, daß zwischen dem **Vollausschlag** des Zeigers und seinem **halben** Ausschlag die Meßgenauigkeit des Instrumentes am größten ist. Wir haben in diesem Bereich Werte zwischen 0 und 1000 Ω gemessen. Von der Mitte der Skala bis ∞ drängen sich die Widerstandswerte um so mehr zusammen, je kleiner der Zeigerausschlag ist. Die Meßgenauigkeit eines Widerstandsmessers gegenüber **hochohmigen** Widerständen ist daher um so größer, je größer der gemessene oder errechnete Widerstandswert bei **halbem** Zeigerausschlag ist.

Was bedeutet für uns der halbe Zeigerausschlag? In Beispiel 5 haben wir das festgestellt: Der Zeiger zeigt auf die Mitte der Skala, wenn der Spulenstrom I_{sp} die Hälfte des Stromes bei Vollausschlag beträgt. In diesem Falle müssen Innen- und Außenwiderstand, also R_m und R_x, gleich sein.

Der Wert von R_m ist eine ausschlaggebende Größe für den Meßbereich eines Widerstandsmessers.

Der Wert von R_m ist zunächst abhängig von der Empfindlichkeit des Meßwerkes (vergl. Ziffer 12). Drei Beispiele sollen dieses beweisen. Wir nehmen eine Meßbatteriespannung U_{MB} von jeweils 4 V an und errechnen den Wert von R_x bei **halbem** Zeigerausschlag ($R_m = R_x$) bei folgenden Empfindlichkeitswerten:

$$1.\ \frac{333\ \Omega}{V};\quad 2.\ \frac{500\ \Omega}{V};\quad 3.\ \frac{1000\ \Omega}{V}.$$

R_m beträgt im ersten Falle $333 \times 4 = 1332\ \Omega$, im zweiten Falle $500 \times 4 = 2000\ \Omega$ und im dritten Falle $1000 \times 4 = 4000\ \Omega$.

Bei dem ersten Instrument ist $R_{ges} = 2 \times 1332 =$ rund $2660\ \Omega$, R_x ist dann $R_{ges} - R_m = 2660 - 1330 = \mathbf{1330}\ \Omega$.

Bei dem zweiten Instrument ist $R_{ges} = 2 \times 2000 = 4000\ \Omega$, $R_x = 4000 - 2000 = \mathbf{2000}\ \Omega$.

Bei dem dritten Instrument ist $R_{ges} = 2 \times 4000 = 8000\ \Omega$, $R_x = 8000 - 4000 = \mathbf{4000}\ \Omega$.

Je größer die Empfindlichkeit eines Meßwerkes ist, um so größer ist der Wert von R_m, um so genauer lassen sich hohe Widerstandswerte messen.

Nicht nur die Empfindlichkeit eines Meßwerkes spielt für den Meßbereich eines Widerstandsmessers eine Rolle, sondern auch die Höhe der Spannung der Meßbatterie MB. Erhöhen wir die Spannung der Meßbatterie, so muß — wie bei einem Spannungsmesser — der Vorwiderstand R_v entsprechend vergrößert werden. Mit wachsendem Instrumentenwiderstand R_m vergrößert sich nach den vorhergegangenen Überlegungen die Meßgenauigkeit gegenüber hochohmigen Widerständen. Beträgt z. B. der Wert von R_m das Zehnfache (halber Spulenstrom I_{sp}!) der Wert des ursprünglichen, so ist bei $R_m = R_x$ (halber Spulenstrom I_{sp}!) der Wert von R_x ebenfalls um das Zehnfache größer. Zwischen 0 Ω und Zeigerausschlag „Mitte“ lassen sich wesentlich größere Widerstandswerte messen als bei kleinem Wert von R_m.

Auch hierzu einige Rechenbeispiele mit Hilfe unseres Phywe-Vorführungsinstrumentes gem. Abb. 40.

1. Wir erhöhen die Spannung der Meßbatterie auf 10 V. R_v beträgt jetzt $\frac{10}{0{,}002} = 5000\ \Omega$, die wir dem Instrument Abb. 40 vorschalten müssen. Haben wir keinen Widerstand von 5000 Ω zur Hand, so braucht uns das keine Sorgen zu bereiten; denn dieser Widerstand ist ja in dem Spannungsmeßbereich 0—10 V, den wir in die dafür vorgesehenen Buchsen stecken, enthalten. Da 10 V einem Spulenstrom von 2 mA entsprechen, berührt uns die in Volt geeichte Skala gar nicht. Für uns bedeuten die Teilstriche entweder Milliampere oder Ohm. Hieraus erkennen wir, daß wir jeden Spannungsmesser als Widerstandsmesser verwenden können, wenn die Spannung der anzulegenden Meßbatterie dem Spannungsmeßbereich entspricht. Zwischen 10 und 5 V (entsprechend 2 mA und 1 mA) der Skala messen wir Widerstände zwischen 0 und 5000 Ohm, zwischen 5 und 0 V Widerstände zwischen 5000 Ohm und ∞.

2. Wir erhöhen die Spannung der Meßbatterie auf 50 V und benutzen den Spannungsmeßbereich 50 V. R_v beträgt jetzt $\frac{50}{0{,}002} = 25\,000\ \Omega$. Wir sind nun in der Lage, von 50 V bis Zeigerstellung „Mitte“ (entsprechend 25 V oder 1 mA) Widerstände zwischen 0 und 25 000 Ω (25 kΩ) mit hinreichender Genauigkeit zu messen. Ab 25 kΩ wird die Messung selbstverständlich um so ungenauer, je mehr wir uns der Nullage (entsprechend $R_x = \infty$) nähern.

