

Hauptfach- und APMB-Versuch

**Messen von  
elektrischer Arbeit  
und Leistung**





---

<b><u>Inhaltsverzeichnis</u></b>	<b>Seite</b>
<b>Formelzeichen und Indizes</b>	<b>2</b>
<b>1. Zweck des Versuchs</b>	<b>3</b>
<b>2. Grundlagen der elektrischen Energie</b>	<b>3</b>
2.1 Drehstrom	5
<b>3. Messen von elektrischen Größen</b>	<b>9</b>
3.1 Leistungs- und Arbeitsmessgeräte	9
3.2 Schaltungen zur Leistungs- und Arbeitsmessung	11
3.3 Leistungs- und Arbeitsmessung im Drehstromnetz	14
<b>4. Zerspannung</b>	<b>17</b>
<b>5. Versuchsmaschinen</b>	<b>19</b>
5.1 Bandsäge	19
5.2 Bügelsäge	19
<b>6. Versuchsdurchführung</b>	<b>20</b>
<b>7. Versuchsauswertung</b>	<b>21</b>
<b>8. Weiterführende Literatur</b>	<b>21</b>

## Formelzeichen und Indizes

$C_p$		Leistungsmesserkonstante
$f$	[Hz]	Frequenz
$F$	[N]	Schnittkraft
$F_S$	[N]	Schnittkraft in Richtung der Schnittbewegung
$F_V$	[N]	Vorschubkraft
$i$	[A]	Momentanwert des Stroms
$\hat{i}$	[A]	Wechselstromamplitude
$I$	[A]	Effektivwert des Stroms, bei Drehstrom Außenleiterstrom
$I_{st}$	[A]	Strangstrom
$k_s$	[N/mm <sup>2</sup> ]	spezifische Schnittkraft
$k_i$		Übersetzungsverhältnis des Stromwandlers
$k_u$		Übersetzungsverhältnis des Spannungswandlers
$M_d$	[Nm]	Drehmoment
$p$	[W]	Momentanwert der Leistung
$P$	[W]	Effektivwert der Wirkleistung
$P_e$	1w]	Leistungsbedarf eines spanabhebenden Prozesses
$P_s$	[W]	Schnittleistung
$P_v$	[W]	Vorschubleistung
$Q$	[VA]	Effektivwert der Blindleistung
$R_A$	[Ohm]	Innenwiderstand des Strommessers
$R_l$	[Ohm]	Widerstand des Strompfads des Leistungsmessers
$R_U$	[Ohm]	Widerstand des Spannungspfad des Leistungsmessers
$R_V$	[Ohm]	Innenwiderstand des Spannungsmessers
$S$	[VA]	Effektivwert der Scheinleistung
$t$	[s]	Zeit
$u$	[V]	Momentanwert der Spannung
$\hat{u}$	[V]	Wechselspannungsamplitude
$U_{LN}$	[V]	Strangspannung
$U_{LL}$	[V]	Außenleiterspannung
$W$	[Wh]	elektrische Wirkarbeit
$W_q$	[VAh]	Blindarbeit
$Z$	[Ohm]	Scheinwiderstand
$\alpha$	[Grad]	Zeigerausschlag
$\varphi$	[Grad]	Phasenverschiebungswinkel
$\phi$	[T]	Magnetfeld
$\psi$	[Grad]	Phasenverschiebung der Magnetfelder

## 1. Zweck des Versuchs

In diesem Versuch sollen die üblichen Messmethoden zur Ermittlung von elektrischer Energie und Leistung erläutert sowie Besonderheiten von elektrischer Energie und Leistung aufgezeigt werden. Weiterhin sollen zwei Sägeverfahren zur Erzeugung der gleichen Energiedienstleistung hinsichtlich ihres Endenergieverbrauchs verglichen werden.

## 2. Grundlagen der elektrischen Energie

Der Momentanwert  $p(t)$  einer elektrischen Leistung, die einem Verbraucher zugeführt wird, ist das Produkt aus Strom und Spannung:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) . \quad (2.1)$$

Bei Gleichstrom sind die Verhältnisse wegen  $u(t) = U$  und  $i(t) = I$  einfach:

$$P = U \cdot I . \quad (2.2)$$

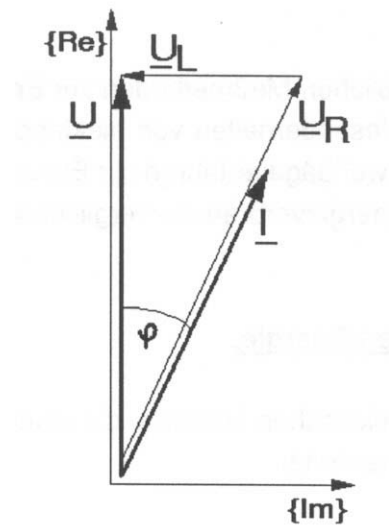
Die Leistung lässt sich dabei aus den gemessenen Größen Strom und Spannung bestimmen. Bei Wechselstrom verlaufen Strom und Spannung sinusförmig:

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin \omega t , \quad (2.3)$$

$$i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega t - \varphi) . \quad (2.4)$$

Wechselstromkreise können mit Hilfe von Strom- und Spannungszeigern beschrieben werden. Dadurch kann außer dem Betrag einer elektrischen Größe auch ihre Phasenlage mit berücksichtigt werden. Zeigergrößen werden durch Unterstreichung gekennzeichnet, z.B.  $\underline{i}$  bzw.  $\underline{u}$ . Die Länge eines Zeigers entspricht dem Effektivwert der Größe, die Addition erfolgt vektoriell. Die Phasenlage wird durch den Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$  ausgedrückt (siehe Bild 2.1). Sie entsteht durch die kapazitiven bzw. induktiven Widerstände, die sich im Stromkreis befinden.

Ein der Spannung nacheilender Strom bedeutet ein induktives Verhalten des Stromkreises, ein vorseilender Strom ein kapazitives Verhalten.



