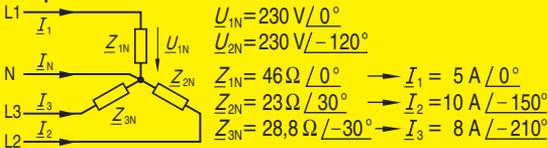
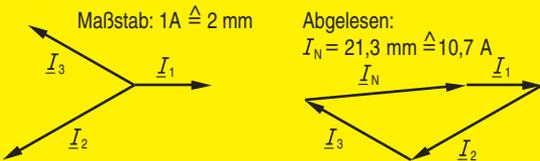


7.4 Unsymmetrische Belastung

Beispiel:



Zeigerdiagramm

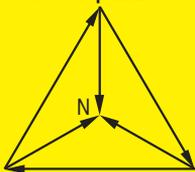


Komplexe Rechnung

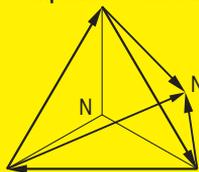
$$\begin{aligned} \underline{I}_N &= -(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3) = -5 \text{ A} / 0^\circ - 10 \text{ A} / -150^\circ - 8 \text{ A} / -210^\circ \\ &= (-5 + 8,66 + 6,93) \text{ A} + j(0 + 5 - 4) \text{ A} = 10,59 \text{ A} + j \cdot 1 \text{ A} \\ &= 10,64 \text{ A} / 5,4^\circ \end{aligned}$$

- Der N-Leiter-Strom kann grafisch mittels Zeigerbild oder durch komplexe Rechnung bestimmt werden

Fester Sternpunkt

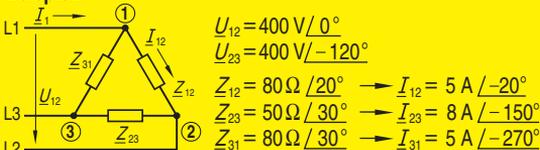


Sternpunktverschiebung

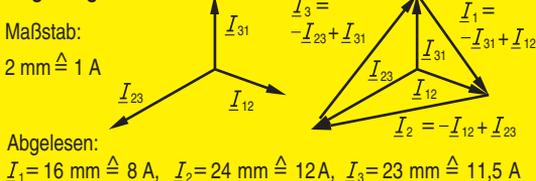


- Unsymmetrische Belastung einer Sternschaltung ohne N-Leiter führt zu einer Sternpunktverschiebung

Beispiel:



Zeigerdiagramm



Komplexe Rechnung

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= -\underline{I}_{31} + \underline{I}_{12} = -5 \text{ A} / -270^\circ + 5 \text{ A} / -20^\circ = \dots = 8,18 \text{ A} / -55^\circ \\ \underline{I}_2 &= -\underline{I}_{12} + \underline{I}_{23} = -5 \text{ A} / -20^\circ + 8 \text{ A} / -150^\circ = \dots = 11,83 \text{ A} / -169^\circ \\ \underline{I}_3 &= -\underline{I}_{23} + \underline{I}_{31} = -8 \text{ A} / -150^\circ + 5 \text{ A} / -270^\circ = \dots = 11,34 \text{ A} / 52,5^\circ \end{aligned}$$

- Die Leiterströme können grafisch mittels Zeigerdiagramm oder durch komplexe Rechnung bestimmt werden

Sternschaltung mit N-Leiter

Wird eine Sternschaltung mit N-Leiter unsymmetrisch belastet, so sind die drei Strangströme unterschiedlich, d. h. die Summe der drei Strangströme ist ungleich null. Als Folge davon fließt ein Ausgleichsstrom über den N-Leiter. Laut Knotenregel gilt: $\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 + \underline{I}_N = 0$.

Die Berechnung der Strang- bzw. Leiterströme ist einfach, da wegen des angeschlossenen N-Leiters die Strangspannungen auch bei unsymmetrischer Last ein symmetrisches System bilden. Der N-Leiter-Strom \underline{I}_N kann auf zwei Arten bestimmt werden:

1. Zeichnerisch:

Die Strangströme werden nach Betrag und Phasenlage berechnet und in ein maßstäbliches Zeigerdiagramm eingezeichnet. Der N-Leiter-Strom ist dann durch den Zeiger gekennzeichnet, der den Polygonzug schließt (Knotenregel: $\sum \underline{I} = 0$).