Zusammenfassung

Ein Drehspulmeßwerk als Widerstandsmesser ist ein in Ohm geeichtes Milliamperemeter. Die Schaltung ist die eines Spannungsmessers, der mit einer Batterie, der Meßbatterie, in Reihe geschaltet ist. Hierzu s. Abb. 36—38.

Der innere Widerstand R_m des Meßwerkes muß der Spannung der Meßbatterie angepaßt sein.

Die Eichung geschieht nach dem Ohmschen Gesetz $\left(R = \frac{U}{I}\right)$, wobei R der Gesamtwiderstand R_{ges} im Stromkreis, U die Spannung der Meßbatterie MB und I der Spulenstrom I_{sp} ist. Der zu messende Widerstand R_x errechnet sich aus dem Gesamtwiderstand R_{ges} weniger dem Meßwerkswiderstand R_m:

$$R_x = R_{ges} - R_m.$$

Je höher der Widerstandswert des Meßwerkes und die Spannung der Meßbatterie sind, um so größer ist die Meßgenauigkeit gegenüber hochohmigen Widerständen.

Verwenden wir Universal-Meßinstrumente, die weder in V, A oder Ω geeicht sind, sondern lediglich eine 60teilige Skala aufweisen (s. Abb. 35), so ist die Bestimmung des Wertes eines unbekannten Widerstandes durch einen einfachen Dreisatz möglich.

Beispiele:

1. Das Meßwerk hat eine Empfindlichkeit von $\frac{500\ \Omega}{V}$ und arbeitet als Widerstandsmesser an einer Meßbatterie mit einer Spannung von 100 V. Der Zeiger des Instrumentes stellt sich auf 25 Teilstriche ein. Wie groß ist R_x?

   Lösung:

   Wir ermitteln zunächst den Wert des Vorwiderstandes R_v bei einer Spannung von 100 V. Da das Meßwerk bei einer Spannung von 1 V einen Widerstand von 500 Ω hat (R_{sp} soll nicht berücksichtigt werden), beträgt R_m bei 100 V $= 100 \times 500 = 50\,000\ \Omega$. Der Zeiger schlägt bei Kurzschluß der Klemmen voll aus und zeigt 60 Teilstriche an. Es ist dann lediglich der Meßwerkswiderstand R_m (hier 50 kΩ) im Stromkreis. Bei 25 Teilstrichen muß sich R_{ges} vergrößert haben. Wir stellen folgende Frage:

   60 Teilstriche entsprechen 50 000 Ω (R_m)
   25 Teilstriche entsprechen ? Ω.

   Bei **einem** Teilstrich beträgt der Gesamtwiderstand im Stromkreis das 60fache wie bei Vollausschlag; denn Strom und Widerstand stehen im umgekehrten Verhältnis zueinander. R_{ges} bei **einem** Teilstrich ist gleich $R_m \times 60 = 50\,000 \times 60 = 3\,000\,000\ \Omega = 3\ M\Omega$. Da der Zeiger des Instrumentes 25 Teilstriche anzeigt, ist der Strom gegenüber **einem** Teilstrich um das 25fache stärker, der Gesamtwiderstand demnach um das 25fache kleiner geworden. Es ergibt sich daher folgende Rechnung:

   $$R_{ges} = \frac{50\,000 \times 60}{25} = \frac{3\,000\,000}{25} = 120\,000\ \Omega.$$

   Da aber $R_x = R_{ges} - R_m$ ist, müssen wir von den 120 000 Ω 50 000 Ω abziehen, und wir erhalten:

   $$R_x = 120\,000 - 50\,000 = 70\,000\ \Omega \text{ oder } 70\ k\Omega.$$

   Auch mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes kommen wir zum gleichen Ergebnis. Bei $R_x = 0\ \Omega$ haben wir Vollausschlag; es fließt ein Spulenstrom I_{sp} von

2 mA. Wir müssen jetzt ermitteln, wie stark der Strom bei 25 Teilstrichen ist. Es ist:

$$I_{sp} = \frac{0{,}002 \times 25}{60} = 0{,}000833\,\ldots\, \text{A}$$

$$R_{ges} = \frac{U}{I} = \frac{100}{0{,}000833} = \text{rund } 122\,000\ \Omega$$

$$R_x = R_{ges} - R_m = 122\,000 - 50\,000 = \mathbf{72\,000}\ \Omega = \mathbf{72}\ \text{k}\Omega.$$

Das Rechnen mit dem Ohmschen Gesetz ist etwas schwieriger als bei der ersten Rechenweise, auch ist sie wegen der notwendigen Abrundungen häufig nicht ganz so genau.

2. Das UVA der Firma Gossen hat eine Empfindlichkeit von $\frac{835\ \Omega}{\text{V}}$. Es soll als Widerstandsmesser im Meßbereich bis 120 V arbeiten. Die Skala hat 60 Teilstriche. Wie groß ist ein zu messender Widerstand R_x, wenn der Zeiger auf 15 Teilstriche zeigt?

