

Leistungsmessung im Drehstromnetz

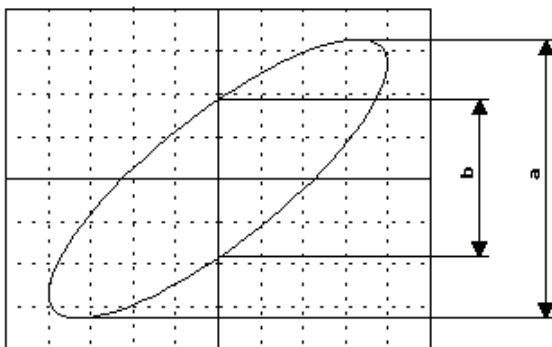
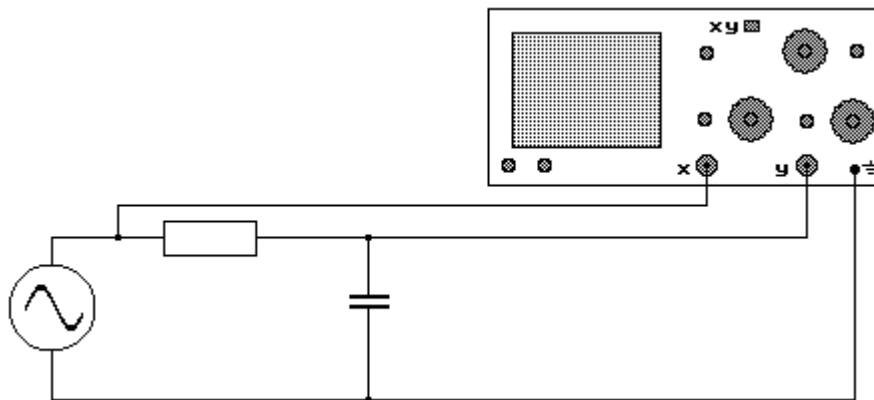
Normalerweise ist es kein allzu grosses Problem, die Leistung im Gleichstromkreis zu messen. Im Wechselstromkreis und insbesondere in Mehrphasensystemen wird die Messung schon etwas anspruchsvoller.

1. Einphasensysteme

Bei der Leistungsmessung in einphasigen Systemen gilt für die Wirkleistung

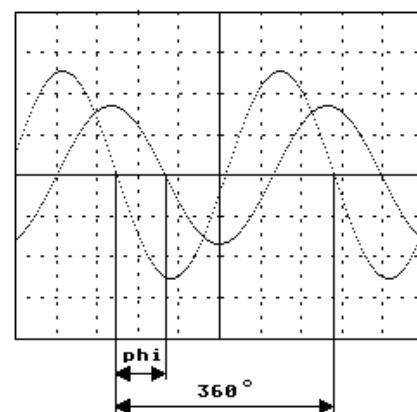
$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

mit φ als Phasenwinkel (Phasenverschiebung) zwischen Strom und Spannung. Für U und I sind die Effektivwerte einzusetzen (siehe Übung Effektivwert). Der Phasenwinkel kann z.B. mit dem KO mit Hilfe der Lissajous-Figuren oder im Zweikanalbetrieb aus der Zeitdifferenz herausgelesen werden.



$$\varphi = \pm \arcsin(b/a)$$

Phasenmessung mit Lissajous-Figur im x-y-Betrieb

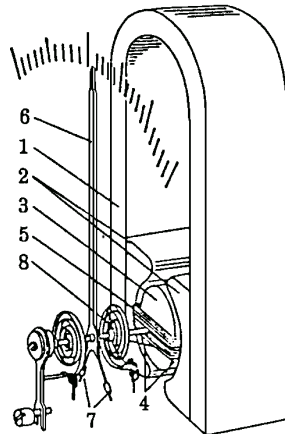


Phasenmessung im Zweikanalbetrieb

2. Das Wattmeter

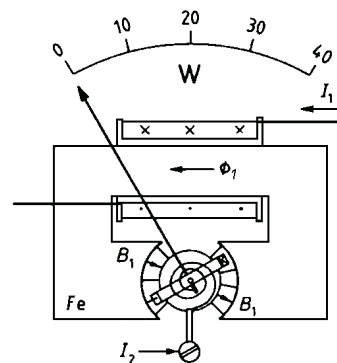
In der Energietechnik wird oft das sogenannte Wattmeter zur Leistungsmessung verwendet. Dieses Gerät zeigt, geeignet beschaltet, die Wirkleistung an.

Im Gegensatz zum Drehspulinstrument finden wir beim Wattmeter keinen Permanentmagneten. Statt dessen erzeugt der Messstrom in einer Spule den nötigen magnetischen Fluss, um die Drehspule, die von einem Strom proportional zur Spannung durchflossen wird, auszulenken.