2. Komplex:

Die Strangströme werden komplex berechnet. Mit der nach \underline{I}_N umgeformten Knotenregel $\underline{I}_N = -(\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3)$ wird dann der N-Leiter-Strom komplex berechnet.

Sternschaltung ohne N-Leiter

Wird eine Sternschaltung ohne N-Leiter betrieben, so lassen sich die Strangströme bei unsymmetrischer Belastung nicht mehr mit einfachen mathematischen Hilfsmitteln berechnen. Durch die Unsymmetrie ändern sich die Strangspannungen, was zu einer sogenannten Sternpunktverschiebung führt. Die dabei auftretende Sternpunktspannung kann in der Größenordnung der Leiterspannung liegen.

Möglichkeiten zur Berechnung siehe Kapitel 7.5.

Dreieckschaltung

Die Strangströme können aus den Strangspannungen und den zugehörigen Widerständen berechnet werden, weil die Strangspannungen auch bei unsymmetrischer Last dem Betrag nach immer gleich sind.

Die drei Leiterströme sind bei unsymmetrischer Last verschieden groß; sie setzen sich jeweils aus zwei komplexen Strangströmen zusammen. Die Bestimmung der Leiterströme kann auf zwei Arten erfolgen:

1. Zeichnerisch:

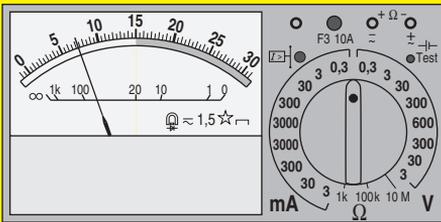
Die Strangströme werden nach Betrag und Phasenlage berechnet und in ein maßstäbliches Zeigerdiagramm in Sternform eingezeichnet. Die Leiterströme erhält man, indem man für alle drei Knoten die beiden Zeiger der zufließenden Strangströme entsprechend der Knotenregel addiert.

2. Komplex

Die Strangströme werden komplex berechnet. Mit Hilfe der Knotenregel werden dann die drei Leiterströme komplex berechnet. Für Knoten 1 gilt zum Beispiel:

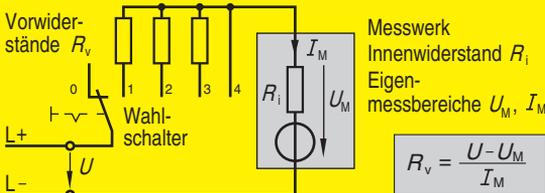
$$\underline{I}_1 - \underline{I}_{12} + \underline{I}_{31} = 0. \text{ Daraus folgt: } \underline{I}_1 = +\underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}.$$

8.7 Spannungs- und Strommessung I



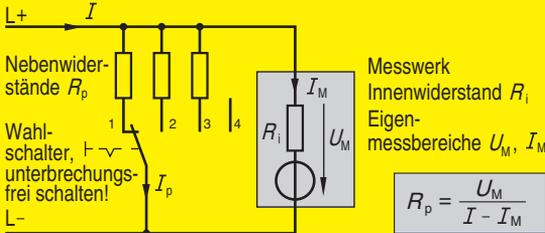
- **Vielfachmessgeräte haben Schaltungen zur Messbereichserweiterung und zur Gleichrichtung von Wechselgrößen**

Vorwiderstände, Prinzipschaltung



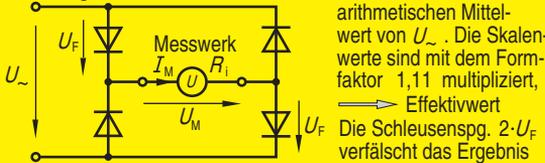
- **Der Spannungsmessbereich von Drehspulmesswerken wird durch Vorwiderstände erweitert**

Nebenwiderstände, Prinzipschaltung

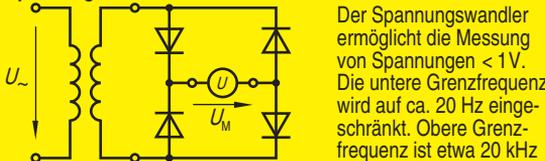


- **Der Strommessbereich von Drehspulmesswerken wird durch Nebenwiderstände (Shunts) erweitert**