Lösung:

R_m beträgt 835×120 = rund $100\,000\ \Omega = 0{,}1\ \text{M}\Omega$. Bei **einem** Teilstrich ist R_{ges} $0{,}1 \times 60 = 6\ \text{M}\Omega$, bei **15** Teilstrichen $6 : 15 = 0{,}4\ \text{M}\Omega = 400\,000\ \Omega$.
$R_x = R_{ges} - R_m = 400\,000 - 100\,000 = \mathbf{300\,000}\ \Omega = \mathbf{0{,}3}\ \text{M}\Omega$.

Nach dem Ohmschen Gesetz gerechnet, ergibt sich:

$\frac{1}{835} = 0{,}0012$ A $= 1{,}2$ mA bei Endausschlag (60 Teilstriche), bei 15 Teilstrichen $\frac{1{,}2 \times 15}{60} = 0{,}3$ mA.

$$R_{ges} = \frac{U_{MB}}{I_{sp}} = \frac{120}{0{,}0003} = \frac{1\,200\,000}{3} = 400\,000\ \Omega = 0{,}4\ \text{M}\Omega.$$

$$R_x = R_{ges} - R_m = 400\,000 - 100\,000 = \mathbf{300\,000}\ \Omega = \mathbf{0{,}3}\ \text{M}\Omega.$$

Das Ergebnis deckt sich mit der vorhergegangenen Rechnung.

B. Widerstandsmesser für niederohmige Widerstände

Für die Schaltung eines Drehspulmeßwerkes zum Messen niederohmiger Widerstände gilt gleichfalls, daß der Meßwerkswiderstand für den Meßbereich eine bedeutende Rolle spielt. Im Gegensatz zu dem hohen Meßwerkswiderstand R_m für das Messen hochohmiger Widerstände muß R_m für das Messen niederohmiger Widerstände klein sein.

Wir gehen auch hierbei von der Tatsache aus, daß die größte Meßgenauigkeit zwischen dem Widerstandswert 0 Ω und dem Zeigerausschlag „Mitte" liegt, wenn also $R_m = R_x$ ist. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß bei sehr kleinem Meßwerkswiderstand, z. B. $R_m = 10\ \Omega$, von 0 bis Zeigerausschlag „Mitte" der Bereich von 0 Ω bis 10 Ω bestrichen wird. Ab diesem Punkt bis ∞ drängen sich alle restlichen Widerstandswerte zusammen.

Wie erreichen wir diesen niedrigen Wert des Meßwerkswiderstandes? Wir müssen jetzt ein Instrument wählen, dessen innerer Widerstand sehr gering ist, so gering, daß er nicht ins Gewicht fällt. Vor dieses Instrument schalten wir einen niederohmigen Widerstand, der den Meßbereich zwischen Vollausschlag und halbem Ausschlag bestimmt. Die Spannung der Meßbatterie muß jetzt so

klein wie möglich gehalten werden. Wegen des notwendigen kleinen Widerstandes R_m des Meßwerkes schalten wir entweder zu einem Spannungsmesser einen entsprechend bemessenen Widerstand parallel oder wir verwenden gleich einen Strommesser, bei dem der Parallelwiderstand bereits in entsprechendem Werte vorhanden ist. Abb. 41 zeigt eine Versuchsanordnung, die wir besprechen wollen.

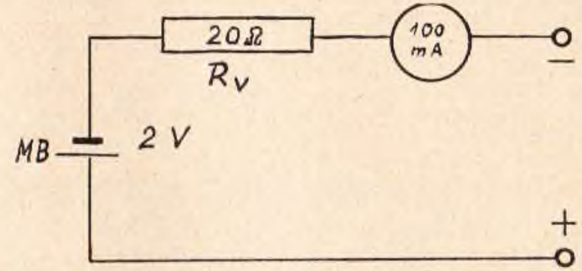


Abb. 41

Der innere Widerstand des Strommessers (Meßbereich bis 100 mA) ist so gering, daß wir ihn nicht zu berücksichtigen brauchen. Schalten wir das Instrument in Reihe mit einem Vorwiderstand von 20 Ω und einer Meßbatterie mit einer Spannung von 2 V und sehr kleinem inneren Widerstand (Akkumulator), so messen wir bei Kurzschluß der Klemmen + und — einen Strom $I = \frac{U}{R} = \frac{2}{20} = 0{,}1$ A. Diese 0,1 A entsprechen einem Widerstand $R_x = 0\ \Omega$.
Zwischen Vollausschlag und halbem Ausschlag des Zeigers lassen sich alle Werte zwischen 0 und 20 Ω recht genau messen. Die Eichung der Skala in Ohm wird genauso durchgeführt, wie das bei hochohmigen Widerstandsmessern besprochen worden ist.

Beispiele:

1. Die Klemmen + und — werden kurzgeschlossen; der Zeiger geht auf den Endausschlag; wir schreiben 0 Ω.

2 Wir schalten einen Widerstand von 5 Ω zwischen die Klemmen + und —. Der Zeiger zeigt einen Strom $I = \frac{U}{R} = \frac{U_{MB}}{R_m + R_x} = \frac{2}{25} = 0{,}08$ A. Hier schreiben wir 5 Ω.

3. Bei $R_x = 10\ \Omega$ fließt ein Strom von $\frac{U_{MB}}{R_m + R_x} = \frac{2}{30} = 0{,}066\,..$ A. An dieser Stelle schreiben wir 10 Ω.