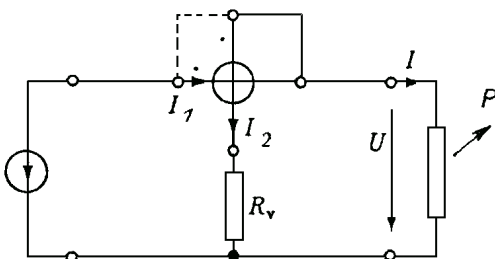
- 1 : Hufeisen-Permanentmagnet
- 2 : Weicheisenpolschuhe
- 3 : Weicheisenpolkern
- 4 : Luftspalt
- 5 : Drehspule
- 6 : Zeiger
- 7 : Ausgleichgewichte
- 8 : Rückstellfedern

Aufbau des Drehspulmesswerkes



- I_1 : Strom durch die Feldspule
- I_2 : Strom durch die Drehspule
- B_1 : magn. Flussdichte im Luftspalt (proportional zu I_1)

elektrodynamisches Messwerk



Zur Leistungsmessung werden die beiden Spulen wie folgt angeschlossen:

- I_1 : Strom in der Feldspule (Strompfad)
- I_2 : Strom durch die Drehspule (Spannungspfad)

Der Spannungspfad des Wattmeters kann normalerweise so beschaltet werden, dass die Messung 'stromrichtig' resp. 'spannungsrichtig' erfolgt.

Beachte:

Wenn in der Formel zur Berechnung der Wirkleistung

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

ein Faktor null ist, dann erfolgt kein Ausschlag! Dies darf auf keinen Fall dazu verleiten, kleinere Bereiche zu wählen, weil sonst die entsprechenden Spulen überlastet werden. Deshalb empfiehlt es sich, dem Wattmeter ein Ampèremeter in Serie zu schalten.

Dass das Wattmeter die Wirkleistung anzeigt, kann durch folgende Überlegung überprüft werden:

Es seien $I_1 = I_p \sin(\omega t)$
 $I_2 = k U_p \sin(\omega t + \varphi)$ k : Proportionalitätskonstante

Das Drehmoment M , zu welchem der Zeigerausschlag proportional ist, ergibt sich zu

$$M(t) = k_1 I_1 I_2$$

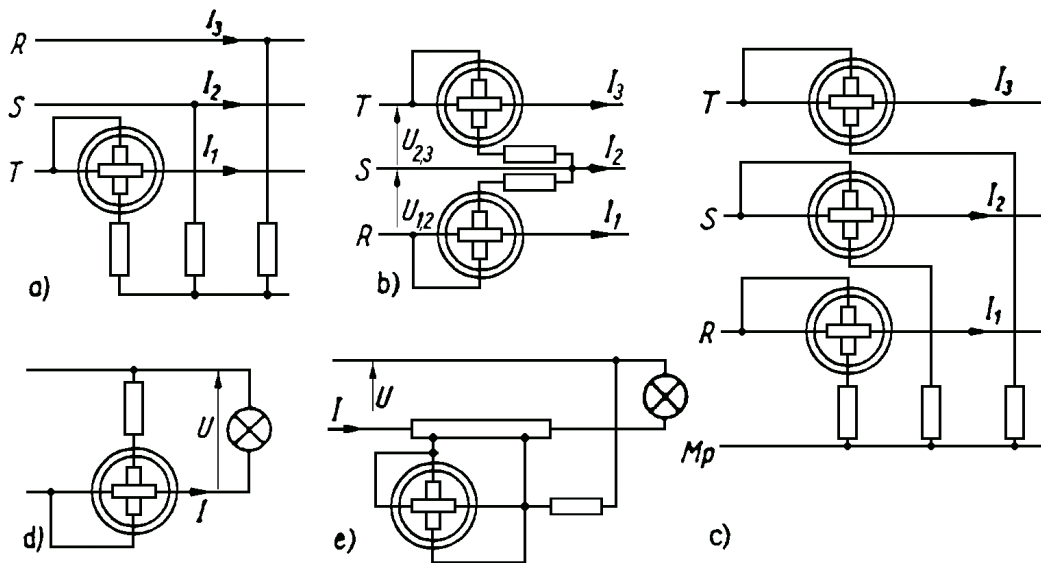
Wegen der mechanischen Trägheit, stellt sich der Zeiger auf den Mittelwert des Drehmomentes ein

$$M_{\text{med}} = 1/T \int M(t) dt = \dots = k_3 U_{\text{EFF}} I_{\text{EFF}} \cos(\varphi)$$

3. Leistungsmessung im Dreiphasensystem

Wenn alle drei Phasen gleich belastet sind, dann genügt es, mit einem Wattmeter die Wirkleistung in einer Phase zu messen. Die Gesamtleistung ist dann mit drei zu multiplizieren.

