1 · 2009

LERNEN und KÖNNEN

ELEKTROPRAKTIKER-Magazin
für die Aus- und Weiterbildung

# Leistungsmessungen im Wechselstromnetz

**Die Ergebnisse von Leistungsmessungen im Wechsel- und Drehstromnetz werden wie in Gleichstromnetzen durch die Beträge von Spannung und Stromstärke bestimmt. Ihre Phasenlage zueinander beeinflusst zusätzlich den Messwert.**

## Mittel zur Messung elektrischer Leistung

Im Gleichstromkreis bestimmen die Spannung $U$ und die Stromstärke $I$ die Leistung:

$P = U \cdot I$.

Bezogen auf die sich periodisch ändernden Größen des Wechselstromkreises heißt das: Nur die zeitgleich auftretenden Augenblickswerte beider Größen ergeben einen Leistungswert. Dieser ist wiederum eine zeitabhängige Größe, als Augenblickswert der Leistung:

$$p = u \cdot i \qquad (1)$$

Im Allgemeinen ist für den Techniker der zeitliche Mittelwert der Leistung bedeutsam. Dieser ist aufgrund einer möglichen Phasenverschiebung zwischen den sinusförmigen Wechselgrößen nicht so ohne weiteres bestimmbar. Als Übersicht ergibt sich der auf S. 2 im Kasten dargestellte Sachverhalt.
In den Gleichungen (2) und (3) sind $U$ und $I$ die Effektivwerte, die quadratischen Mittelwerte von Spannung und Stromstärke. Die als Gesamtleistung anzusehende Scheinleistung

$$S = U \cdot I \qquad (4)$$

[$S$] = VA (Voltampere)

Ist die geometrische Summe von Wirk- und Blindleistung:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad (5).$$

Im eigentlichen Sinn ist sie keine physikalische sondern eine mathematische Größe. Wie die Gleichungen (1) bis (4) zeigen, muss ein Messmittel zur Leistungsbestimmung das Produkt der Größen $U$ und $I$ bilden können. Diese Forderung erfüllt das elektrodynamische Messwerk.

## Elektrodynamisches Messwerk

### Messprinzip

Durch eine dickdrähtige, feststehende Feldspule fließt der Laststrom. In ihrem Magnetfeld, gekennzeichnet durch den Magnetfluss $\Phi$, befindet sich eine dünndrähtige Drehspule, die als Spannungspfad geschaltet ist. Sie wird von einem der Spannung proportionalen Strom $I$ durchflossen. Nach dem elektrodynamischen Kraftgesetz entsteht ein Drehmoment

$$M = c \cdot \Phi \cdot I \qquad (6),$$

dessen Betrag auch von den in der Konstanten $c$ erfassten konstruktiven Faktoren bestimmt wird.
Zur Übertragung des Kraftwirkungsgesetzes auf die Gesetzmäßigkeiten des Wechselstromkreises sind die Größen der Gleichung (6) zu ersetzen:

- $M$ durch $m$, den Augenblickswert des durch die Drehspule entstehenden Drehmomentes,
- $c$ durch $K$, eine im Betrag geänderte Konstruktionskonstante,
- $\Phi$ durch $i$, den Augenblickswert der Stromstärke in der feststehenden Feldspule, da $\Phi = \frac{I \cdot N}{R_m}$, also $I \sim \Phi$ ist und
- $I$ durch $u$, den Augenblickswert, der an der Drehspule anliegenden Spannung, die verhältnisgleich mit dem Augenblickswert der Stromstärke ist.

Die für den Einsatz des elektrodynamischen Messwerks im Wechselstromkreis modifizierte Gleichung (6) lautet dann: Augenblickswert des Drehmomentes

$$M = K \cdot i \cdot u \qquad (7).$$

Auf Grund der Trägheit der Drehspule kann diese sich nur auf den Mittelwert des zeitabhängigen Drehmomentes $m$ einstellen. Wie der Vergleich zu den Liniendiagrammen (siehe Kasten) der Wechselstromleistungen zeigt, die sich ebenfalls aus dem Produkt der Augenblickswerte von Strom und Spannung ergeben, wird der Mittelwert des Drehmomentes entscheidend von der Phasenverschiebung beider Größen beeinflusst. Bei Phasengleichheit $\varphi = 0°$ beträgt der Mittelwert des Drehmomentes die Hälfte seines Scheitelwertes. Bei $\varphi = 90°$ ist er dagegen gleich null und bei einem beliebigen Phasenverschiebungswinkel ist der Mittelwert des Drehmomentes

$$M = K \cdot I \cdot U \cdot \cos\varphi \qquad (8)$$

Das elektrodynamische Messwerk wird als Produktbilder vorzugsweise zur Leistungsmessung benutzt. Im Wechselstromkreis kann direkt nur die Wirkleistung gemessen werden.

