

# Praktikum Grundlagen der Elektrotechnik

## DREIPHASEN-Wechselstrom (Versuch 13)



Fachhochschule Fulda  
Fachbereich Elektrotechnik

durchgeführt von \_\_\_\_\_ Matrikel-Nr. \_\_\_\_\_  
(Protokollführer)

zusammen mit \_\_\_\_\_ Matrikel-Nr. \_\_\_\_\_

Datum \_\_\_\_\_ Gruppe \_\_\_\_\_

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Ident.-Nr.	Bemerkung
1	elPo Experimentiertransformator		3x0-24/42V, 2A
2	3 Spulen 1200 Wdg.		35 mH, 1A
3	3 Schiebewiderstände		100 $\Omega$ , 1,8A
4	3 Kondensatoren		33 $\mu$ F
5	3 Widerstände		13 $\Omega$
6	C-Dekade		
7	Yokogawa Leistungsmessgerät	020000827	
8	Digitalmultimeter		
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			

## 1. Grundlagen

In diesem Versuch geht es um die Messung von Strom, Spannung und Leistung in symmetrischen und unsymmetrischen Dreiphasensystemen. Im Vordergrund stehen dabei die Abhängigkeit der gemessenen Größen von der Art der Schaltung (Stern oder Dreieck) und dem Grad der Unsymmetrie sowie die Unterschiede in der Strang- und Summenleistung bei verschiedenen Belastungen und Meßvarianten.

### 1.1 Wirkleistungsmessung

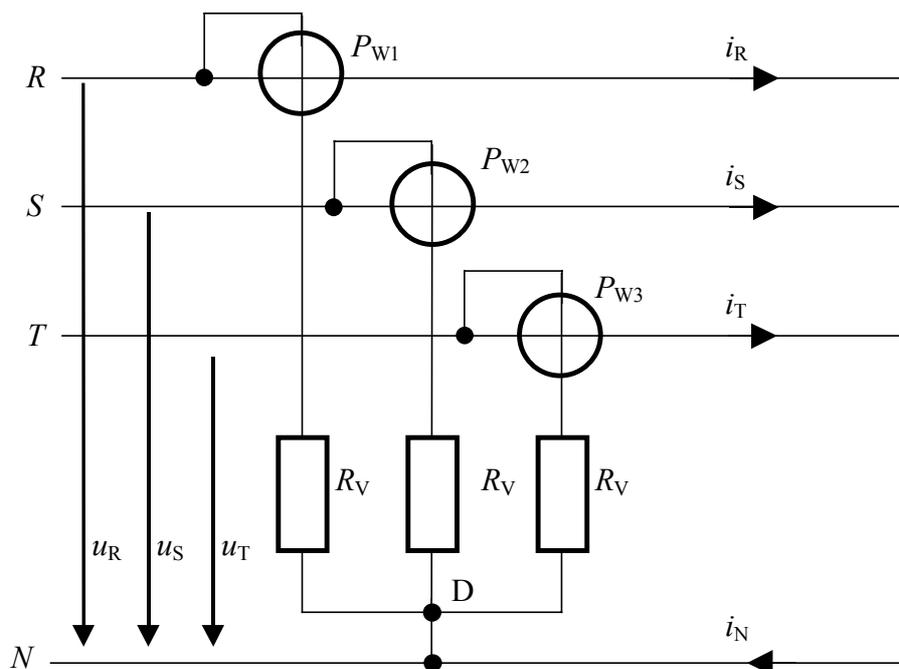
Um in einem verketteten Mehrphasensystem mit  $n$  Leitungen bei beliebig unsymmetrischen Spannungen und Strömen die insgesamt übertragene Wirkleistung vollständig messen zu können, sind nur  $(n-1)$  Leistungsmesser nötig, da die Größen der  $n$ -ten Leitung durch die Spannungen und Ströme der  $(n-1)$  anderen Leitungen festgelegt sind.

Bei symmetrischen Mehrphasennetzen kann die Anzahl der Leistungsmesser sogar noch weiter verringert werden.