**Bild 2.1:** Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung

Der Momentanwert der Leistung ist dann also das Produkt dieser beiden Sinusfunktionen. Unter Zuhilfenahme der Beziehung

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \quad (2.5)$$

ergibt sich

$$p(t) = \frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] . \quad (2.6)$$

Mit den Effektivwerten  $U$  und  $I$  für Spannung und Strom

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \quad , \quad I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

vereinfacht sich Gl (2.6) zu

$$p(t) = U \cdot I \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] . \quad (2.8)$$

In Energiesystemen sind Momentanwerte meist uninteressant, dagegen sind die Mittelwerte von Bedeutung. In allgemeiner Form lautet der zeitliche Mittelwert der Leistung:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi . \quad (2.9)$$

$P$  ist die an einem Verbraucher tatsächlich umgesetzte Leistung, die sogenannte Wirkleistung. Daneben sind noch zwei weitere Leistungen definiert, die Scheinleistung  $S$  und die Blindleistung  $Q$ :

$$S = U \cdot I , \quad (2.10)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi . \quad (2.11)$$

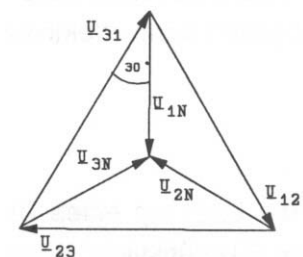
Die elektrische Arbeit, die ein Verbraucher aufnimmt, ist das Integral der Leistung über der Zeit. Hierbei wird wiederum unterschieden zwischen Wirkarbeit  $W$  und Blindarbeit  $W_q$ :

$$W = \int p(t) dt , \quad W_q = \int q(t) dt . \quad (2.12)$$

## 2.1 Drehstrom

Unter Drehstrom versteht man ein System von drei sinusförmigen Wechselspannungen mit gleicher Frequenz, die zeitlich jeweils um  $120^\circ$  phasenverschoben sind. Ein Vierleiter-Drehstromnetz wie in Bild 2.3 besteht aus den drei stromführenden Phasen L1, L2 und L3 sowie aus dem Neutralleiter. Die Spannungsgrößen, die von den Stromphasen zum Neutralleiter abgegriffen werden können, sind mit  $\underline{U}_{1N}$ ,  $\underline{U}_{2N}$  und  $\underline{U}_{3N}$  bezeichnet. Man nennt sie die *Strangspannungen*. Daneben treten in einem Drehstromnetz drei weitere Spannungsgrößen, nämlich die

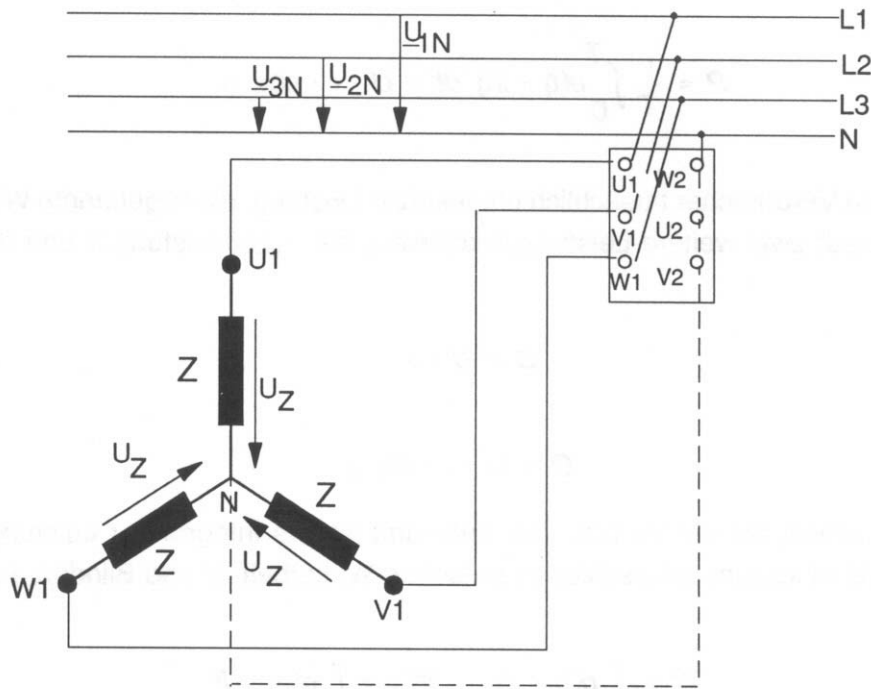
*Außenleiterspannungen*  $\underline{U}_{12}$ ,  $\underline{U}_{23}$  und  $\underline{U}_{31}$  auf (siehe Bild 2.4). Sie sind jeweils zwischen den drei stromführenden Phasen abzugreifen. Betrachtet man das Zeigerdiagramm der Spannungen in Bild 2.2, dann erkennt man, in welcher Beziehung die Strang- und die Außenleiterspannungen zueinander stehen. Geht man davon aus, dass die Strang-



**Bild 2.2:** Strang- und Außenleiterspannungen

spannungen gleich groß sind und den Effektivwert  $U_{LN}$  besitzen und dass auch die Außenleiterspannungen identisch sind und den Effektivwert  $U_{LL}$  gemeinsam haben, dann gilt folgender Zusammenhang:

$$U_{LL} = U_{LN} \cdot \sqrt{3} . \quad (2.13)$$



**Bild 2.3:** Sternschaltung eines Drehstromverbrauchers

Verbraucher, die an ein Drehstromnetz angeschlossen werden, können in Sternform oder in Dreiecksform geschaltet werden. Bild 2.3 zeigt die *Sternschaltung* von drei gleichen komplexen Widerständen  $Z$ . Es liegt also eine symmetrische Belastung des Netzes vor. Über den Widerständen fällt jeweils die Spannung  $U_Z$  ab. Aus dem Schaltbild geht hervor, dass dieser Wert gleich dem Effektivwert der Strangspannungen des Leiternetzes sein muss:

$$U_Z = U_{LN} . \quad (2.14)$$

Um die Leistung eines Drehstromverbrauchers in Sternschaltung zu bestimmen, muss der Faktor 3 berücksichtigt werden:

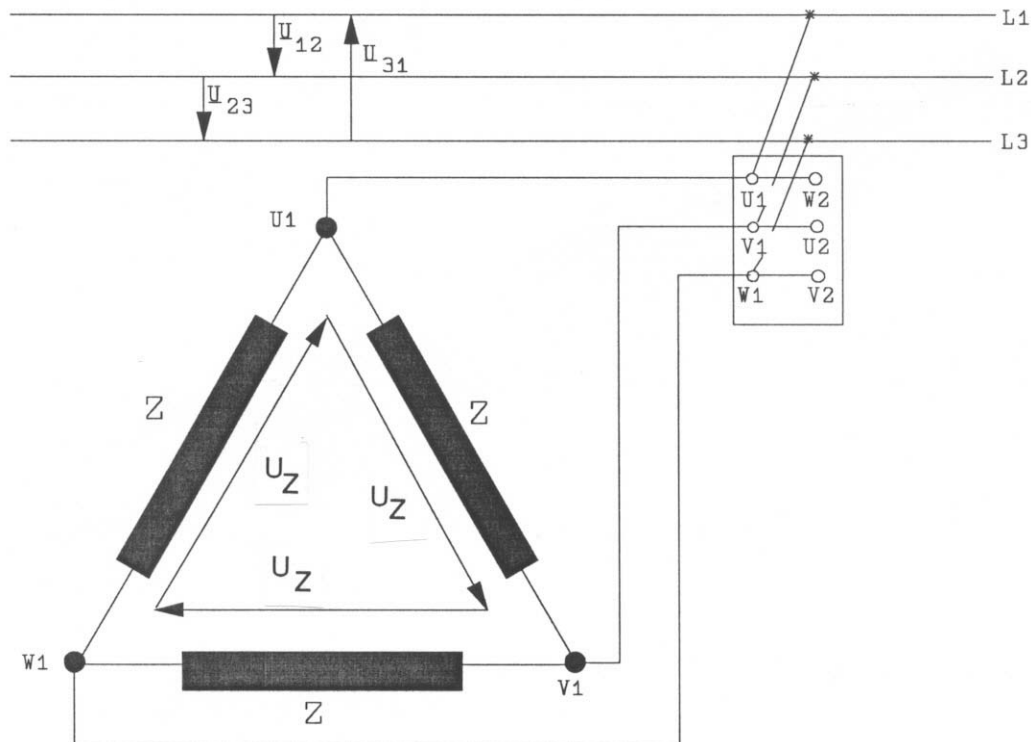
$$P_{\text{Stern}} = 3 \cdot U_Z \cdot I_Z \cdot \cos \varphi \quad (2.15)$$

Mit dem Verhältnis von Strangspannung zu Außenleiterspannung nach Gl. 2.13 und mit Gl. 2.14 erhält man

$$P_{\text{Stern}} = \frac{U_{\text{LL}}^2}{Z} \cdot \cos \varphi \quad (2.16)$$

Bei einer *Dreieckschaltung*, wie sie in Bild 2.4 dargestellt ist, liegen andere Verhältnisse vor. Dort gilt, dass die Spannung, die über den drei Widerständen  $Z$  abfällt, gleich dem Effektivwert der Außenleiterspannung des Drehstromnetzes ist:

$$U_Z = U_{\text{LL}} \quad (2.17)$$



**Bild 2.4:** Dreieckschaltung eines Drehstromverbrauchers

Für die Leistung eines Drehstromverbrauchers in Dreieckschaltung gilt ebenfalls

$$P_{\text{Dreieck}} = 3 \cdot U_Z \cdot I_Z \cdot \cos \varphi \quad (2.18)$$

Setzt man für  $U_Z$  und  $I_Z$  die entsprechenden Werte ein, dann errechnet sich die Leistung wie folgt:

$$P_{\text{Dreieck}} = 3 \cdot \frac{U_{LL}^2}{Z} \cdot \cos \varphi \quad (2.19)$$

Ein Vergleich der beiden Lösungsvarianten zeigt, dass die Drehstromleistung bei Verbrauchern in Dreieckschaltung um das Dreifache größer ist als die bei Sternschaltung:

$$\frac{P_{\text{Stern}}}{P_{\text{Dreieck}}} = \frac{1}{3} \quad (2.20)$$

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse zusammengestellt:

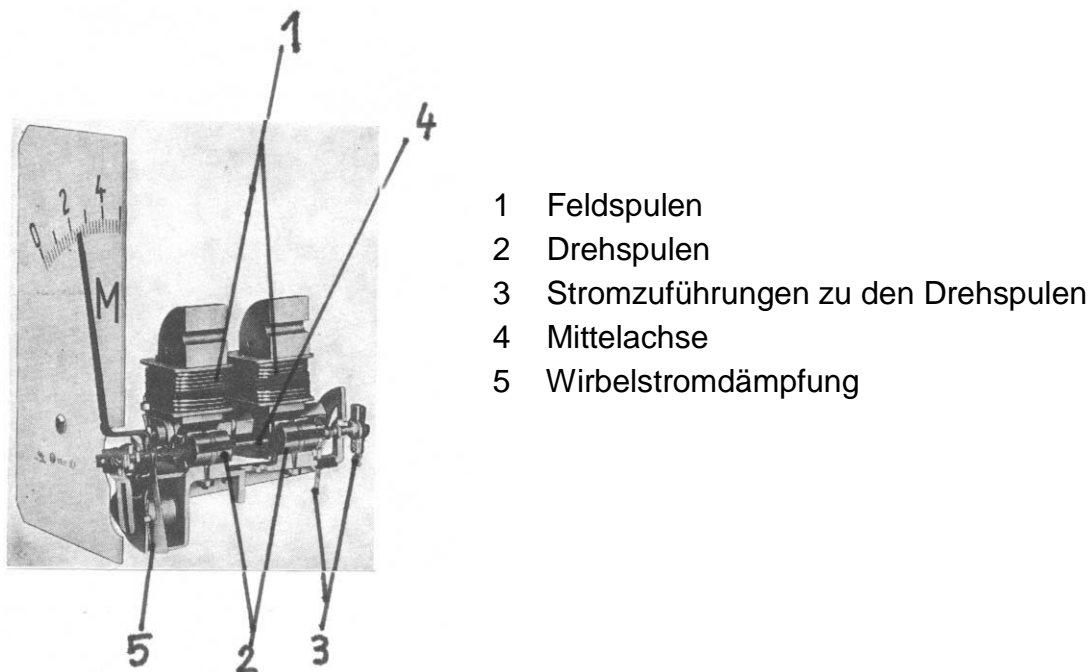
	Sternschaltung Y	Dreieckschaltung $\Delta$	Verhältnis Y : $\Delta$
Spannung $U_Z$	$U_{LL} / \sqrt{3}$	$U_{LL}$	1 : $\sqrt{3}$
Strom $I_Z$	$U_{LL} / (\sqrt{3} \cdot Z)$	$U_{LL} / Z$	1 : $\sqrt{3}$
Leistung P	$(U_{LL}^2 / Z) \cdot \cos \varphi$	$(3 \cdot U_{LL}^2 / Z) \cdot \cos \varphi$	1 : 3
Blindleistung Q	$(U_{LL}^2 / Z) \cdot \sin \varphi$	$(3 \cdot U_{LL}^2 / Z) \cdot \sin \varphi$	1 : 3
Scheinleistung S	$U_{LL}^2 / Z$	$3 \cdot U_{LL}^2 / Z$	1 : 3

### 3. Messen von elektrischen Größen

#### 3.1 Leistungs- und Arbeitsmessgeräte

##### Leistungsmessgerät mit Drehmomentkompensationsverfahren:

Für die Leistungsmessung wurden früher elektrodynamische Messgeräte verwendet. Mit diesen wird das Produkt aus Strom und Spannung gemessen. Dazu muss das Gerät beide Größen verarbeiten. Dies geschieht im Strom- bzw. im Spannungspfad. Die Geräte besitzen eine feste Feldspule (Strompfad) und eine bewegliche Drehspule (Spannungspfad). Zwei an der Drehspule und dem Gehäuse befestigte Torsionsfedern erzeugen das Gegenmoment und bilden die Stromzuführung zur Drehspule. Das Feld der Feldspule wirkt über den ganzen Drehbereich der Drehspule in etwa gleicher Größe und Richtung auf diese.



**Bild 3.1:** Schnitt durch ein zweisystemiges, eisengeschlossenes, elektrodynamisches Leistungsmesswerk.

Ein der Spannung proportionaler Strom in der Drehspule und der Laststrom in der Feldspule erzeugen zwei Felder  $\phi_1$  und  $\phi_2$  die um den Winkel  $\Psi_1$  phasenverschoben sind. Damit wirkt auf die Drehspule ein Drehmoment, das dem Skalarprodukt beider Felder proportional ist. Wenn das elektrische Drehmoment mit dem Drehmoment der Feder

gleich ist, ist der Ausschlag  $\alpha$  des Zeigers:

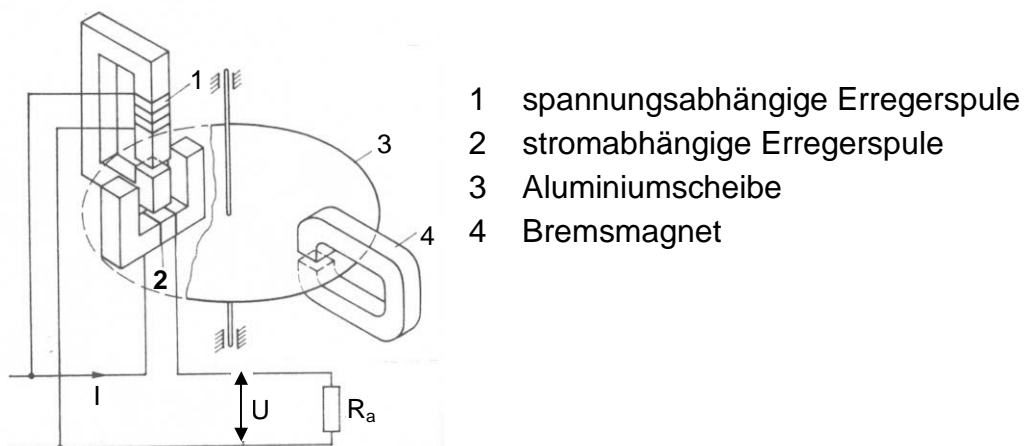
$$\alpha \sim \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \cos \Psi . \quad (3.1)$$

Die Wirkleistungsmessung ist nur genau, wenn der Phasenwinkel  $\Psi$  zwischen den beiden Feldern gleich dem Phasenwinkel  $\varphi$  ist. Im Strompfad ist das Feld  $\phi_1$  in Phase mit dem Strom  $I$ , durch den es erzeugt wird. Bei der Drehspule kann durch deren Induktivität eine Phasenverschiebung  $\delta$  zwischen  $I_U$  und  $U$  auftreten. Bei induktiver Belastung ist die Anzeige zu groß ( $\Psi = \varphi - \delta$ ), bei kapazitiver zu klein ( $\Psi = \varphi + \delta$ ). Durch große Vorwiderstände verkleinert man deshalb die induktive Wirkung der Drehspule. Diese Maßnahme reicht für Betriebsmessgeräte aus.

