9 · 2010

LERNEN und KÖNNEN

ELEKTROPRAKTIKER-Magazin
für die Aus- und Weiterbildung

Ein Messwerk für mehrere elektrische Größen

Skalenzeichen sind Symbole und sonstige Angaben auf dem Skalenblatt, die ein elektrisches Messmittel näher charakterisieren. Aus den Sinnbildern[1)] für Messwerke analoger Messgeräte kann die Messgröße bestimmt werden, auf der das Wirkprinzip des entsprechenden Messwerkes beruht. Dass auch unterschiedliche elektrische Größen gemessen werden können, wird am Beispiel mit einem Messwerk eines Multimeters nachgewiesen.

Analoge Messwerke

Allgemein besteht die Funktion eines Messgerätes darin, eine zu messende Größe in eine Anzeige oder in eine der Anzeige gleichwertige Information umzuwandeln. Bei analogen Messgeräten wird die zu messende Größe in eine Kraft bzw. bei Zeigergeräten in ein Drehmoment transformiert. Von der Wärmewirkung des elektrischen Stromes abgesehen, auf deren Grundlage das Wirkprinzip des nur noch historisch interessanten Hitzdrahtinstrumentes beruht, gibt es zwei physikalische Erscheinungen, bei denen Kräfte erzeugt werden:

- das elektrische Feld und
- das magnetische Feld.

Elektrische Felder werden in der Messtechnik selten genutzt. Durch die zu messenden Spannung werden zwei Platten aufgeladen. Die ungleichnamigen Ladungsmengen ziehen einander an und bewirken durch die beweglich gelagerte Platte einen Zeigerausschlag. Mit den elektrostatischen Messwerken können deshalb höhere Gleich- und Wechselspannungen gemessen werden.

Kräfte des magnetischen Feldes wirken auf ferromagnetische Stoffe ein. Sie werden angezogen. Der Betrag dieser Kräfte ist von der magnetischen Feldstärke H bzw. von der magnetischen Flussdichte B abhängig. Beide Größen sind gesetzmäßig über die elektrische Durchflutung Θ mit der Stromstärke I verknüpft.

Wirkprinzip eines Dreheisenmesswerkes

Stromstärke I $\xrightarrow{\Theta = I \cdot N}$ elektrische Durchflutung Θ $\xrightarrow{H = \Theta / l}$ magnetische Feldstärke H $\xrightarrow{B = \mu \cdot H}$ magnetische Flussdichte B $\xrightarrow{F = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \cdot A}$ Kraft F auf ferromagnetischen Stoff $\xrightarrow{M = F \cdot r}$ Drehmoment M $\longrightarrow$ Zeigerausschlag

Die dargestellten kausalen Zusammenhänge der physikalischen Größen spiegeln das Wirkprinzip eines Dreheisenmesswerkes wider. Sein Zeigerausschlag ist somit proportional der Stromstärke abhängigen Stärke des Magnetfeldes.

Drehspulmesswerk

Im Gegensatz zum Dreheisenmesswerk ist bei einem Drehspulmesswerk das Magnetfeld in Richtung und Betrag konstant. Im homogenen Feld eines Dauermagneten befindet sich eine rechteckige, drehbar gelagerte Spule. Über zwei gegensinnig gewickelte Spiralfedern wird dieser Drehspule der Strom zugeführt. Das Wirkprinzip des Drehspulmesswerkes beruht auf dem elektromagnetischen Kraftwirkungsgesetz, das heißt auf die vom Strom durchflossene Drehspule wirkt im Feld des Dauermagneten eine Kraft ein. Das entstehende Drehmoment M führt zur Anzeige der Stromstärke I als Messgröße:

$$M = c \cdot \Phi \cdot I \qquad (1)$$

- c Konstruktionskonstante
- ϕ konstanter Magnetfluss des Dauermagneten
- I Stromstärke in der Drehspule (Messgröße)
- M Drehmoment bewirkt den Zeigerausschlag.