## INHALT

Grundwissen Lernfelder 1-5

**Messtechnik**
Leistungsmessungen im Wechselstromnetz ..... 1
**Fachbegriffe**
Was versteht man unter ... ..... 4

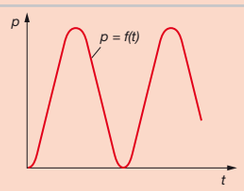
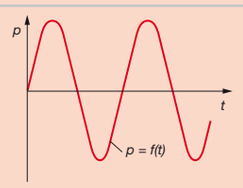
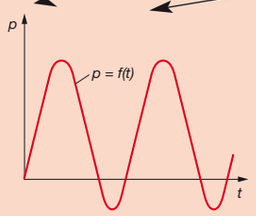
Fachwissen Lernfelder 6-13

**Software**
CrypTool – sichere Kommunikation ..... 6
**Regelungstechnik**
Füllstandsregelung simuliert mit BORIS ..... 8
**Arbeitssicherheit**
Sicherheit bei Arbeiten mit Lichtwellenleitern (3) ..... 11
**WISO**
Wirtschafts-, Sozial- und Gemeinschaftskunde ..... 12
**Fremdsprache**
Technisches Englisch ..... 13

Prüfung Lernfelder 1-13

**Fachtest**
Lernfeld 3 ..... 14
Lernfeld 7 ..... 15
Lösungen ..... 16

## LEISTUNGEN SINUSFÖRMIGER SPANNUNGEN UND STRÖME

| **Phasenwinkel zwischen *u* und *i*** | $\varphi = 0°$ | $\varphi = 90°$ |
|---|---|---|
| **Liniendiagramme der Leistung** |  |  |
| **Merkmale**<br>• **der Leistungswerte** | nur positiv | wechselweise positiv und negativ |
| • **des zeitbezogenen Energieflusses** | Elektrische Leistung tritt als Wirkleistung $P$ aus den Stromkreis aus. | Elektrische Leistung pendelt als Blindleistung $Q$ zwischen Stromquelle und Verbraucher. |
| **Liniendiagramm der Leistung bei $0° < \varphi < 90°$** |  | |
| **Merkmal** | Der positive Anteil der Leistungswerte ist größer als der negative.<br><br>Die Zuleitung zum Verbraucher wird belastet mit<br><br>Wirkleistung und Blindleistung<br><br>$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ (2) $\quad Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$ (3)<br>$[P]$ = W (Watt) $\quad [Q]$ = var (Voltampere reaktiv) | |

### Bauformen

Im Wesentlichen werden zwei Bauformen unterschieden:

**Eisengeschlossenes Messwerk.** Die Feldspule wird von einem Eisenmantel getragen (Bild ❶). So entsteht ein widerstandsfähiges Messwerk mit einem großen Drehmoment. Die Drehspule bewegt sich um einen Eisenkern. Alle Eisenteile sind aus Einzelblechen geschichtet, um die Wirbelstromverluste gering zu halten. Spiralfedern übernehmen die Stromzufuhr zur Drehspule und erzeugen das mechanische Richt- bzw. Rückstellmoment. Die Dämpfung erfolgt überwiegend als Luftkammerdämpfung.

**Eisenloses Messwerk.** Das Messwerk (Bild ❷) enthält, mit Ausnahme der äußeren Schirmung, kein ferromagnetisches Material. Der magnetische Nutzfluss verläuft deshalb nur in Luft. Fehler durch Remanenz, Hysterese oder Wirbelströme können somit nicht entstehen.

### Eigenschaften

Der Skalenverlauf ist bei Leistungsmessung linear, bei möglichen Spannungs- und Stromstärkemessungen dagegen quadratisch.

Für den Einsatz des Messwerks in der Starkstromtechnik werden kaum hohe Anforderungen an die Empfindlichkeit gestellt. Bei eisengeschlossenen Wirkleistungsmessern der Genauigkeitsklasse 1,5 liegt der kleinste Messbereichsendwert bei 100 W. Eisenlose Feinmessinstrumente mit Spannbandlagerung werden bereits mit einem Messbereich von 3 W angeboten.

Der Leistungseigenbedarf beträgt bei dem Strompfad etwa 1 VA und für den Spannungspfad einschließlich Vorwiderstand 1 bis 8 VA (ohne Vorwiderstand etwa 5 mVA).

Als Betriebsmessinstrument ist der Leistungsmesser verhältnismäßig widerstandsfähig gegen elektrische Überlastungen, weil diese vorwiegend durch die Stromstärke verursacht werden können, während die Spannung meist konstant bleibt.