### Arbeitsmessgeräte:

Diese Geräte arbeiten nach dem Ferraris-Prinzip. Sie besitzen je Triebwerk eine Stromspule auf einem U-förmigen Kern und um  $90^\circ$  verdreht eine Spannungsspule. In den Spulen werden zwei Felder  $\phi_1$  und  $\phi_2$  erzeugt. Beide Felder durchsetzen einen Luftspalt, in dem sich eine drehbar gelagerte Läuferscheibe aus Aluminium bewegt.

In dieser Scheibe wird ein Drehmoment erzeugt, das proportional der augenblicklichen Verbraucherleistung ist. Die Scheibe selbst erhält durch einen Bremsmagneten eine der Leistung entsprechende Drehzahl. Die Anzahl der Läuferumdrehungen ist somit ein Maß für die geleistete elektrische Arbeit.



**Bild 3.2:** Schematische Darstellung eines Induktionszählers

---

Das erzeugte Drehmoment lässt sich durch die Gleichung

$$M_d \sim \phi_1 \cdot \phi_2 \cdot \sin \psi \quad (3.2)$$

beschreiben. Mit der Bedingung

$$\phi_1 \sim I \text{ und } \phi_2 \sim U \quad (3.3)$$

können diese Geräte zur Messung der elektrischen Scheinarbeit eingesetzt werden. Zur Messung der Wirkarbeit muss das Drehmoment des Läufers zur Wirkleistung proportional sein, also:

$$M_d \sim U \cdot I \cdot \cos \varphi . \quad (3.4)$$

Daraus leitet sich die Bedingung ab:

$$\cos \varphi = \sin \psi . \quad (3.5)$$

Um diese Bedingung zu erfüllen, werden die Spulenkerne der Spannungspfade mit Nebenflüssen versehen, die eine Phasenverschiebung um  $90^\circ$  bewirken.

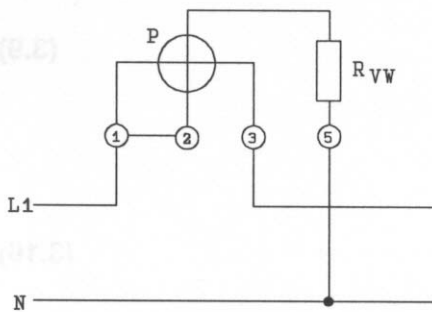
### 3.2 Schaltungen zur Leistungs- und Arbeitsmessung

Leistungsmessgeräte können auf unterschiedliche Weise in einen Wechselstromkreis geschaltet werden. Zu unterscheiden sind drei verschiedene Schaltungsarten, wobei ihre Anwendung von der Größe der zu messenden Leistung abhängt:

1. direkte Schaltung
2. halbindirekte Schaltung
3. indirekte Schaltung

Bei allen drei Schaltungsarten können die Messgeräte entweder *stromrichtig* oder *spannungsrichtig* angeschlossen werden.

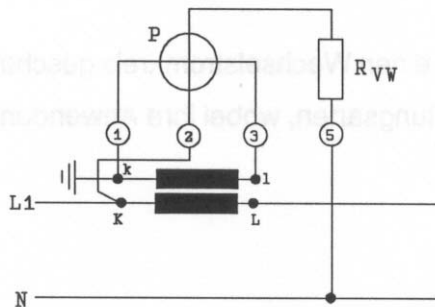
### Direkte Schaltung



Der Strom wird unmittelbar über die Stromspule geführt und die Spannung unmittelbar an der Spannungsspule angeschlossen.

**Bild 3.3:** Direkte Schaltung

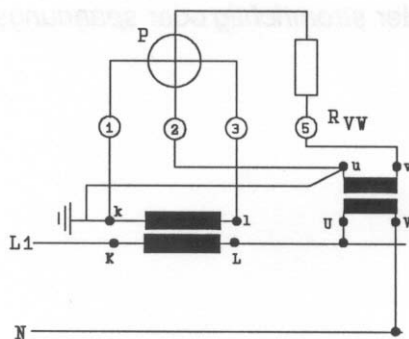
### Halbindirekte Schaltung



In den Stromkreis ist ein Stromwandler geschaltet, der Strompfad des Leistungsmessers liegt im Sekundärkreis des Wandlers. Die Spannung ist unmittelbar an die Spannungsspule angeschlossen.

**Bild 3.4:** Halbindirekte Schaltung

### Indirekte Schaltung



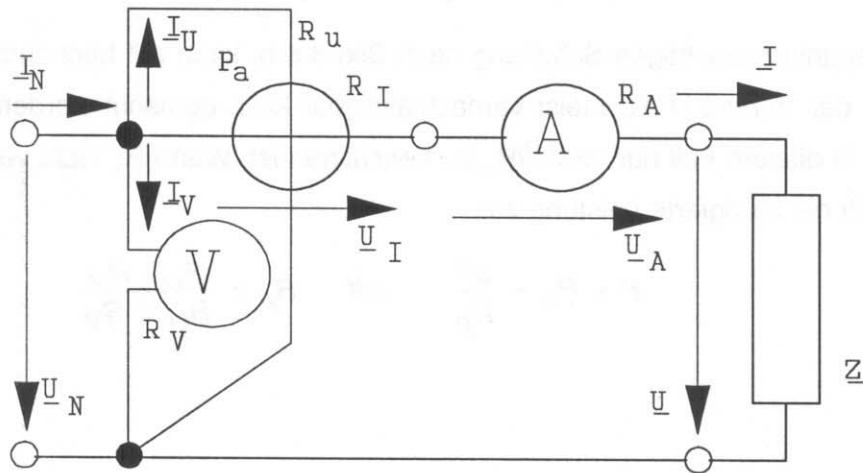
Der Leistungsmesser ist über Strom- und Spannungswandler angeschlossen. Für die Leistung gilt dann mit der Leistungsmesserkonstante  $c_p$  den Übersetzungsverhältnissen für Spannungswandler  $k_u$  und Stromwandler  $k_i$  sowie der Skalenanzeige  $\alpha$ :