Steigende Stromstärke vergrößert das Drehmoment und somit den Zeigerausschlag. Die zunehmende Torsion der Spiralfedern erhöht so lange das Gegendrehmoment bis das Gleichgewicht zum Drehmoment der Messgröße erreicht ist. Das aus den Spiralfedern und der Drehspule bestehende schwingende mechanische

1) DIN EN 60051-1: 1999-10: Direkt wirkende anzeigende elektrische Messgeräte und ihr Zubehör; Messgeräte mit Skalenanzeige.

INHALT

Grundwissen Lernfelder 1-5

Messtechnik
Ein Messwerk für mehrere elektrische Größen 1

Fachbegriffe
Was versteht man unter 5

Fachwissen Lernfelder 6-13

Technisches Zeichnen
S-Plan – Schaltpläne komfortabel erstellen 6

Installationstechnik
Installationsbestimmungen für elektrische Anlagen (1) 8

Antennentechnik
Koaxiales Verteilungssystem Teil 4: Verteil- und Abzweigdämpfung 10

Arbeitssicherheit
Arbeiten mit Leitern und Tritten Teil 3: Verschiedene Leiterarten ...11

Fremdsprache
Technisches Englisch 13

Prüfung Lernfelder 1-13

Fachtest
Fachtest Steuerungstechnik.....14

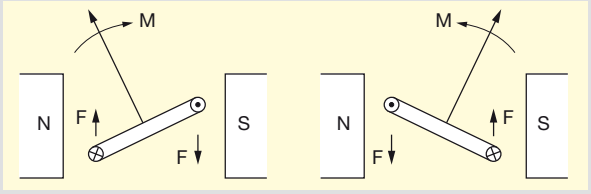
WISO
Wirtschafts-, Sozial- und Gemeinschaftskunde.....15

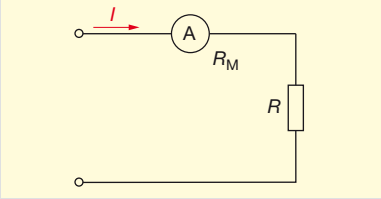
Lösungen und Impressum 16

System würde zum längeren Pendeln des Zeigers um den Anzeigewert führen. Da die Drehspule auf einem Aluminiumrähmchen gewickelt ist, werden bei Drehung Wirbelströme induziert. Das schwingende System wird gedämpft. Die Zeit für das Einpendeln auf die von der Messgröße abhängige Zeigerstellung wird stark verkürzt. Die Richtung des Stromes bestimmt in der Drehspule die Richtung des Zeigerausschlages (Bild ❶). Der Nullpunkt kann deshalb innerhalb der Skale liegen. Die Drehspule kann jedoch durch ihre mechanische Trägheit frequenzabhängigen Änderungen der Stromrichtung nicht folgen. Ein Wechselstrom muss durch eine Diode gleichgerichtet werden.

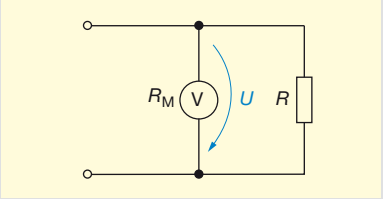
Bei einem relativ einfachen Aufbau besitzt das Drehspulmesswerk eine hohe Empfindlichkeit. Bereits Ströme von einigen Nanoampere werden angezeigt. Durch das starke eigene Magnetfeld ist die Fremdfeldeinwirkung gering. Die durch Temperatureinfluss entstehende Widerstandsänderung wird zum größten Teil selbst kompensiert. Gleichung (1) beschreibt die lineare Abhängigkeit zwischen Drehmoment und Stromstärke. Die Skale ist deshalb linear, das heißt gleichmäßig geteilt. Diese Eigenschaften bestimmen die Eignung des Drehspulmesswerkes als Präzisions- bzw. Feinmessgerät. Im Gegensatz zu den in den Anlagen fest installierten Betriebsmessgeräten sollen mit einem tragbaren Feinmessgerät als Vielfachmessgerät (Multimeter) möglichst unterschiedliche Messaufgaben gelöst werden.