4. Welchen Wert hat bei obigem Instrument ein unbekannter Widerstand R_x, wenn der Zeiger auf 0,95 A zeigt?

$$R_{ges} = \frac{U_{MB}}{I_m} = \frac{2}{0{,}95} = 21{,}05\ \Omega$$

$$R_x = R_{ges} - R_m = 21{,}05 - 20 = \mathbf{1{,}05}\ \Omega.$$

5. Welcher Wert von R_x ergibt sich, wenn das Instrument 0,55 A anzeigt?

$$R_{ges} = \frac{2}{0{,}55} = 36{,}36\ \Omega$$

$$R_x = R_{ges} - R_m = 36{,}36 - 20 = \mathbf{16{,}36\ \Omega}.$$

Über die praktische Anwendung von Widerstandsmessern der in dieser Ziffer geschilderten Ausführung wird bei der Behandlung der Prüfschrankmessungen eingegangen. Vorerst wollen wir uns mit einem Widerstandsmesser beschäftigen, dessen Wirkungsweise auf einem völlig anderen Prinzip beruht: der Meßbrücke.

(17) Meßbrücken

A. Die Wheatstonesche*) Meßbrücke

Die Wheatstonesche Meßbrücke ist eine Widerstandsschaltung in Verbindung mit einem Galvanometer und einer Meßbatterie, bei der aus drei bekannten Widerständen der vierte, unbekannte Widerstand R_x durch Abgleich ermittelt werden kann. In Band IV, ab Seite 30, ist die Dämpfungsschaltung an Hand einer solchen Meßbrücke erläutert worden.

Zum Verständnis der Wirkungsweise der Wheatstoneschen Meßbrücke bauen wir eine Versuchsanordnung gemäß Abb. 42 auf.

Drei in ihrem Wert bekannte Widerstände, nämlich Widerstand a = 366 Ω, Widerstand c = 1260 Ω und ein veränderlicher Widerstand b = 100 Ω schalten wir mit einem unbekannten Widerstand R_x gem. Abb. 42 zusammen. R_x ist

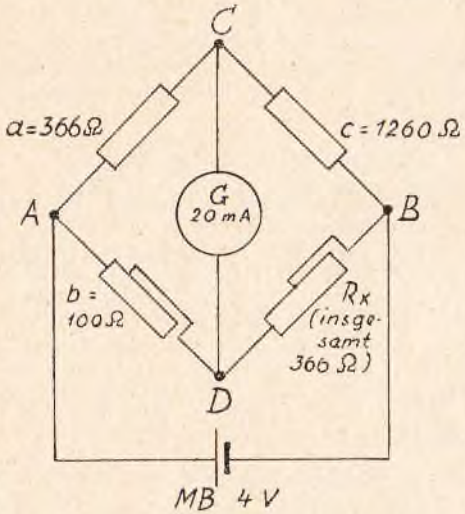


Abb. 42

*) Anm.: Sprich: „Wittstohnsche" (scharfes t bei „st").

zweckmäßigerweise veränderlich (Phywe-Schiebewiderstand zu 366 Ω). Die Eckpunkte des so gewonnenen, auf einer Spitze stehenden Quadrates bezeichnen wir mit A, C, B und D. Die Strecken AC, AD, CB und DB, in denen die Widerstände a = 366 Ω, b = 100 Ω, c = 1260 Ω und R_x liegen, nennt man „Brückenarme". An die Punkte A und B legen wir die Meßbatterie MB mit einer Spannung von 4 V (Akkumulator) und an die Punkte C und D einen Strommesser, der als Galvanometer arbeitet (Meßbereich von 0 — 10 mA nach jeder Seite). Die Verbindungslinien zwischen den gegenüberliegenden Eckpunkten eines Rechtecks nennt man seine Diagonalen. In Abb. 42 ist die Verbindungslinie AB die eine, die Verbindungslinie CD die zweite Diagonale. In der Diagonalen AB, die aus Übersichtlichkeitsgründen nach unten verlagert ist, liegt die Meßbatterie MB. Diese Diagonale wird daher **„Batteriediagonale"** genannt. In der Diagonalen CD liegt das Meßinstrument; diese Diagonale heißt **„Meßdiagonale"**.

Durch Bewegen des Schiebers am Widerstand b = 100 Ω verändern wir seinen Widerstandswert. Hierbei beobachten wir das Instrument und stellen fest, daß der Zeiger des Instrumentes in der Meßdiagonalen hin- und herpendelt. Bei einer ganz bestimmten Stelle des Schiebers zeigt der Zeiger auf 0 mA (Mitte der Skala). Das gleiche geschieht, wenn wir den Schieber des Widerstandes R_x betätigen. Widerstand b und R_x im Benehmen mit den Festwiderständen a und c beeinflussen demnach die Stärke und die Richtung des Stromes, der über die Meßdiagonale fließt. Es muß also über der Meßdiagonalen eine Potentialdifferenz (eine Spannung) herrschen, deren Polarität je nach Stellung der Schieber unterschiedlich ist; denn sonst könnte der Zeiger des Galvanometers nicht nach links oder nach rechts ausschlagen. Einmal hat der Punkt C ein höheres Potential gegenüber Punkt D und zum anderen Mal umgekehrt. Alle diese Zeigerausschläge interessieren uns aber nicht; nur **ein** Punkt ist von Wichtigkeit, nämlich die Stellung des Schiebers, bei der der Zeiger **nicht** ausschlägt, sondern in der **Ruhelage** (Stellung Mitte) verbleibt. Wenn der Zeiger **nicht** ausschlägt, fließt offensichtlich **kein** Strom durch das Instrument. Wenn aber kein Strom fließt, kann keine Spannung vorhanden sein: **die Punkte C und D haben gleiches Potential.** In diesem Falle müssen die Spannungsabfälle über allen vier Widerständen gleich (und auch verhältnisgleich) sein. Man sagt, die Brücke ist im **Gleichgewicht.**

Zum besseren Verständnis betrachten wir die Abb. 43, die uns geläufiger als Abb. 42 sein dürfte. Wir erkennen hier eine Stromverzweigung, deren oberer Zweig aus den Widerständen a und c und deren unterer Zweig aus den Widerständen b und x besteht.