Bei den folgenden Überlegungen wird davon ausgegangen, daß ein *starres Netz* mit symmetrischen Leiter- und Sternpunktspannungen vorliegt. Die Belastung hingegen kann unsymmetrisch im Stern oder im Dreieck geschaltet sein.

#### 1.1.1 Vierleitersystem (Dreiphasensystem mit angeschlossenem Sternpunktleiter)

In einem beliebig belasteten Vierleitersystem muß die Leistung stets mit drei Leistungsmessern bestimmt werden, siehe Bild 1.



**Bild 1**

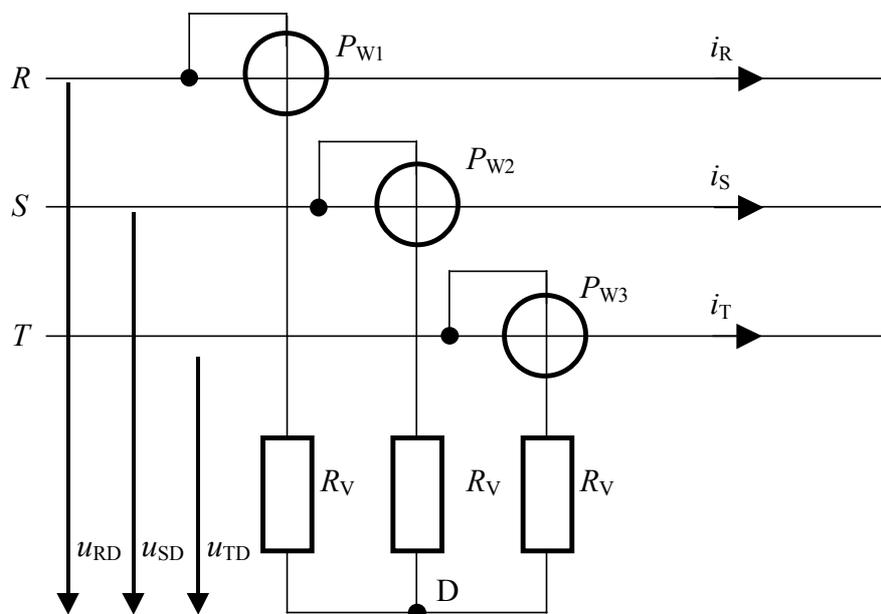
Der Einfachheit halber wird angenommen, daß die Impedanz der Spannungspfade rein reell ist ( $R_V$ ). Außerdem soll der Eigenverbrauch der Spannungspfade zu vernachlässigen sein.

Die von den Leistungsmessern angezeigte Summenleistung ist dann stets gleich der im Verbraucher und in den Strompfaden umgesetzten *Gesamtleistung*, unabhängig davon, ob die Last im Dreieck oder im Stern geschaltet ist und auch unabhängig davon, ob der Neutralleiter angeschlossen ist oder nicht.

Die Verbindung des künstlichen Sternpunktes D mit dem Neutralleiter ist ohne Bedeutung, wenn der künstliche Sternpunkt dasselbe Potential wie der Neutralleiter hat. Falls die Netzspannungen ein symmetrisches System bilden, ist dies dann der Fall, wenn die Widerstände in den Spannungspfaden der Leistungsmesser gleich groß sind.

### 1.1.2 Dreileitersystem

Bei einem Dreileitersystem kann das Potential des künstlichen Sternpunktes D (siehe Bild 2) durch Schaltungsmaßnahmen beliebig verändert werden, ohne daß es die Summenleistung falsch angezeigt wird. Dies gilt unabhängig davon, ob der Generator im Stern oder im Dreieck geschaltet ist. Der Nachweis wird nachstehend für den Fall der Sternschaltung des Generators geführt.