❶ **Wirkprinzip des Drehspulmesswerkes**



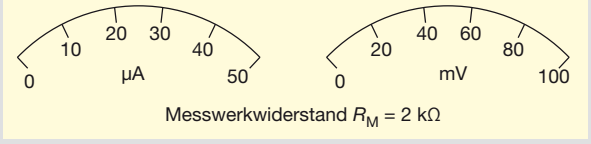


❷ **Messen der Stromaufnahme eines Verbrauchsmittels**



❹ **Spannungsmessung am Verbrauchsmittel**

❸ **Äquivalente Skalen eines Drehspulmesswerkes**



Messen von Stromstärke und Spannung

Drehspulmesswerke können auf Grund ihres Wirkprinzips Ströme messen. Dazu ist der Stromweg zum Beispiel zu einem Verbraucher zu unterbrechen und das Strommessgerät so einzufügen, dass es in Reihe zum Verbrauchsmittel liegt (Bild ❷). Durch den Innenwiderstand R_M des Strommessgerätes wird der Widerstand des Stromweges geringfügig erhöht.
Bei Stromdurchgang entsteht über dem Widerstand R_M des Messwerkes der Spannungsfall U_M. Dieser ist nach dem ohmschen Gesetz $U_M = I_M \cdot R_M$ proportional der Stromstärke I_M. Somit kann die in Ampere kalibrierte Skale in eine Spannungsskale umbezeichnet werden. Die Skale des Bildes ❸ gehört zu einem Drehspulmesswerk mit einem Messbereich von 50 µA. Bei einem Messwerkwiderstand R_M = 2 kΩ entsteht bei der Stromstärke I_M = 50 µA der Spannungsfall U_M = 50 µA · 2 kΩ → U_M = 100 mV.
Das bedeutet auch, dass bei einer den Strom antreibenden Spannung U = 100 mV Endausschlag des Zeigers erreicht wird. Mithin kann auf Grund des unveränderlichen Widerstandes von 2 kΩ jedem Teilstrich der µA-Skale ein Spannungswert zugeordnet werden.
Da eine Spannung gleich dem Potentialunterschied zwischen 2 Punkten eines Stromweges ist, muss das Messgerät – ohne Unterbrechung des Stromkreises – jedoch parallel zum Verbrauchsmittel geschaltet werden (Bild ❹). Die einspeisende Stromquelle wird durch den Spanungsmesser zusätzlich geringfügig belastet.

Messbereichserweiterung

Ein Messwerk kann nur bis zum Endausschlag seines beweglichen Systems belastet werden. Sollen darüber hinausgehende Ströme oder Spannungen gemessen werden, ist der Messbereich durch Widerstände zu erweitern. Zum Messen größerer Stromstärken muss ein Teil des Stromes am Messwerk vorbei geleitet werden. Dazu sind zum Messwerk Widerstände parallel zu schalten. Durch den so genannten Ayrton-Shunt (Bild ❺) wird der Einfluss des nicht vermeidbaren Kontaktübergangswiderstandes am Messbereichsumschalter weitgehend unterdrückt.
Da in der Praxis der Mehrbereichsstrommesser als selbstständiges Messgerät oder als Teil eines Multimeters eingesetzt wird, müssen an einer Skale die Messwerte der unterschiedlichen Messbereiche ohne großen Rechenaufwand ablesbar sein. Der Erweiterungsfaktor m ist dann ein festgelegtes Vielfaches, wenn nach dem Gesetz der Stromteilung die Beträge der Nebenwiderstände R_P in einem entsprechenden Verhältnis zum Messwerkwiderstand R_M stehen.

Erweiterungsfaktor der Strommessbereiche

$$m = \frac{I}{I_M} \qquad (2)$$

I Messgröße
I_M maximale Belastbarkeit des Messwerkes

Nebenwiderstand

$$\frac{R_P}{R_M} = \frac{I_M}{I - I_M}$$

$$R_P = \frac{1}{m-1} \cdot R_M \qquad (3)$$

Mit dem vorstehenden Beispiel des Drehspulmesswerkes (I_M = 50 µA und R_M = 2 kΩ) soll ein maximaler Strom von I = 10 mA gemessen werden. Nach den Gleichungen (2) und (3) ergeben sich folgende Werte:

Erweiterungsfaktor

$$m = \frac{I}{I_M} = \frac{10\ \text{mA}}{50\ \mu\text{A}} = 200$$

$$R_P = \frac{1}{m-1} \cdot R_M = \frac{1}{200-1} \cdot 2\ \text{k}\Omega$$

R_P = 10,05025 Ω

Gesamtwiderstand des Strommessers

$$R_{iA} = \frac{R_M \cdot R_P}{R_M + R_P} \text{ oder}$$

$$R_{iA} = \frac{I_M \cdot R_M}{I} = \frac{50\ \mu\text{A} \cdot 2\ \text{k}\Omega}{10\ \text{mA}}$$

R_{iA} = 10 Ω

Mit den vorstehenden Gleichungen kann nachgewiesen werden, dass mit steigendem Messbereich der Betrag des zuzuschaltenden Parallelwiderstandes verringert werden muss und die niederohmigen Widerstandswerte der Strommesser prinzipiell durch die kleinen Beträge der Parallelwiderstände entstehen.

Im unempfindlichsten Messbereich des Strommessers ist der Messgeräteinnenwiderstand R_{iA} am kleinsten. Er wird indirekt durch den Spannungsfall $U_M = R_{iA} \cdot$ Strommessbereich angegeben. Richtwerte sind U_M = 150 mV bis 1,5 V.

Größere Spannungen müssen durch Spannungsfälle über in Reihe zum Messwerk zu schaltende Vorwiderstände R_V (Bild ❻) reduziert werden. Die auch hier entstehenden Kontaktübergangswiderstände des Messbereichsumschalters haben durch die relativ hochohmigen Vorwiderstände kaum Einfluss auf die Messgenauigkeit.
Der Erweiterungsfaktor n ist dann ein feststehendes Vielfaches, wenn nach dem Gesetz der Spannungsteilung die Beträge der Vorwiderstände R_V in einem entsprechenden Verhältnis zum Messwerkwiderstand R_M stehen.

Erweiterungsfaktor der Spannungsmessbereiche

$$n = \frac{U}{U_M} \qquad (4)$$

U Messgröße
U_M maximale Spannung am Messwerk

Vorwiderstand

$$\frac{R_V}{R_M} = \frac{U - U_M}{U_M}$$

$$R_V = (n-1) \cdot R_M \qquad (5)$$

Mit dem oben gegebenen Drehspulmesswerk ($U_M = I_M \cdot R_M$; U_M = 100 mV und R_M = 2 kΩ) soll eine maximale Spannung von U = 10 V gemessen werden. Nach den Gleichungen (4) und (5) ergeben Messwerkwiderstand und Vorwiderstand zusammen den Gesamtwiderstand des Spannungsmessers.

Erweiterungsfaktor

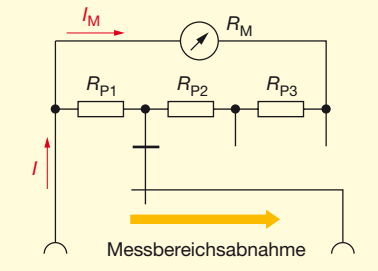
$$n = \frac{U}{U_M} = \frac{10\ \text{V}}{100\ \text{mV}} = 100$$

Vorwiderstand

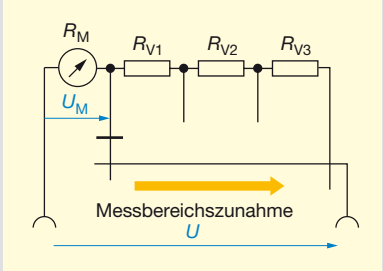
$R_V = (n - 1) \cdot R_M$

$R_V = (100 - 1) \cdot 2\ \text{k}\Omega$

$R_V = 198\ \text{k}\Omega$



❺ Mehrbereichsstrommesser

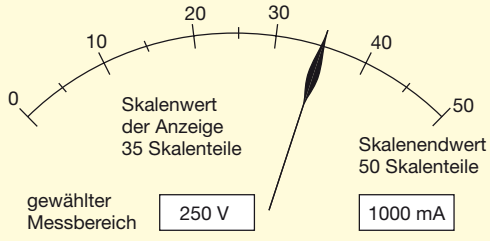


❻ Mehrbereichsspannungsmesser



Messbereich		Erweiterungsfaktor	
1	100 mV		
2	300 mV	n_{21}	3
3	1 V	n_{32}	10/3
4	3 V	n_{43}	3
5	10 V	n_{54}	10/3
6	30 V	n_{65}	3
7	100 V	n_{76}	10/3
8	300 V	n_{87}	3
5	1 µA		
6	3 µA	m_{65}	3
7	10 µA	m_{76}	10/3
8	30 µA	m_{87}	3