Zwischen den Widerständen a und c liegt der Punkt C, zwischen den Widerständen b und x der Punkt D der Meßdiagonalen mit dem Galvanometer G. An A und B (entsprechend der Batteriediagonalen Abb. 42) liegt die Spannungsquelle (4 V). Wir nehmen an, daß alle 4 Widerstände gleich sind, z. B. je 20 Ω. a + c sind 40 Ω, b + x ebenfalls 40 Ω. An den Verzweigungspunkten A und B herrscht die Spannung der Spannungsquelle, hier 4 V. Der Gesamtstrom I_{ges} beträgt $\frac{4}{20}$ = 0,2 A. I_1 ist gleich I_2, nämlich 0,1 A. I_1 erzeugt über Widerstand a einen Spannungsabfall von $U = I \times R = 0{,}1 \times 20 = 2$ V, I_2 erzeugt über Widerstand b den gleichen Spannungsabfall, so daß zwischen C und D gleiches Potential herrscht. Somit kann über das Galvanometer kein Strom fließen.

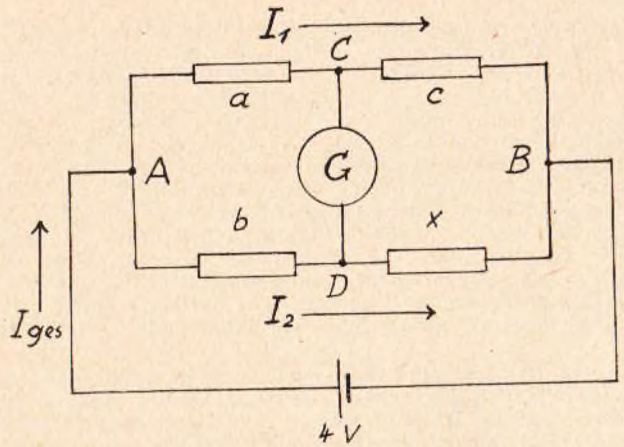


Abb. 43

Vorhin hatten wir angedeutet, daß zwischen C und D ebenfalls gleiches Potential herrscht, wenn die Widerstände der vier Brückenarme **verhältnisgleich** sind. Wir nehmen für a 20 Ω, für c 40 Ω, für b 60 Ω und für x 120 Ω. Jetzt sind die Teilströme I_1 und I_2 **nicht** mehr gleich. Trotzdem herrscht zwischen C und D gleiches Potential. Wir rechnen:

$$R_1 = a + c = 20 + 40 = 60\,\Omega,$$

$$R_2 = b + x = 60 + 120 = 180\,\Omega,$$

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{4}{60} = 0{,}0666\ldots.\text{ A},$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{4}{180} = 0{,}0222\ldots.\text{ A}.$$

Der Spannungsabfall über Widerstand a beträgt $U = I_1 \times a = 0{,}0666 \times 20 = 1{,}332$ V, der über Widerstand b: $U = I_2 \times b = 0{,}0222 \times 60 = 1{,}332$ V. Beide Spannungsabfälle sind also auch bei Verhältnisgleichheit der Widerstände in den beiden Brückenarmen gleich, so daß auch hier zwischen C und D keine Potentialdifferenz vorhanden ist.

Diese Erkenntnis nutzt man — wie eingangs erwähnt — dazu aus, mit Hilfe dreier bekannter Widerstände den vierten (unbekannten) zu ermitteln. Da die Meßdiagonale stromlos ist, wenn alle vier Brückenarme gleich oder verhältnisgleich sind, läßt sich der unbekannte Widerstand x aus einer Verhältnisgleichung (Proportion, s. Ziffer 14) leicht ermitteln. Es verhalten sich die Widerstände a zu c wie b zu x:

$$a : c = b : x.$$

Die Produktengleichung lautet:

$$a \times x = c \times b.$$

x beträgt:

$$x = \frac{c \times b}{a},$$

oder, da man die Faktoren c $\times$ b vertauschen kann:

$$x = \frac{b \times c}{a} = \frac{b}{a} \times c.$$

Nun zurück zu unserem Versuch. Wir verändern den Widerstandswert von b solange, bis über G kein Strom fließt, und nehmen an, daß dieser Fall eintritt, wenn b = 61 Ω beträgt. Es ist dann

$$a : c = b : x$$

$$366 : 1260 = 61 : x$$

$$x = \frac{61 \times 1260}{366}$$

$$x = \mathbf{210\,\Omega}.$$

Da wir in Ziffer 14 ausgiebig über Proportionen gesprochen haben, mag dieses eine Beispiel genügen.