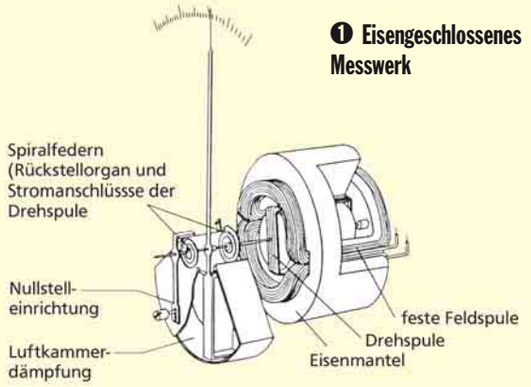
**Tafel ❶ Korrektur des systematischen Fehlers einer Wirkleistungsmessung im AC-Netz**

| Leistungsmesser in | vom Netz abgegebene Leistung | von der Laststelle aufgenommene Leistung |
|---|---|---|
| **stromrichtiger Schaltung** | $P_N = P + P_{St}$ | $P_L = P - P_{St}$ |
| **spannungsrichtiger Schaltung** | $P_N = P + P_{Sp}$ | $P_L = P - P_{Sp}$ |

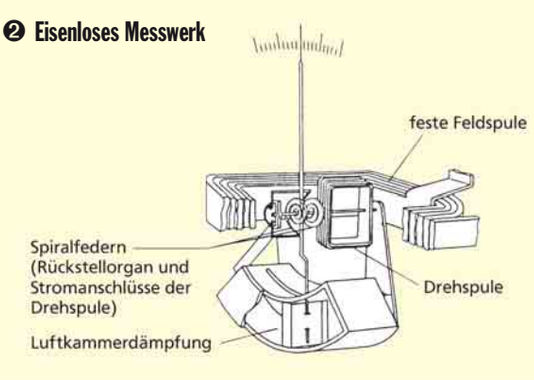
## Wirkleistungs- und Blindleistungsmessung

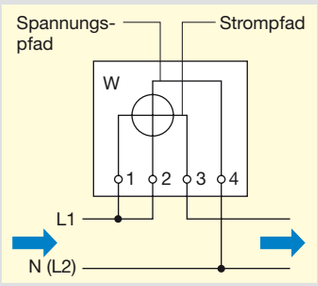
Trotz des Hauptvorteils des elektrodynamischen Messwerks, den Messwert unter Berücksichtigung des Leistungsfaktors

❶ Eisengeschlossenes Messwerk



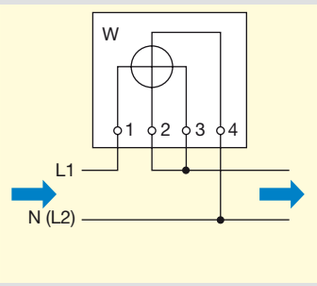

❷ Eisenloses Messwerk

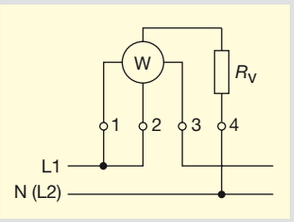




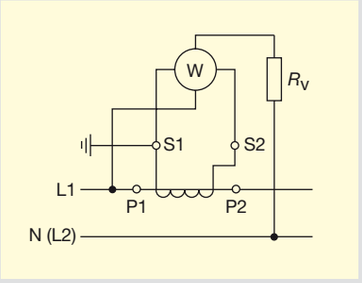

❸ Elektrodynamisches Messwerk in stromrichtiger Schaltung

❹ Elektrodynamisches Messwerk in spannungsrichtiger Schaltung

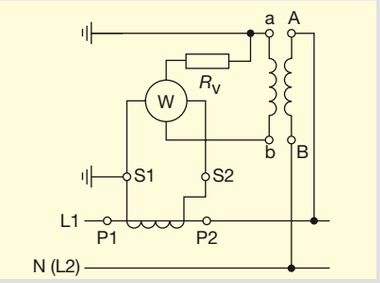


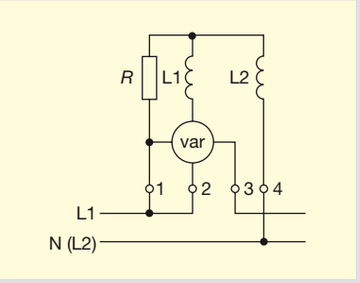

❺ Spannungspfad mit Vorwiderstand




❻ Halbindirekter Anschluss




❼ Indirekter Anschluss




❽ Hummel-Schaltung zur Blindleistungsmessung

cos$\varphi$ direkt anzuzeigen, lässt sich dagegen ein systematischer Fehler nicht vermeiden. Die Ursache besteht darin, dass die Strom- und Spannungspfade wie bei einer Widerstandsbestimmung anzuschließen sind. In Abhängigkeit vom Belastungswiderstand muss hier und dort zwischen der stromrichtigen (Bild ❸) und der spannungsrichtigen Schaltung (Bild ❹) unterschieden werden.