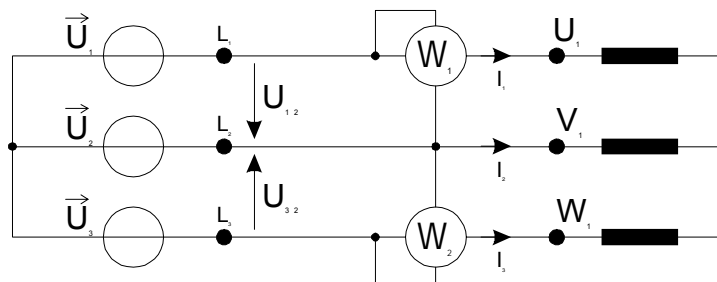
Für die übrigen Fälle gibt es eine Reihe gebräuchlicher Schaltungen (die eingezeichneten Widerstände sind im Spannungspfad der Wattmeter bereits eingebaut. Bei der Schaltung a) müssten allerdings für die zwei Phasen ohne Wattmeter noch Widerstände zugeschaltet werden):



Schaltungen zur Wirkleistungsmessung im Dreiphasennetz

- a) Drehstrom ohne Nulleiter (gleiche Belastung aller drei Phasen)
- b) Drehstrom ohne Nulleiter (ungleiche Belastung); Aron-Schaltung
- c) Drehstrom mit Nulleiter
- d) Wechselstrom
- e) Gleichstrom mit Nebenschluss

4. Aron-Schaltung



Wenn wir die Spannungen U_i und die Ströme I_i als Vektoren betrachten, dann kann die Wirkleistung P_i als Skalarprodukt von U_i und I_i ausgedrückt werden:

$$P_i = \vec{U}_i \cdot \vec{I}_i = |\vec{U}_i| \cdot |\vec{I}_i| \cdot \cos(\varphi_i)$$

Die gesamte im System verbrauchte Wirkleistung ergibt sich demnach aus

$$P = \sum P_i = \vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1 + \vec{U}_2 \cdot \vec{I}_2 + \vec{U}_3 \cdot \vec{I}_3$$

Mit der Aron-Schaltung kann, in Systemen ohne Nullleiter, die Wirkleistung mit Hilfe zweier Wattmeter gemessen werden.

$$P = (\vec{U}_1 - \vec{U}_2) \cdot \vec{I}_1 + (\vec{U}_3 - \vec{U}_2) \cdot \vec{I}_3 = \vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1 - \vec{U}_2 \cdot \vec{I}_1 + \vec{U}_3 \cdot \vec{I}_3 - \vec{U}_2 \cdot \vec{I}_3$$

Mit Hilfe des kirchhofschen Knotengesetzes $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 = 0$ kann der Ausdruck weiter umgeformt werden, indem \vec{I}_3 teilweise durch $-(\vec{I}_1 + \vec{I}_2)$ substituiert wird.

$$P = \vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1 - \vec{U}_2 \cdot \vec{I}_1 + \vec{U}_3 \cdot \vec{I}_3 + \vec{U}_2 \cdot (\vec{I}_1 + \vec{I}_2) = \vec{U}_1 \cdot \vec{I}_1 + \vec{U}_2 \cdot \vec{I}_2 + \vec{U}_3 \cdot \vec{I}_3$$

Mit der Aronschaltung wird also immer – auch bei asymmetrischen Belastungen – die wahre Wirkleistung des Systems gemessen. Sie ergibt sich aus der Summe der Anzeigen der beiden Wattmeter.

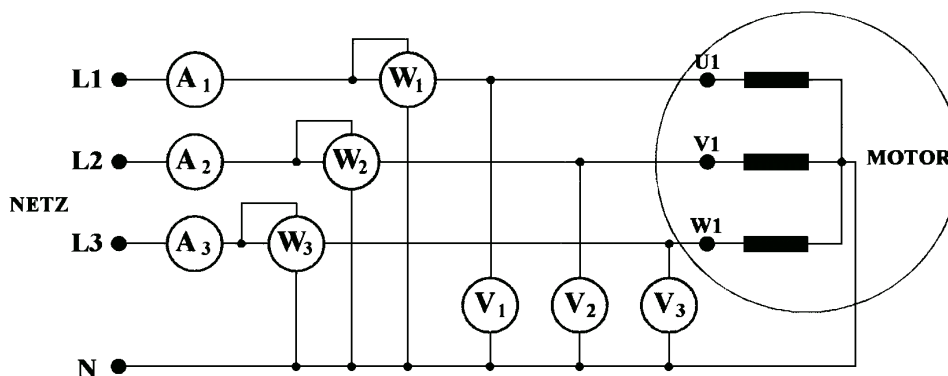
Achtung! Die Schaltung arbeitet nur für Systeme ohne Nullleiter korrekt.