Erwähnt soll noch werden, daß man mit Hilfe einer Meßbrückenschaltung auch Induktivitäten und Kapazitäten messen kann. An Stelle der Gleichspannungsquelle tritt dann eine Wechselspannungsquelle und an Stelle der Ohmschen Widerstände geeichte Vergleichskapazitäten oder- induktivitäten.

B. Die Schleifdrahtmeßbrücke

Die praktisch am meisten benutzte Meßbrückenschaltung ist die der sog. **„Schleifdrahtmeßbrücke"**. Abb. 44 zeigt die grundsätzliche Anordnung in Form eines Versuches.

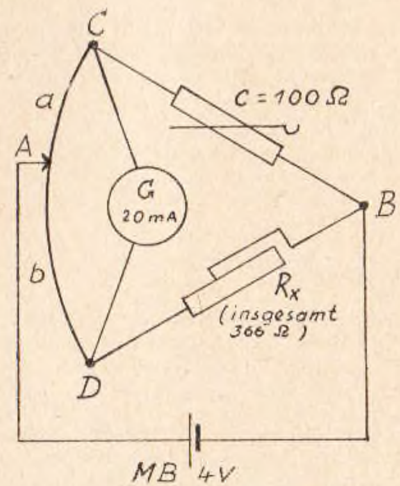


Abb. 44

Wir spannen einen Konstantandraht von 70 cm Länge und 0,2 mm ⌀ zwischen zwei Klemmen. Eine Klemme sei der Punkt C der Abb. 44, die zweite der Punkt D. An C schließen wir ein Ende des Widerstandes c zu

100 Ω und den Pluspol des Galvanometers (Meßbereich je 10 mA nach rechts und links) an. Der Punkt D wird mit einem Ende des zu messenden Widerstandes x und dem Minuspol des Galvanometers verbunden. Im Punkt B vereinigen sich die freien Enden der Widerstände c und x; ferner ist B mit dem Minuspol der Meßbatterie MB zu verbinden. Die Zuführung zum Pluspol der Batterie machen wir beweglich (Litze!). Das freie Ende erhält eine Krokodilklemme, die auf dem Widerstandsdraht CD schleift. Dort, wo die Klemme den Widerstandsdraht berührt, liegt der Punkt A der Brücke. Wir erhalten somit auch hier vier Brückenarme, nämlich AC, AD, CB und DB. Die Strecke AC des Schleifdrahtes bildet den Widerstand a, die Strecke AD den Widerstand b der Abb. 42. Die Batteriediagonale ist auch hier AB, die Meßdiagonale CD. Die Anordnung der Abb. 44 entspricht also völlig der der Abb. 42. In betriebsmäßiger Hinsicht besteht jedoch ein Unterschied. Während bei der Wheatstoneschen Meßbrücke der Punkt A starr ist und der Abgleich durch den veränderlichen Widerstand b erfolgt, wird bei der Schleifdrahtmeßbrücke der Punkt A bewegt und teilt damit den Gesamtwiderstand des Schleifdrahtes je nach Lage in zwei mehr oder weniger ungleiche Widerstände a und b auf. Auch hier ist die Brücke im Gleichgewicht, wenn a : c = b : x ist. Dieses Gleichgewicht stellen wir durch Verschieben des Punktes A (die Verbindung zum Pluspol der Meßbatterie) auf dem Schleifdraht CD her. Zeigt das Instrument G keinen Ausschlag an, dann besteht Verhältnisgleichheit zwischen sämtlichen 4 Brückenarmen, und es ist auch hier:

$$x = \frac{b \times c}{a}.$$

Die Schleifdrahtmeßbrücke hat jedoch gegenüber der Anordnung Abb. 42 den Vorteil, daß man das Verhältnis $\frac{b}{a}$ auf einer Skala ablesen kann. Wir brauchen lediglich den abgelesenen Wert mit dem Wert von c, der meist dekadisch ist, zu multiplizieren. Der Wert von c kann also 0,1; 1; 10; 100; 1000 usw. betragen, so daß sich die Rechnung sehr vereinfacht.

Wenn wir die Formel

$$x = \frac{b \times c}{a}$$

wie folgt schreiben:

$$x = \frac{b}{a} \times c$$

so wird das oben Gesagte leichter verständlich.

Eine vielverwendete Schleifdrahtmeßbrücke ist das „Pontavi" der Firma Hartmann & Braun, das in Abb. 45 gezeigt wird. Der große Knopf betätigt den Schleifdrahtschieber, d. h. er bewegt den Punkt A. Der Knopf trägt eine Skala mit einer Einteilung von 0—50. Die Zahlen stellen das Verhältnis $\frac{b}{a}$ dar. Der Widerstand c ist stufenweise dekadisch regelbar, er hat die Stufen 0,1; 1; 10; 100 und 1000. Die Meßbatterie in Form einer Taschenlampenbatterie ist fest im Gehäuse eingesetzt. Das Galvanometer ist links oben zu erkennen. An die beiden x-Klemmen wird der zu messende Widerstand angeschlossen. Zu beachten ist, daß immer der höchste Widerstandswert von c, also 1000, einzurasten ist. Nun drehen wir die Skala durch und beobachten den Zeiger des Galvanometers. Erhalten wir keine einwandfreie Nullage, so gehen wir mit c eine Stufe herunter, also auf 100. Haben wir auch hier

Abb. 45
(Werkfoto H & B)

keine einwandfreie Nullstellung beim Durchdrehen der Skala, so schalten wir wiederum eine Stufe zurück, d. h. auf 10. Wir nehmen an, daß bei Skalenstellung 25 der Zeiger des Galvanometers auf 0 zeigt. Es ist dann:

$$x = \frac{b}{a} \times c$$
$$= 25 \times 10$$
$$= \mathbf{250\ \Omega}.$$

Schleifdrahtmeßbrücken in besonders sorgfältiger und empfindlicher Ausführung, die mit Spiegelgalvanometern ausgestattet sind, dienen den Kabelmeßbeamten zum Aufsuchen des Fehlerortes bei gestörten Kabeln.