Brückengleichrichter B2



Spannungswandler



- **Wechselspannungen müssen zum Messen mit einem Drehspulmesswerk gleichgerichtet werden; die Skalen der Wechselstrommessgeräte sind in Effektivwerten geeicht**

Analoge Vielfachmessgeräte

Analog anzeigende Vielfachmessgeräte enthalten üblicherweise ein Drehspulmesswerk als Messumformer. Da Drehspulmesswerke einen sehr kleinen Eigenmessbereich haben, z. B. 3mV Spannungs- und 0,1mA Strommessbereich, müssen größere Spannungen und Ströme durch eine Zusatzbeschaltung vom Messwerk ferngehalten werden. Mit Drehspulmesswerken lassen sich nur Gleichströme bzw. Gleichspannungen messen. Sollen Wechselgrößen gemessen werden, so müssen diese zuerst gleichgerichtet werden.

Erweiterung des Spannungsmessbereichs

Die Erweiterung des Spannungsmessbereichs erfolgt bei Drehspulmesswerken über Vorwiderstände; am Innenwiderstand R_i des Messwerks selbst liegt dann maximal die für den Vollausschlag nötige Spannung U_M , die Restspannung liegt an den Vorwiderständen. Statt des Nennmessstromes I_M (Strom bei Vollausschlag) wird häufig der sogenannte „Ohm-pro-Volt-Wert“ angegeben; er ist gleich dem Kehrwert von I_M . Die Berechnung der Vorwiderstände erfolgt über das ohmsche Gesetz und die Maschenregel.

Erweiterung des Strommessbereichs

Die Erweiterung des Strommessbereichs erfolgt bei Drehspulmesswerken über Nebenwiderstände (Parallelwiderstände, Shunts); über den Innenwiderstand R_i des Messwerks fließt dann maximal der für den Vollausschlag nötige Strom I_M , der Reststrom fließt über die Nebenwiderstände am Messwerk vorbei. Nebenwiderstände für Messbereiche bis 10A sind meist in das Messgerät eingebaut. Für größere Ströme werden separate, sehr niederohmige Widerstände eingesetzt. Die Berechnung der Nebenwiderstände erfolgt über das ohmsche Gesetz und die Knotenregel.

Messung von Wechselspannung

Drehspulmesswerke messen den arithmetischen Mittelwert, bei einer reinen Wechselgröße zeigt das Messwerk keinen Ausschlag. Zum Messen muss daher die Wechselspannung zunächst gleichgerichtet werden; dies geschieht meist durch eine Zweipuls-Brückenschaltung (B2). Nachteilig wirkt sich die Schwellspannung der Dioden aus (Ge 0,2V...0,3V, Si 0,6V...0,7V); sie führt bei kleinen Messwerten zu einer nichtlinearen Skale. Um auch Spannungen unter 1V hinreichend genau messen zu können, wird die Messgröße durch einen Spannungswandler hochtransformiert. Drehspulmesswerke mit Gleichrichter zeigen im Prinzip den Gleichrichtwert an, die Skalen werden jedoch in Effektivwerten geeicht. Der Messwert wird dazu mit dem Formfaktor 1,11 multipliziert. Die Eichung gilt nur für reine Sinusspannungen.

Schaltungen zur Messbereichserweiterung

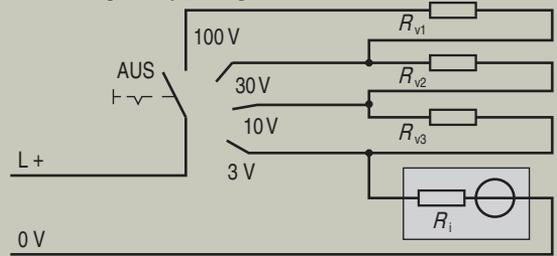
Wie schon gezeigt wurde, lässt sich der Spannungsmessbereich eines Drehspulmesswerks immer durch Vorwiderstände, der Strommessbereich hingegen durch Nebenwiderstände erweitern. In der Praxis wird aber nicht für jeden Messbereich ein eigener Widerstand eingesetzt, vielmehr werden Vor- und Nebenwiderstände miteinander kombiniert. Die nebenstehende Skizze zeigt die übliche Grundschialtung für einen Mehrbereichs-Spannungsmesser.