▲ ❼ Messbereiche eines Analogmultimeters (Ausschnitt)



❽ Bestimmung des Messwertes einer unbenannten Skale

Gesamtwiderstand des Spannungsmessers

$R_{iV} = R_V + R_M$

$R_{iV} = 198\ \text{k}\Omega + 2\ \text{k}\Omega$

$R_{iV} = 200\ \text{k}\Omega$.

Analog zu den Aussagen des Mehrbereichsstrommessers gelten für den Mehrbereichsspannungsmesser:
Mit steigendem Messbereich muss der Betrag des Vorwiderstandes erhöht werden und die hochohmigen Widerstandswerte des Spannungsmessers entstehen prinzipiell durch die hohen Beträge der Vorwiderstände.

Im unempfindlichsten Messbereich des Spannungsmessers ist der Messgeräteinnenwiderstand R_{iV} am größten. Er wird indirekt durch die Stromdämmung angegeben:

$$D = \frac{R_{iV}}{\text{Spannungsmessbereich}}. \qquad (6)$$

Richtwerte sind D = 200 Ω/V bis 1 MΩ/V.

Die Messbereiche der Analogmultimeter sind so gewählt, dass meist nur zwei oder drei unterschiedliche Erweiterungsfaktoren zwischen benachbarten Messbereichen entstehen. Das exemplarisch im Bild ❼ dargestellte Multimeter hat die Erweiterungsfaktoren 3 und 3,333 (10/3). Der Erweiterungsfaktor zwischen Messbereich 1 und 4 ist definitionsgemäß

$$n_{41} = \frac{U_4}{U_1} = \frac{3\ \text{V}}{100\ \text{mV}} = 30.$$

Dieser Wert ergibt sich auch durch die Multiplikation der Erweiterungsfaktoren der benachbarten Messbereiche 1 und 2, 2 und 3 sowie 3 und 4.

$n_{41} = n_{21} \cdot n_{32} \cdot n_{43} \Rightarrow n_{41} = 3 \cdot \frac{10}{3} \cdot 3 = 30$, da

$n_{41} = \frac{U_4}{U_1}$ $\qquad n_{43} = \frac{U_4}{U_3} \rightarrow U_4 = n_{43} \cdot U_3$

$n_{41} = \frac{n_{43} \cdot U_3}{U_1}$ $\qquad n_{32} = \frac{U_3}{U_2} \rightarrow U_3 = n_{32} \cdot U_2$

$n_{41} = \frac{n_{43} \cdot n_{32} \cdot U_2}{U_1}$ $\qquad n_{21} = \frac{U_2}{U_1} \rightarrow U_2 = n_{21} \cdot U_1$

$n_{41} = \frac{n_{43} \cdot n_{32} \cdot n_{21} \cdot U_1}{U_1} \Rightarrow n_{41} = n_{43} \cdot n_{32} \cdot n_{21}$

Mehrbereichsmessgeräte haben grundsätzlich unbenannte Skalen. Über die Skalenkonstante kann der Messwert berechnet werden (Bild ❽).

$$\text{Skalenkonstante} = \frac{\text{eingestellter Messbereich}}{\text{Skalenendwert}}$$

Skalenendwert = Gesamtzahl der Skalenteile

Messwert = Skalenwert · Skalenkonstante

Skalenwert = Zahl der Skalenteile der jeweiligen Zeigerstellung.

Messen eines Widerstands

Die Beträge niederohmiger Widerstände können nach dem Gesetz der Stromteilung auch mit einem Drehspulmesswerk bestimmt werden. Das Messwerk wird an eine meist interne Gleichstromquelle (Batterie) angeschlossen, parallel dazu das Messobjekt mit dem unbekannten Widerstandswert R_x (Bild ❾).