Bei stark schwankenden Leistungen (Stromstärken) ist die stromrichtige Schaltung des Leistungsmessers zu bevorzugen.

Selbstverständlich kann der systematische Fehler nach der Messung korrigiert werden. Das setzt voraus, dass im einfachsten Fall der Leistungseigenbedarf des Spannungs- und Strompfades $P_{Sp}$ bzw. $P_{St}$ bekannt ist (Tafel ❶).
Bei Leistungsmessern werden im Allgemeinen Drehspulen für Spannungen bis 100 V ausgelegt. In den gebräuchlichen Netzen muss bei direktem Anschluss deshalb ein Vorwiderstand $R_v$ in den Spannungspfad geschaltet werden. Unbedingt ist darauf zu achten, dass $R_v$ zwischen der Drehspule und dem Neutralleiter bzw. einem der Außenleiter anliegt, der nicht über den Strompfad geführt wird (Bild ❺). Andernfalls liegt zwischen der Drehspule und der Feldspule die gesamte Betriebsspannung an. Überschläge zwischen beiden Spulen können entstehen.

## Belastungsgrenze des Leistungsmessers

Da das elektrodynamische Messwerk die Wirkleistung direkt anzeigt, ist die natürliche obere Belastungsgrenze des Leistungsmessers keineswegs identisch mit dem Skalenendwert, im Gegensatz zu den meisten anderen analogen Messinstrumenten. Man braucht sich nur den ungünstigsten Fall vorzustellen, nämlich den bei einer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung von 90°. Auch bei beliebig großen Stromstärken entsteht keine Anzeige. Eine thermische Überlastung der Feldspule ist nicht auszuschließen.

Den gesamten Messbereich eines Leistungsmessers möglichst nur bei einem Leistungsfaktors cos$\varphi \geq 0{,}8$ ausnutzen oder die Stromstärke zusätzlich messen.

## Anschlussvarianten

In Abhängigkeit von der Höhe der zu messenden Leistung, bedingt durch die Spannungs- und Stromgrößen, werden drei Anschlussvarianten unterschieden.
**Direkter Anschluss.** Der Strompfad des Leistungsmessers wird direkt in Reihe in den Stromkreis eingefügt. Am Spannungspfad (Drehspule und Vorwiderstand) liegt unmittelbar die Spannung des Stromkreises oder des Netzes an.
**Halbindirekter Anschluss.** Bei größeren Stromstärken wird in das Netz ein Stromwandler geschaltet, in dessen Sekundärkreis der Strompfad des Leistungsmessers liegt (Bild ❻). Der sekundäre Bemessungsstrom beträgt meist 5 A, selten 1 A bzw. 2 A. Die Spannung liegt direkt am Spannungspfad an. Orientierungswerte für diese Anschlussvariante sind Ströme über 10 A und Spannungen bis 1 kV.
**Indirekter Anschluss.** Beide Messpfade des Leistungsmessers sind an die Sekundärwicklungen eines Strom- und Spannungswandlers angeschlossen (Bild ❼). Die sekundären Bemessungswerte der Wandler betragen im Allgemeinen 5 A und 100 V. Der indirekte Anschluss ist grundsätzlich in Hochspannungsanlagen erforderlich, auch wenn nur mit kleinen Strömen zu rechnen ist. Der Stromwandler hat dann die Aufgabe, das Hochspannungspotential des Netzes vom Strompfad des Messgerätes fernzuhalten.

## Blindleistungsmessung

Das elektrodynamische Messwerk kann dann eine Blindleistung messen, wenn der durch den Spannungspfad fließende Strom um 90° gegenüber der Netzspannung in der Phasenlage verschoben ist. In der so genannten Hummel-Schaltung (Bild ❽) lassen sich der ohmsche Widerstand R und die Induktivitäten L1 und L2 einschließlich ihrer Verlustwiderstände so bemessen, dass der Strom in der Drehspule exakt um 90° nacheilt. Die gleiche Phasendrehung kann auch mit einer RC-Kombination erreicht werden.
Durch die Frequenzabhängigkeit der Spulenscheinwiderstände ist die Messung nur

- für bestimmte Frequenzen, meist 50 oder 60 Hz und
- für oberwellenfreie Spannungen, somit nicht für Phasenanschnittsteuerungen, korrekt.

Der Zeigerausschlag ist bei induktiver Last positiv, bei kapazitiver negativ. Um den Betrag dann ablesen zu können, müssen die Anschlüsse des Spannungspfades vertauscht werden.

## Scheinleistungsmessung

Die direkte Messung der Scheinleistung ist mit einem elektrodynamischen Messwerk nicht realisierbar. In einigen Digitalmessgeräten wird durch Gleichrichten der Wechselströme und -spannungen unter Berücksichtigung von Korrekturgrößen eine Scheinleistungsbestimmung ermöglicht.

*H. Spanneberg*