(18) Leistungsmesser

Die elektrische Leistung errechnet sich bekanntlich zu

$$N = U \times I.$$

Will man die Leistung messen, die ein Verbraucher aufnimmt, so muß man zur **gleichen** Zeit die Spannungen am Verbraucher sowie den Strom, der durch ihn fließt, messen. Eine einfache Anordnung, um die Größe der Leistung festzustellen, zeigt Abb. 46.

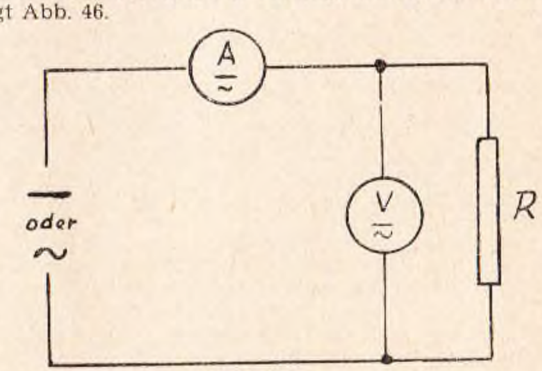


Abb. 46

In den Verbraucherstromkreis (der Verbraucher ist durch einen Ohmschen Widerstand R in Abb. 46 dargestellt) schalten wir einen Strommesser A und parallel zum Verbraucher einen Spannungsmesser V. Die Leistung N, die an den Verbraucher abgegeben wird, ermitteln wir, indem wir den abgelesenen Wert von I mit dem von U multiplizieren. Dieses Verfahren ist jedoch umständlich und auch kostspielig, weil hierbei zwei Meßinstrumente benötigt werden. Ist der Verbraucher ein frequenzabhängiger Widerstand, so erhalten wir darüber hinaus wegen der auftretenden Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung falsche Werte. Man kann aber den Strom- und den Spannungsmesser zu **einem** Instrument vereinigen. Ein solches Instrument trägt eine feststehende, sehr niederohmige Spule, die aus wenigen Windungen dicken Drahtes besteht, und eine drehbare, hochohmige Spule aus vielen Windungen dünnen Drahtes. Die niederohmige Spule nennt man **Stromspule** (I_{sp}). Sie wird — wie der Strommesser in Abb. 46 — **in** die stromdurchflossene Leitung geschaltet. Die hochohmige Spule nennt man **Spannungsspule** (U_{sp}). Sie wird — wie der Spannungsmesser in Abb. 46 — **parallel** zum Verbraucher geschaltet. Die schematische Anordnung zeigt Abb. 47.

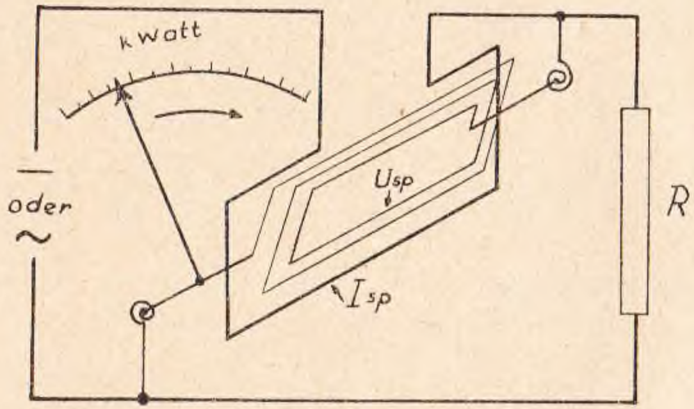


Abb. 47

Beide Spulen werden von Strömen der gleichen Richtung durchflossen. Die sich dabei aufbauenden magnetischen Felder sind daher gleich gerichtet und wirken abstoßend aufeinander. Die Folge ist, daß sich die Spannungsspule dreht. Ein auf deren Achse angebrachter Zeiger gleitet über eine in Watt oder Kilowatt geeichte Skala. Je mehr Leistung der Verbraucher aufnimmt, um so stärker ist der Strom, der durch die Stromspule fließt, um so stärker wird ihr Magnetfeld. Starker Strom verursacht einen höheren Spannungsabfall ($I \times R$) über dem Verbraucher als ein schwacher. Somit wird die Potentialdifferenz, das heißt die Spannung an den Anschlußpunkten der Spannungsspule, bei starkem Strom größer als bei schwachem und daher auch der Strom durch die Spannungsspule stärker sein. Die Folge ist auch hier ein stärkeres Magnetfeld der Spannungsspule: sie wird weiter ausgelenkt als bei schwachem Strom. Damit wird auch der Ausschlag des Zeigers größer. Der Drehwinkel der Spannungsspule verhält sich proportional zu den Strömen, die beide Spulen durchfließen. Man ist daher in der Lage, die Skala des Instruments in Watt oder Kilowatt zu eichen.