Vor jeder Messung muss bei geöffnetem Taster (offene Anschlussklemmen) der Zeigerendausschlag U_M bzw. I_M kontrolliert bzw. eingestellt werden. Der gesamte Strom fließt jetzt durch das Messwerk. Mit dem Messobjekt R_x teilt sich bei geschlossenem Taster der Gesamtstrom I_M auf. Der Zeigerausschlag wird geringer. Ist $R_x = 0$ (kurzgeschlossene Anschlussklemmen) bleibt der Zeiger in der mechanischen Nulllage. Die von den unterschiedlichen Stromwerten I' abhängigen Zeigerstellungen lassen sich mit den Messwerkdaten R_M und I_M bzw. U_M als Ohmwerte angeben. Nach dem Gesetz der Stromteilung stehen die Widerstände im umgekehrten Verhältnis von Anzeigewert I' zur Stromstärke I_x im Messobjekt

$$\frac{R_x}{R_M} = \frac{I'}{I_x} \quad \text{mit } I_x = I_M - I'$$

$$R_x = R_M \cdot \frac{I'}{I_M - I'}$$

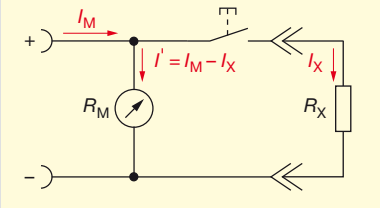
dem Anzeigewert I' zuzuordnender Widerstandswert

$$R_x = \frac{R_M}{\frac{I_M}{I'} - 1}. \qquad (7)$$

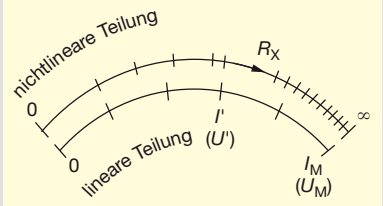
In Gleichung (7) können die Stromgrößen durch die Spannungsgrößen U' und U_M des Messwerks ersetzt werden.

Die in Ohm kalibrierte Skale (Bild ❿) mit dem Nullpunkt auf der linken Seite ist nichtlinear geteilt.

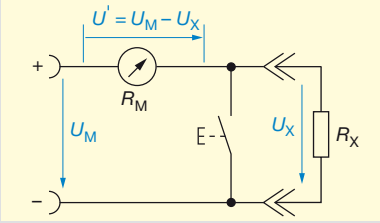
Hochohmige Widerstände werden günstiger durch eine Reihenschaltung mit dem Messwerk bestimmt (Bild ⓫). Auch hier muss bei angeschlossener Gleichstromquelle vor jedem Messvorgang eingemessen gegebenenfalls justiert werden.



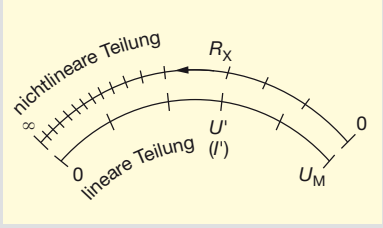
❾ Vereinfachter Schaltplan des Widerstandsmessers mit Parallelschaltung des Messobjekts



❿ Skalenverlauf des Parallel-Widerstandsmessers



⓫ Vereinfachter Schaltplan des Widerstandsmessers mit Reihenschaltung des Messobjekts



⓬ Skalenverlauf des Reihen-Widerstandsmessers

Tafel ❶ Spannungs-, Widerstrands- und Kapazitätswerte – Zuordnung an die im Bild ❸ gegebenen µA-Skale

Funktion des Messwerkes Messgröße Zeigerstellung	Strommessung I' in µA	Spannungsmessung U' in mV	Widerstandsmessung Parallelohmmeter R_X in kΩ	Reihenohmmeter R_X in kΩ	Kapazitätsmessung C_X in nF
0	0	0	0	∞	0
1	10	20	0,5	8	162
2	20	40	1,333	3	347
3	30	60	3	1,33	597
4	40	80	8	0,5	1061
5	50	100	∞	0	∞

Messwerkdaten: R_M = 2 kΩ ; I_M 50 µA
Frequenz der externen Wechselspannung 100 Hz

Bei kurzgeschlossenen Anschlussklemmen (betätigter Taster) ist $R_x = 0$. Der Zeigerendausschlag ist einzustellen.