Für einen Mehrbereichs-Strommesser wird die sogenannte Ringschaltung eingesetzt. Sie hat gegenüber dem einfachen Parallelschalten von mehreren Nebenwiderständen zwei entscheidende Vorteile:

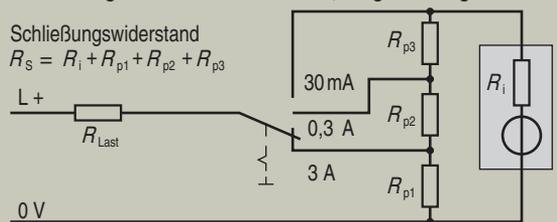
1. Der Übergangswiderstand des Wahlschalters $R_{\bar{U}}$ begrenzt zwar ganz unwesentlich den Stromfluss, er geht aber nicht als Fehler in das Messergebnis ein.
2. Der Wahlschalter muss nicht unterbrechungsfrei umschalten. Bei der einfachen Parallelschaltung kann das Unterbrechen des Parallelzweiges zur Überlastung und Zerstörung des Messwerkes führen.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass das Dämpfungsverhalten des Messwerkes bei jedem Messbereich gleich ist. Der Grund liegt in der Tatsache, dass die Zeitkon-

Erweiterung des Spannungsmessbereichs



Erweiterung des Strommessbereichs, Ringschaltung

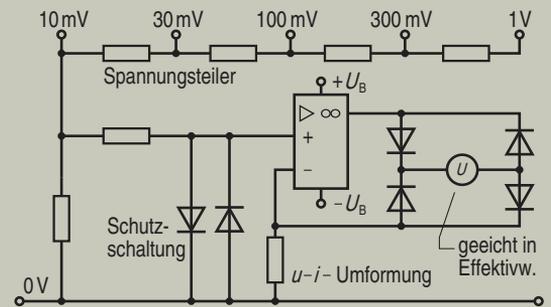


stante $\tau = L_M / R_S$ bei jedem Messbereich gleich ist. L_M ist dabei die Induktivität der Drehspule, R_S der sogenannte Schließungswiderstand mit $R_S = R_i + R_{p1} + R_{p2} + R_{p3}$.

Messung von kleinen Wechselspannungen

Drehspulmesswerke eignen sich zur Messung von Wechselspannungen nur dann, wenn diese vorher gleichgerichtet wurden. Bei größeren Spannungen z. B. $U > 10V$ funktioniert das problemlos, bei Spannungen $U < 1V$ bereitet die Schleusenspannung der Dioden erhebliche Probleme. Dieser störende Einfluss lässt sich eliminieren, wenn die Gleichrichterbrücke aus einer Stromquelle gespeist wird, die einen zur Messspannung proportionalen Strom liefert. Die Realisierung erfolgt z. B. mit Hilfe eines Operationsverstärkers gemäß nebenstehender Schaltung.

Bei Wechselspannungsmessern mit stromgespeisten Gleichrichtern geht die Schleusenspannung der Dioden nicht in die Messung ein, Messbereiche bis 1 mV sind



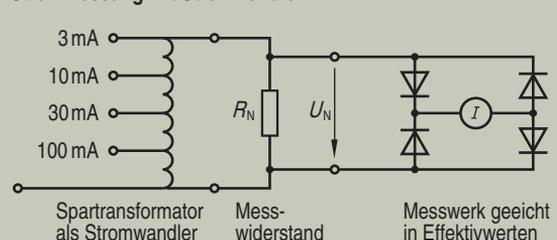
realisierbar, die Skale verläuft in allen Bereichen linear. Das Messgerät benötigt allerdings eine Batterie zur Speisung des Operationsverstärkers.

Messung von Wechselströmen

Vielfachmessgeräte mit Gleichrichter eignen sich in erster Linie zur Spannungsmessung. Ströme können indirekt gemessen werden, wenn der Messstrom über einen niederohmigen Messwiderstand geleitet und die am Widerstand entstehende Spannung abgegriffen wird. Eine Messbereichserweiterung kann durch das Umschalten der Messwiderstände erreicht werden.

Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz eines Stromwandlers, der als Spartransformator ausgeführt sein kann. Der Messwiderstand bleibt in diesem Fall konstant, die Bereichswahl erfolgt über die verschiedenen Anzapfungen des Transformators.

Strommessung mit Stromwandler



Die Schwellenspannung der Dioden beeinflusst das Messergebnis, insbesondere bei kleinen Messspannungen.