Material-Liste

- 3x380V Anschluss- Box
- Motor mit Alternator
- Steckeradapter
- 6 Multimeter Siemens VA_{eff} Multizet
- 3 Wattmeter
- DC-Speisung 2A
- Stromsonde Tektronix
- Drehzahlmesser
- Maxon-Motor

Aufgaben

1. Messen Sie mit folgender Schaltung die Leistungsaufnahme eines Drehstrommotors:



Um Fehlmessungen durch Vibrationen zu vermeiden, sollten die Instrumente nicht auf dem selben Tisch stehen wie der Motor.

Wattmeter auf **240 V- und 1A- Bereich** einstellen!

Bestimmen Sie mit Hilfe der Volt-, Ampère- und Wattmeter die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung.

2. Mit einem Speicher-KO und einer Stromsonde ist der Einschaltstrom des Motors aufzuzeichnen (eine Phase).

Der Ausgang der Stromsonde muss mit 50Ω abgeschlossen werden. Die Empfindlichkeit des KO's ist auf 10 mV/DIV einzustellen. Der Höhe des Stromes ergibt sich aus dem angezeigten Wert am Steuergerät der Stromsonde und der Anzahl Skalenteile auf dem KO-Schirm.

Messen Sie gleichzeitig mit dem Einschaltstrom auch die Drehzahl in Funktion der Zeit mit einem Tachogenerator, der auf der Rückseite des Motors auf die Welle gedrückt wird.

3. Mit der Stromsonde und einer 100:1 Sonde an einer Phase (Masse **nicht** verbinden) kann die Phasenverschiebung ebenfalls gemessen werden. Vergleichen Sie mit dem unter Punkt 1 gefundenen Wert.

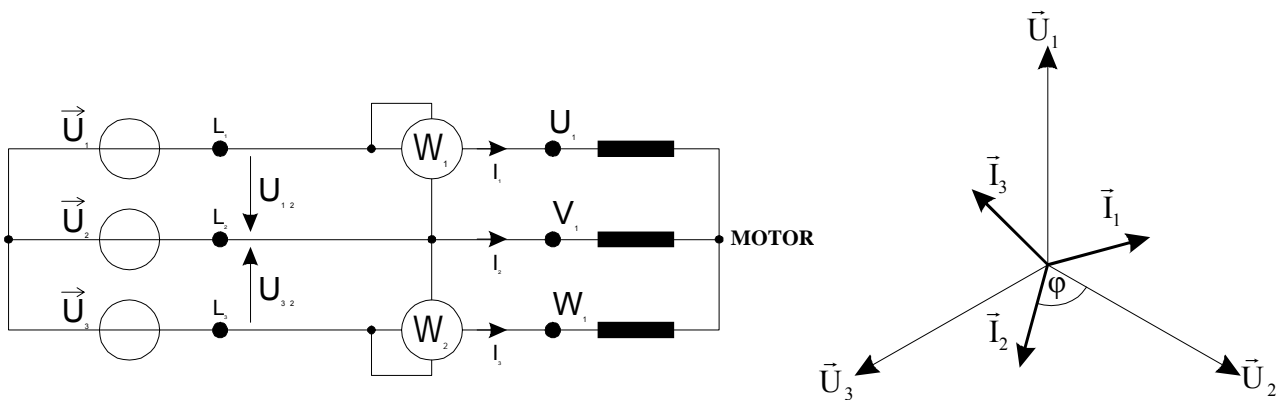
4. Messen Sie die Leistungsaufnahme des Motors mit Hilfe der Aron-schaltung und vergleichen Sie die Werte mit den unter Aufgabe 1 gefundenen Werten!

Beachten Sie, dass im Spannungspfad des Wattmeters **380V** auftritt! Verwenden Sie deshalb zur Messung den 480V - Bereich! Für diesen Bereich gilt:

1A Stromfad	Messwert = Skalenwert * 4
5A Stromfad	Messwert = Skalenwert * 20

Bei dieser Messung darf der Nulleiter nicht mit dem Sternpunkt des Motors verbunden sein.

Beschalten Sie vorerst beide Instrumente genau gleich. Bei der anschliessenden Messung wird möglicherweise eines der beiden Instrumente negativ ausschlagen. In diesem Fall sind die Anschlüsse des Strompfades (oder des Spannungspfad) zu vertauschen, und der abgelesene Wert ist als negative Leistung zu interpretieren.



5. Tragen sie die Ströme und Spannungen welche von den beiden Wattmetern gemessen werden ins Zeigerdiagramm ein. Erklären sie weshalb bei einem der beiden Wattmeter das Vorzeichen wechselt wenn die Phasenverschiebung zurückgeht (z. B. auf 50°).
6. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad des Motor-Generator-Systems bei einigen Belastungen!
7. Messen Sie bei einigen Belastungen die Drehzahl!

15. Mai 1998