Bei geöffnetem Taster sind Messwerk und Messobjekt, also R_M und R_x in Reihe geschaltet. Die Spannung U_M wird in die vom Messwerk angezeigte Teilspannung U' und in die über dem Messobjekt liegende Spannung U_x geteilt. Nach dem Gesetz der Spannungsteilung verhalten sich die Teilspannungen proportional zu den zugehörigen Widerständen:

$$\frac{R_x}{R_M} = \frac{U_x}{U_M} \qquad U_x = U_M - U'.$$

Der dem Anzeigewert U' zuzuordnende Widerstandswert ist

$$R_x = R_M \cdot \frac{U_M - U'}{U'}$$

$$R_x = R_M \cdot \left(\frac{U_M}{U'} - 1 \right). \qquad (8)$$

Bei dieser Schaltungsvariante ergibt sich auch eine stark nichtlinear geteilte Skale (Bild ⓬), jedoch mit dem Skalennullpunkt (elektrische Nulllage) auf der rechten Seite (Zeigerendausschlag). Die Spannungsgrößen der Gleichung (8) können durch die Stromgrößen I_M und I' ersetzt werden, wenn eine gegebene Ampere-Skale in Ohm kalibriert werden soll.

Messen einer Kapazität

Analog zum Reihen-Widerstandsmesser wird bei einem in Farad kalibrierten Spannungsmesser der Kondensator mit der unbekannten Kapazität C_x in Reihe mit dem Messwerk (Messwerkwiderstand R_M) geschaltet. Bei einer meist extern angeschlossenen Wechselstromquelle mit

Fortsetzung auf Seite 9

Fortsetzung von Seite 4

bekannter und konstanter Frequenz wirkt der Kondensator als frequenzabhängiger Widerstand X_C. Die Wechselspannung U_M wird in die Spannung U_C über dem Kondensator und in die vom Messwerk angezeigte Spannung U' geteilt. Da auch im Wechselstromkreis das Gesetz der Spannungsteilung gilt, verhalten sich

$$\frac{R_M}{X_C} = \frac{U'}{U_C} \qquad U_C = \sqrt{U_M^2 - U'^2}$$

Beachte: Geometrische Differenz durch die unterschiedliche Phasenlage beider Spannungen

$$X_C = \frac{1}{2\pi f \cdot C_x}$$

$$R_M \cdot 2\pi f \cdot C_x = \frac{U'}{\sqrt{U_M^2 - U'^2}},$$

dem Anzeigewert U' zuzuordnender Kapazitätswert

$$C_x = \frac{1}{R_M \cdot 2\pi f} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{U_M}{U'}\right)^2 - 1}} \qquad (9)$$

Mit der Gleichung (9) kann die Volt-Skale in eine Farad-Skale kalibriert werden, wenn die Messwerkdaten R_M und U_M sowie die Frequenz f der angelegten Wechselspannung gegeben sind.
Wie bei dem Reihen-Widerstandsmesser ist vor jedem Messvorgang einzumessen. Die Skale ist ebenfalls nichtlinear geteilt. Der Nullpunkt ($C_x = 0$) befindet sich links. Bei Zeigerendausschlag geht der Kapazitätswert $C_x \rightarrow \infty$. Diese für einfache Betriebsmessungen gut geeignete Schaltung wird häufig in Vielfachmessgeräten verwendet.
Um Größenvorstellungen zu erhalten, sind in Tafel ❶ die nach den Gleichungen (7), (8), (9) berechneten Spannungs-, Widerstrands- und Kapazitätswerte zusammengestellt, die den Skalenteilen der im Bild ❸ gegebenen µA-Skale zuzuordnen sind.

Fazit

Analoge Messgeräte können nicht nur die elektrische Größe anzeigen, auf der das Wirkprinzip des Messwerkes beruht (meist ist dies die Stromstärke). Auch solche Größen können gemessen werden, die gesetzmäßig mit ihr verbunden sind. Mit dem ohmschen Gesetz und den kirchhoffschen Gesetzen der Parallel- und Reihenschaltung können Spannungs-, Widerstands- und Kapazitätswerte als Skalenangaben berechnet werden.

H. Spanneberg