$$P = c_p \cdot k_u \cdot k_i \cdot \alpha \quad (3.6)$$

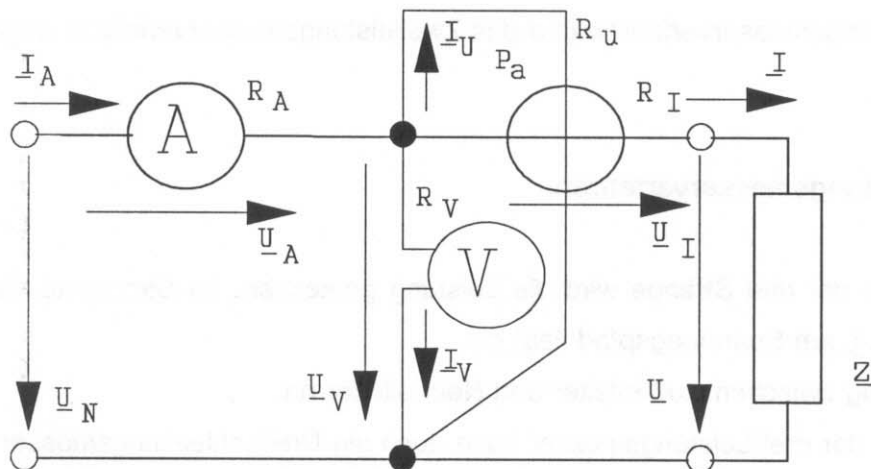
**Bild 3.5:** Indirekte Schaltung

Bei der Leistungsmessung werden, je nach Schaltung, auch die in Strom- und Spannungspfad auftretenden Verluste mit gemessen. Leistung, Strom und Spannung können daher nicht gleichzeitig richtig gemessen werden. Nach DIN 43807 und 43856 ist für Schalttafelgeräte und Zähler vorgeschrieben, dass die Spannungspfade in Energierichtung gesehen vor den Strompfaden angeschlossen werden.

a)



b)



**Bild 3.6:** Stromrichtige und spannungsrichtige Schaltung  
a) stromrichtig, b) spannungsrichtig

In der Schaltung nach Bild 3.6 a) wird der Strom, der zum Verbraucher fließt, richtig gemessen, die Verbraucherspannung jedoch falsch. Die Schaltung ist vom Verbraucher aus gesehen also stromrichtig.

Die angezeigte Leistung  $P_a$  ist um die Verluste im Strompfad größer als die tatsächlich am Verbraucher umgesetzte Leistung. Wenn die Innenwiderstände der Messgeräte bekannt sind, kann das Messergebnis korrigiert werden:

$$P = P_a - I^2 \cdot (R_I + R_A) . \quad (3.7)$$

Bei der spannungsrichtigen Schaltung nach Bild 3.6 b) kann mit hochohmigen Spannungsmessern der Verlust  $U^2/R_V$  meist vernachlässigbar klein gemacht werden, so dass die Leistung in diesem Fall nur um  $U^2/R_U$  zu berichtigen ist. Wenn  $R_V$  nicht vernachlässigt wird, ergibt sich die korrigierte Leistung zu:

$$P = P_a - \frac{U^2}{R_p} \quad \text{mit} \quad R_p = \frac{R_U \cdot R_V}{R_U + R_V} . \quad (3.8)$$

### 3.3 Leistungs- und Arbeitsmessung im Drehstromnetz

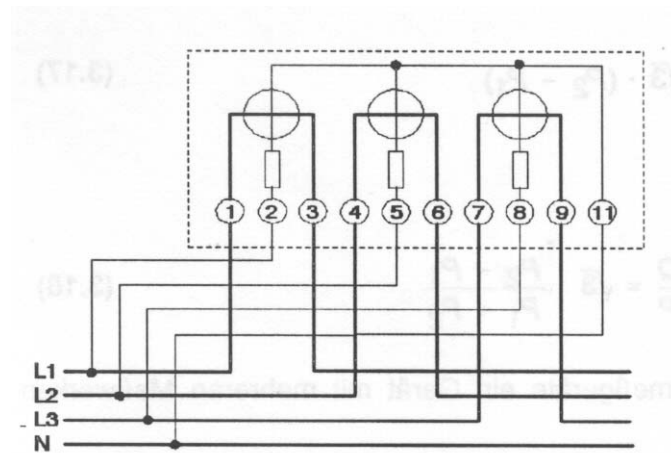
Die gesamte Wirkleistung im Drehstromnetz ergibt sich aus der Summe der drei einzelnen Phasenleistungen. Zur Messung in beliebig belasteten Systemen wird hauptsächlich das Dreileistungsmesserverfahren und das Zweileistungsmesserverfahren angewandt.

#### Dreileistungsmesserverfahren

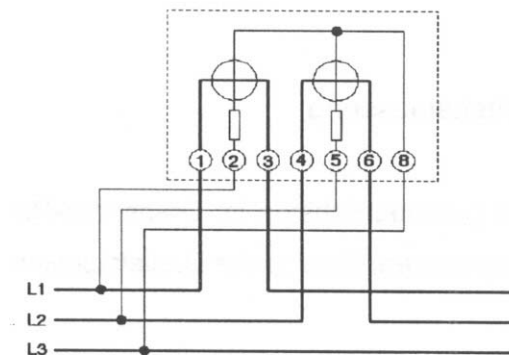
In jedem der drei Stränge wird die Leistung gemessen. Im Strompfad fließt der Außenleiterstrom  $I$ , am Spannungspfad liegt die Spannung zwischen Außenleiter und Neutralleiter an.

Anstelle der drei Leistungsmesser kann auch ein Dreifachleistungsmesser treten. Er hat für seine drei Messwerke eine gemeinsame Achse, so dass die Drehmomente mechanisch addiert werden und der Zeiger die gesamte Drehstromleistung anzeigt.