**Bild 2**

Ist der Generator im Stern geschaltet, kann die von ihm abgegebene Leistung, die gleich der vom Verbraucher aufgenommenen Summenleistung ist, wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} P_{W_{\text{ges}}} &= \langle p(t) \rangle = \langle u_R i_R + u_S i_S + u_T i_T \rangle \\ &= U_R I_R \cos \varphi_R + U_S I_S \cos \varphi_S + U_T I_T \cos \varphi_T \end{aligned} \quad (1)$$

mit

$$\varphi_R = \arg \{ \underline{U}_R / \underline{I}_R \}, \quad \varphi_S = \arg \{ \underline{U}_S / \underline{I}_S \}, \quad \varphi_T = \arg \{ \underline{U}_T / \underline{I}_T \} \quad (1a)$$

Die von den Leistungsmessern erfaßte Leistung ist

$$\begin{aligned}
 \langle \tilde{p}(t) \rangle &= \langle u_{RD}i_R + u_{SD}i_S + u_{TD}i_T \rangle \\
 &= \langle (u_R - u_0) \cdot i_R + (u_S - u_0) \cdot i_S + (u_T - u_0) \cdot i_T \rangle \\
 &= \underbrace{\langle u_R \cdot i_R + u_S \cdot i_S + u_T \cdot i_T \rangle}_{\langle p(t) \rangle} - \underbrace{\langle u_0(i_R + i_S + i_T) \rangle}_{\langle p_0(t) \rangle}
 \end{aligned} \tag{2}$$

$u_0 = u_{DN}$  bezeichnet hierin die Spannung zwischen künstlichem Sternpunkt D und Neutralleiter N. Beim Dreileitersystem ist durch Schaltungszwang gesichert, daß

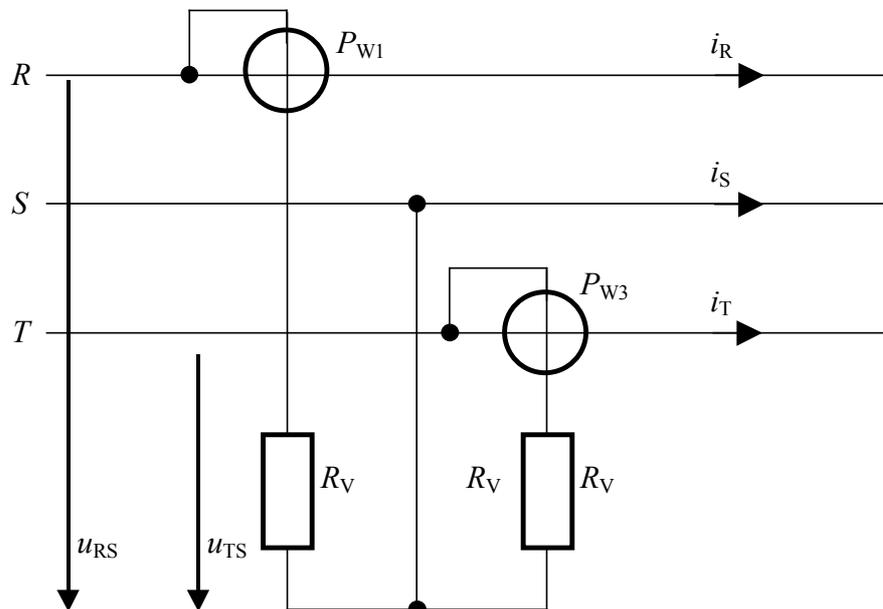
$$i_R + i_S + i_T = 0 \tag{3}$$

ist, die von den Leistungsmessern angezeigte Summenleistung stimmt also tatsächlich mit der lastseitig aufgenommenen Leistung überein.

Wählt man

$$u_0 = u_S \tag{4}$$

kann ein Leistungsmesser eingespart werden, man gelangt zu der in Bild 3 dargestellten (Aron-) Schaltung.