Die praktische Ausführung einer Form eines Leistungsmessers ist in Ziffer 6 unter „elektrodynamische Meßgeräte" besprochen.

(19) Zähler

Zum Messen der elektrischen Arbeit ($N \times t$) verwendet man Zähler, von denen es verschiedene Ausführungsformen gibt. Die gebräuchlichste Art für Wechselstrom ist der Induktionszähler, dessen grundsätzlicher Aufbau in Abb. 48 dargestellt ist.

Wir erkennen einen „Strommagneten", dessen Schenkel wenige Windungen dicken Drahtes trägt, und **senkrecht** zu ihm einen „Spannungsmagneten" mit vielen Windungen dünnen Drahtes. Wie beim Leistungsmesser liegt die Spule des Strommagneten **in** der Leitung zum Verbraucher und die Spule des Spannungsmagneten parallel zu ihm. Zwischen dem Luftspalt des Strom- und dem des Spannungsmagneten befindet sich eine drehbare Aluminiumscheibe, deren Achse über einen Schneckentrieb mit einem Zählwerk verbunden ist. Da Strom- und Spannungsmagnet senkrecht zueinander stehen, gilt das gleiche für die durch den Stromfluß erzeugten magnetischen Wechselfelder: sie sind um 90° gegeneinander verschoben. Infolge der Induktionswirkung auf die Aluminiumscheibe, dreht sich diese. Das sogenannte „Drehmoment", das heißt, die Kraft, die auf die Scheibe wirkt, wird um so größer, je mehr Leistung der Verbraucher aufnimmt; die Umlaufgeschwindigkeit der Scheibe wächst.

Ein Bremsmagnet hält infolge der Induktionswirkung auf die Scheibe nach der Lenzschen Regel die Umdrehungsgeschwindigkeit in bestimmten Grenzen. Somit ist man in der Lage, die Leistung N in Abhängigkeit zur Zeit t zu bringen. Dreht sich die Scheibe ein Mal in einer Sekunde bei einer vom Ver-

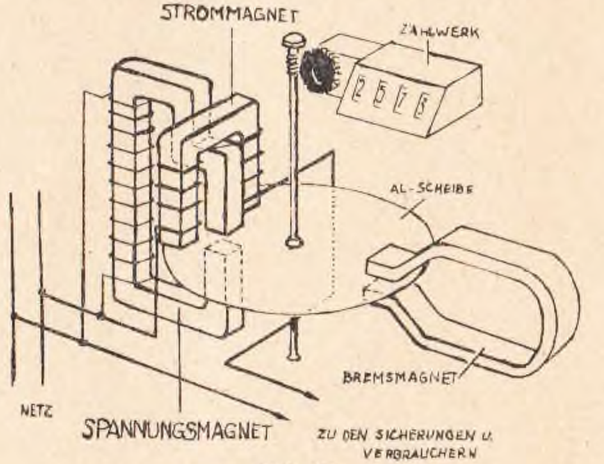


Abb. 48

braucher aufgenommenen Leistung von 1 Watt, so zeigt das Zählwerk 1 Wattsekunde (Ws) an. Da die Wattsekunde für die Praxis eine zu kleine Einheit darstellt, sorgt man durch entsprechende Bemessung der Strom- und Spannungsspule sowie der Feldstärke des Bremsmagneten dafür, daß eine bestimmte Anzahl Umdrehungen der Scheibe der elektrischen Arbeit von einer Kilowattstunde entspricht.

Die Zähler erhalten ein Schild, aus dem unter anderem die höchstzulässige Spannung und Stromstärke sowie die Anzahl der Umdrehungen je Kilowattstunde (U/kWh) ersichtlich ist. Eine rote Marke am Scheibenrand zeigt die Ruhestellung der Scheibe an. 1200 U/kWh bedeutet, daß bei 1200 Umdrehungen der Scheibe die elektrische Arbeit von 1kWh verrichtet worden ist.

Die elektrische Arbeit bei Gleichstrom kann unter anderem durch sogenannte „elektrolytische Zähler“ gemessen werden, bei denen die ausgeschiedene Menge eines Gases oder eines Metalles als Maß für die verrichtete elektrische Arbeit dient. Eine weitere Art von Zählern für Gleichstrom stellt der „Motorzähler“ dar. Er ist ein kleiner eisenloser Elektromotor, dessen Anker aus einer dünndrähtigen Spannungsspule und dessen Feldmagnet aus einer dickdrähtigen Stromspule besteht. Auch hier liegt die Stromspule (Feldmagnet) **in** der Leitung zum Verbraucher, die Spannungsspule (Anker) **parallel** zu ihm.

Für diejenigen Leser, die sich mit Gleichstrommotoren beschäftigt haben, sei gesagt, daß es sich um eine Art Nebenschlußmotorenschaltung handelt, bei der sich Feld- und Ankerwicklung bezüglich ihrer Widerstände und Schaltung umgekehrt verhalten wie bei einem Nebenschlußmotor. Die Achse des Ankers trägt eine Aluminiumscheibe, deren Umdrehungsgeschwindigkeit wie bei einem Wechselstromzähler durch einen Dauermagneten gebremst wird, sowie einen Schneckentrieb zum Betätigen des Zählwerkes.

Union-Druckerei und Verlagsanstalt GmbH, Frankfurt am Main, Bockenheimer Landstraße