## Zweileistungsmesserverfahren (Aronschaltung)



**Bild 3.7:** Dreileistungsmesserverfahren für ein Vierleitersystem



**Bild 3.8:** Zweileistungsmesserverfahren für ein Dreileitersystem

Ein Drehstrom-Dreileitersystem kann man auch als System mit zwei Leitern und einem gemeinsamen Rückleiter auffassen. Daher reichen hier zwei Messwerke aus. Die Strompfade sind in zwei Außenleiter L1 und L2 eingeschaltet, die Spannungspfade liegen an den Außenleiterspannungen  $\underline{U}_{13}$  und  $\underline{U}_{23}$ .

In einem Dreileitersystem ist stets

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0, \quad (3.9)$$

$$u_{13} = u_1 - u_3 \text{ und} \quad (3.10)$$

$$u_{23} = u_2 - u_3. \quad (3.11)$$

Die beiden Messwerke bilden die Produkte

$$p_1 = u_{13} \cdot i_1 = u_1 \cdot i_1 - u_3 \cdot i_1, \quad (3.12)$$

$$p_2 = u_{23} \cdot i_2 = u_2 \cdot i_2 - u_3 \cdot i_2. \quad (3.13)$$

Ihre Summe ist mit  $i_3 = -i_1 - i_2$  gleich dem Zeitwert der gesamten Drehstromleistung:

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 &= u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 + u_3 \cdot (-i_1 - i_2) \\ &= u_1 \cdot i_1 + u_2 \cdot i_2 + u_3 \cdot i_3. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Die gesamte Drehstromwirkleistung ergibt sich also aus der Summe der von den Messgeräten angezeigten Wirkleistung:

$$P = P_1 + P_2. \quad (3.15)$$

Aus dieser Schaltung können auch die Blindleistung und der Phasenwinkel bestimmt werden, ohne dass zusätzliche Messgeräte benötigt werden. Für die Blindleistung gilt

$$Q = \sqrt{3} \cdot (P_2 - P_1), \quad (3.16)$$

und für den Phasenwinkel gilt

$$\tan\varphi = \frac{Q}{P} = \sqrt{3} \cdot \frac{P_2 - P_1}{P_1 + P_2} \quad (3.17)$$

Auch hier kann anstelle der zwei Einzelmessgeräte ein Gerät mit mehreren Messwerken verwendet werden.

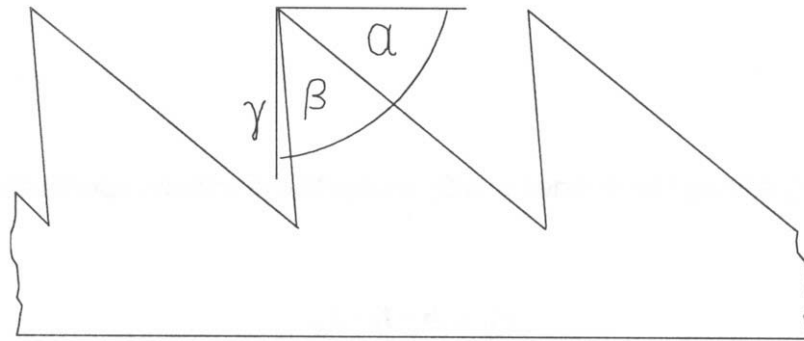
## Arbeitsmessung

Am gebräuchlichsten im Drehstrom-Niederspannungsnetz ist eine Schaltung mit drei Zählersystemen, ähnlich der Dreileistungsmesserschaltung.

#### 4. Zerspanung

Das Sägen gehört zu den spanabhebenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide. Hierbei werden von einem Werkstück Werkstoffschichten in Form von Spänen zur Änderung der Werkstückform mechanisch abgetrennt. Das Abtrennen der Späne vom Werkstück erfolgt durch den geometrisch eindeutig bestimmten Schneidkeil. Der Schneidkeil ist der im Zerspanprozess aktive Teil des Werkzeugs. Im rechtwinkligen Bezugssystem für den Schneidkeil ergeben sich die im Bild 4.1 dargestellten, für den Zerspanprozess wichtigen Werkzeugwinkel: Freiwinkel  $\alpha$ , Keilwinkel  $\beta$  und Spanwinkel  $\gamma$ . Hierbei gilt:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ . \quad (4.1)$$

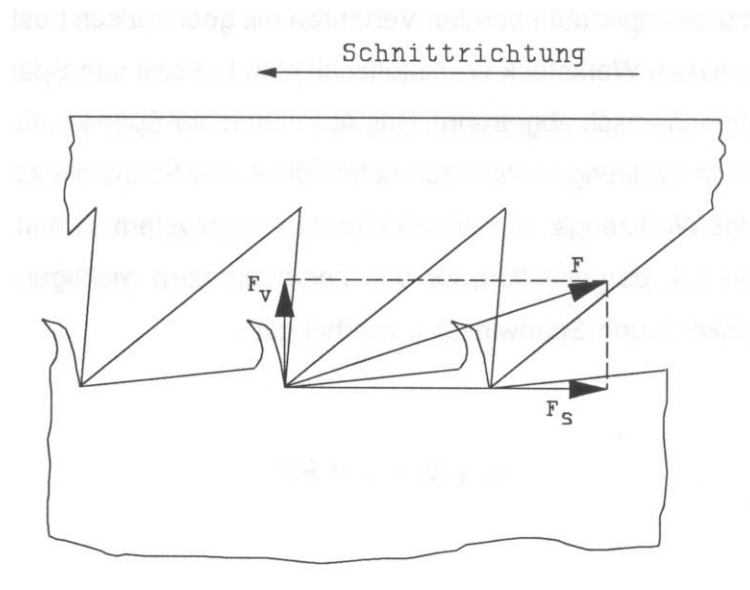


**Bild 4.1:** Werkzeugwinkel an einer Säge

Durch den eindringenden Keil wird der Werkstoff vor der Spanfläche gestaucht, getrennt und fließt dann als Span ab. Der Bereich, in dem die plastische Umformung und Trennung stattfindet, wird Scherebene genannt. In diesem Bereich wird der größte Teil der bei diesem Prozess zu leistenden Verformungsarbeit umgesetzt. Die Verformungs- und Trennarbeit wird durch die Zerspankraft und die Schnitt- und Vorschubbewegung erzeugt.