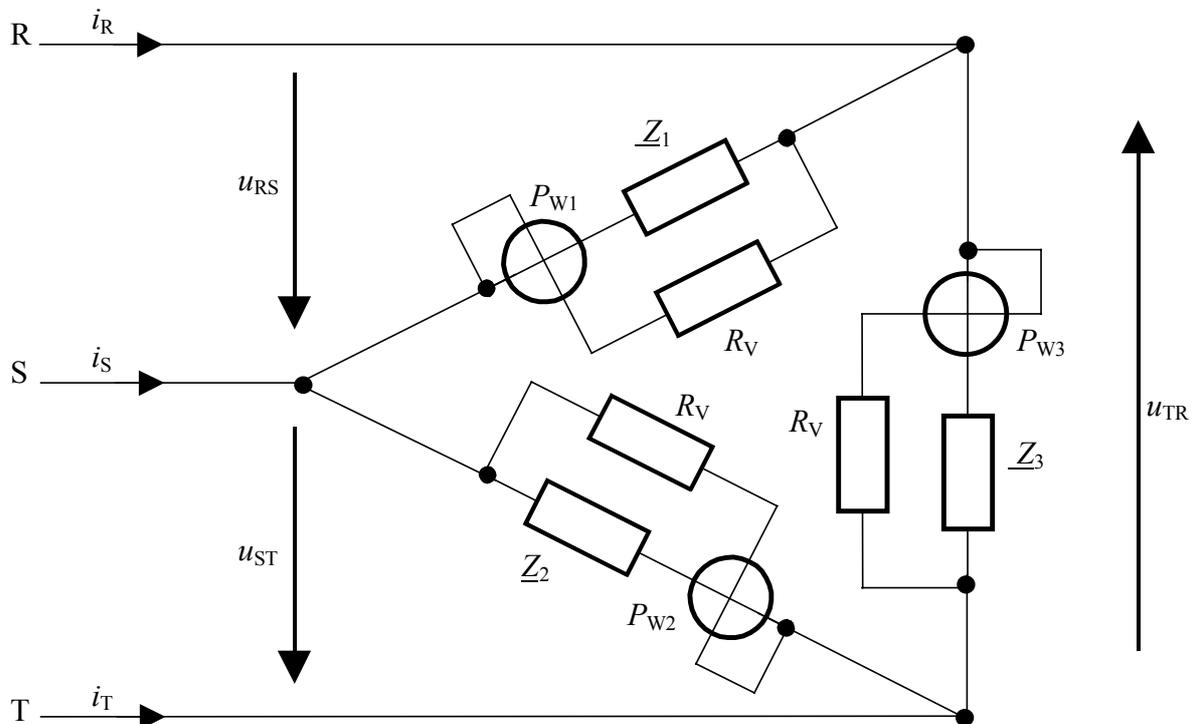


**Bild 3**

### 1.1.3 Anzeige der Strangleistungen der Last

Bei allen beschriebenen Schaltungen zur Leistungsmessung in Vier- oder Dreileitersystemen können die einzelnen Strangleistungen der angeschlossenen Last nur in Sonderfällen abgelesen werden, z.B. dann, wenn

1. die Last im Stern geschaltet ist und nach der Dreileistungsmessermethode gemäß Bild 1 verfahren wird
2. die Last im Dreieck geschaltet ist und nach der Dreileistungsmessermethode gemäß Bild 4 verfahren wird
3. eine symmetrische Last vorliegt. Alle drei Leistungsmesser nach Bild 1 bzw. Bild 2 zeigen dann dieselbe Strangleistung an, so daß zwei von ihnen entfernt werden können. Anstelle der entfernten Spannungspfade müssen dann allerdings in der Schaltung nach Bild 2 Widerstandsleiter eingesetzt werden, deren Widerstand dem der entfernten Spannungspfade ( $R_V$ ) entspricht; andernfalls würde der Punkt D sein Potential unzulässig ändern.



**Bild 4**

### 1.2 Blindleistungsmessung

Insofern von einem Leistungsmesser nicht nur Strangspannung und der Strangstrom sondern auch die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom eines Stranges gemessen werden, kann die Bestimmung der Blindleistung einfach dadurch erfolgen das in (1) anstelle der  $\cos$ -Funktion die  $\sin$ -Funktion eingesetzt wird,

$$P_{\text{Bges}} = P_{\text{B1}} + P_{\text{B2}} + P_{\text{B3}} = U_{\text{R}} I_{\text{R}} \sin \varphi_{\text{R}} + U_{\text{S}} I_{\text{S}} \sin \varphi_{\text{S}} + U_{\text{T}} I_{\text{T}} \sin \varphi_{\text{T}} . \quad (5)$$

### 1.3 Symmetrierschaltungen

Wenn eine Dreiphasenlast, z.B. ein Motor mit der Strangimpedanz  $\underline{Z}_M$ , an einem unsymmetrischen Spannungssystem betrieben werden soll, kann dies mittels zweier zusätzlicher Hilfsimpedanzen ermöglicht werden (Steinmetzschtaltung), siehe Bild 5. Die Schaltung bewirkt, daß das Stromsystem in der Dreiphasenlast symmetrisch wird. Für Impedanzen, die einen Phasenwinkel von  $60^\circ$  (ind.) aufweisen, ist eine Symmetrierung mit nur einer (rein kapazitiven) Hilfsimpedanz möglich, siehe Bild 6.

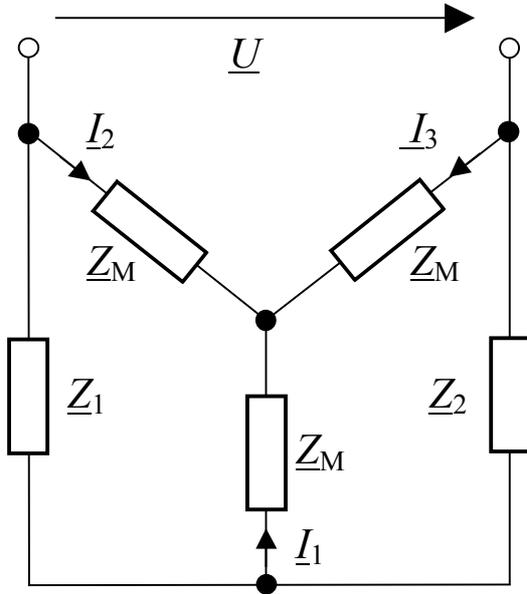


Bild 5

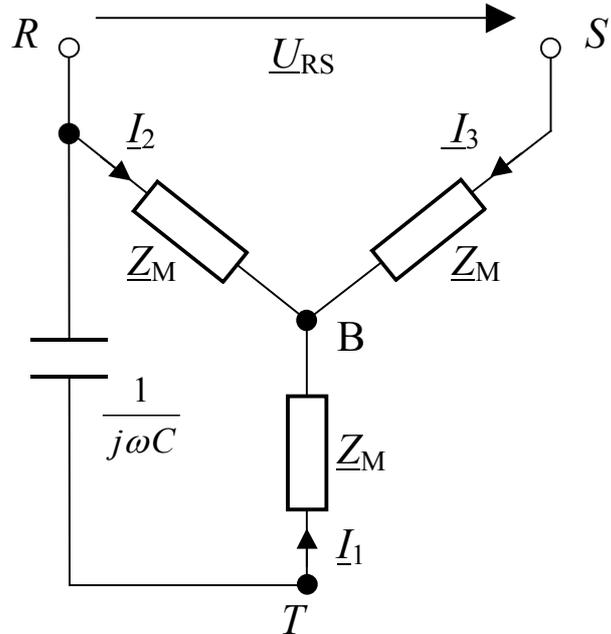
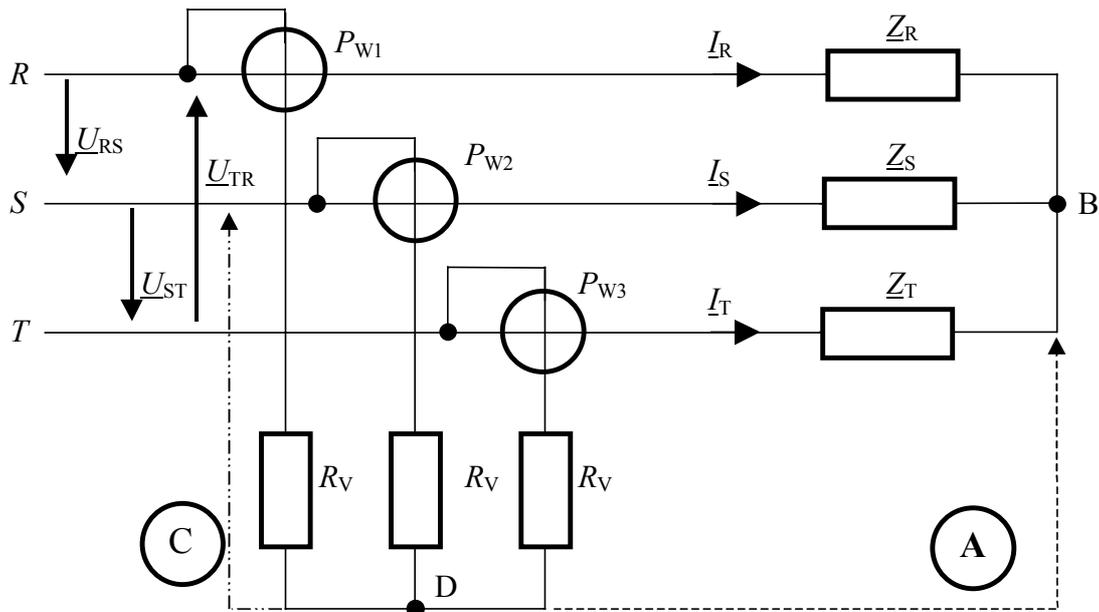