Die Schnittkraft  $F$  setzt sich beim Sägen zusammen aus:

- der Schnittkraft  $F_S$  in Richtung der Schnittbewegung und
- der Vorschubkraft  $F_V$  in Richtung der Vorschubbewegung.



**Bild 4.2** Schnittkraft und Vorschubkraft beim Sägen

Die Schnittkraft  $F_S$  lässt sich aus der Spanungsfläche und der spezifischen Schnittkraft  $k_S$  berechnen:

$$F_S = b \cdot h \cdot k_S \quad (4.2)$$

Die spezifische Schnittkraft  $k_S$  ist abhängig

- von dem zu bearbeitenden Werkstoff,
- von der Geometrie des zu bearbeitenden Werkstücks,
- von der Geometrie der Schneide,
- von dem spanabhebenden Verfahren.

Der Leistungsbedarf eines spanabhebenden Prozesses ist stark von der Größe des Werkstücks und von der gewünschten Bearbeitungszeit abhängig sowie von dem zu zerspanenden Volumen. Die benötigte Wirkleistung  $P_\theta$  am Sägeblatt setzt sich zusammen aus der Schnittleistung  $P_S$  und der Vorschubleistung  $P_V$ :

$$P_\theta = P_S + P_V = F_S \cdot v + F_V \cdot u \quad (4.3)$$

## **5. Versuchsmaschinen**

### **5.1 Bandsäge**

Die Bandsäge arbeitet mit einem endlosen Sägeband, weshalb eine kontinuierliche Zerspanung möglich ist. Dadurch wird während der gesamten Dauer des Sägevorgangs zerspanende Arbeit geleistet. Der Antrieb des Sägebandes erfolgt über einen polumschaltbaren Drehstrom-Asynchronmotor mit einer Nennleistung  $P_N = 1,1$  bzw.  $1,7$  KW. Die Schnittgeschwindigkeit kann in acht Stufen zwischen 12 und 375 m/min eingestellt werden.

### **5.2 Bügelsäge**

Im Gegensatz zur Bandsäge arbeitet die Bügelsäge diskontinuierlich, da sie ein endliches Sägeblatt besitzt, das während eines Arbeitszyklus einmal vorgeschoben und einmal zurückgezogen wird. Zerspant wird dabei nur im Vorwärtshub, im Rückhub wird keine zerspanende Arbeit geleistet.

Der Antrieb erfolgt ebenfalls über einen Drehstrom-Asynchronmotor mit einer Nennleistung  $P_N = 1,5$  KW. Die Schnittgeschwindigkeit kann in zwei Stufen zwischen einer Hubzahl von 60 und 140 1/min eingestellt werden.

## 6. Versuchsdurchführung

Folgende Messgeräte stehen zur Verfügung:

- ein dreiphasiger Wirkarbeitszähler,
- dreiphasige Wirk- und Blindleistungsmessumformer,
- ein Universalschreiber.

In Abhängigkeit von verschiedenen Einflussparametern sind für einen vollständigen Sä-  
gevorgang zu ermitteln:

- die benötigte Wirkarbeit,
- die Sägezeit,
- die mittlere Wirk- und Blindleistungsaufnahme,
- der Verlauf der Wirk- und Blindleistungsaufnahme während eines Arbeits-  
zyklus.

### **Einflussparameter**

Bügelsäge:

- Stellung des Werkstücks (flach oder hochkant)
- Schnittdruck
- Zahnteilung

Bandsäge:

- Schnittgeschwindigkeit
- Schnittdruck (variierbar durch verschiedene Zuggewichte)

Entwickeln Sie für Band- und Bügelsäge eine Messschaltung und bauen Sie diese auf.  
Lassen sie vor Beginn der Messung die Schaltung durch die den Versuch betreuenden  
Personen überprüfen.

## 7. Versuchsauswertung

### **Bandsäge:**

Zeichnen Sie den Verlauf von Wirk- und Blindleistung, der benötigten Wirk- und Blindenergie und der Sägezeit als Funktion des Vorschubgewichts und der Schnittgeschwindigkeit.

Ermitteln Sie den Verlauf des spezifischen Wirkenergieverbrauchs als Funktion der Maschinenauslastung  $P/P_N$ .

### **Bügelsäge:**

Zeichnen Sie den Verlauf von Wirk- und Blindleistung, der benötigten Wirk- und Blindenergie und der Sägezeit als Funktion des Schnittdrucks und der Zahnteilung des Sägeblatts.

Ermitteln Sie den Verlauf des spezifischen Wirkenergieverbrauchs als Funktion der Maschinenauslastung  $P/P_N$ .

## 8. Weiterführende Literatur

Schaefer, Helmut:

Messen in der Energieanwendung  
Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1989

Wehrmann, Wolfgang:

Elektrische Leistungsmessung  
Kontakt & Studium Bd. 165, Expert Verlag Sindelfingen 1985



### Versuchsprotokoll „Bandsäge“

Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]	Schnitt- geschwindigkeit [m/min]	Vorschub- gewicht [kg]	Sägezeit [s]	mittlere Wirkleistung [W]	mittlere Blindleistung [VA]	Wirkarbeit [Wh]	Auslastung [ - ]	spezifischer Wirkenergie- verbrauch [Wh/mm <sup>2</sup> ]
1000	18	7,5						
		12,5						
1000	37	7,5						
		12,5						

### Versuchsprotokoll „Bügelsäge“

Querschnitt [mm <sup>2</sup> ]	Schnittdruck [Stufe]	Zahnteilung [Zähne/Zoll]	Sägezeit [s]	mittlere Wirkleistung [W]	mittlere Blindleistung [VA]	Wirkarbeit [Wh]	Auslastung [ - ]	spezifischer Wirkenergie- verbrauch [Wh/mm <sup>2</sup> ]
1000	0	4						
		8						
1000	6	4						
		8						