Bild 6

## 2. Versuchsdurchführung

Für die Erprobung der verschiedenen Methoden zur Leistungsmessung wird ein starres symmetrisches 11V/19V-Spannungssystem benutzt. Dafür wird am Transformator, in YY5-Schaltung eine Leiterspannung von 19V eingestellt. Am Leistungsmessgerät wird für die Messungen die Einstellung 3-4W gewählt. Die Last ist in allen Fällen im Stern geschaltet; unsymmetrische Strangströme und -spannungen können eingestellt werden, indem die Laststränge unterschiedlich beschaltet werden. Bild 7 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Versuchsschaltung. Mit ihr können alle interessanten Varianten der Leistungsmessung durchgeführt werden.



**Bild 7**

Folgende Schaltungen sind möglich:

- Dreileistungsmessermethode; Sternpunkt D ist mit Sternpunkt B verbunden
- Dreileistungsmessermethode; Sternpunkt D ist frei (künstlicher Sternpunkt)
- Zweileistungsmessermethode; D und S werden kurzgeschlossen, so daß der Leistungsmesser in Strang S kurzgeschlossen wird

Die Leistungsmesser sollen so geschaltet werden, daß der Verbrauch der Stromfäde mit zur Belastung gerechnet werden kann, d.h. es wird *stromrichtig* gemessen.

## 2.1 Wirkleistungsmessung

### 2.1.1 Symmetrische Belastung

Für zwei vom Versuchsbetreuer anzugebende Belastungen ( $R=100\Omega$ ,  $L=35\text{mH}$ ,  $C=33\mu\text{F}$ ) sollen die Wirk-, Blind- und Scheinleistungen in den einzelnen Strängen und die Gesamtleistungen nach Methode A und C bestimmt werden.

Außerdem sind die Ströme  $I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$ , die Strangspannungen  $U_{RB}$ ,  $U_{SB}$ ,  $U_{TB}$ , die Außenleiterspannungen  $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$  sowie die Phasenwinkel  $\varphi_R$ ,  $\varphi_S$ ,  $\varphi_T$  (siehe Gleichung(1a)) zu messen. Die Messung der Phasenwinkel ist mit dem Leistungsmeßgerät möglich [Kanal B, Anzeige auf deg]).

Anschließend ist für jede Belastung auf Millimeterpapier ein maßstäbliches Zeigerdiagramm mit allen Strangspannungen und -strömen sowie allen Leiterspannungen und -strömen zu zeichnen. Kontrollieren Sie, ob die Beziehung  $P_S^2 = P_W^2 + P_B^2$  eingehalten wird.

### 2.1.2 Unsymmetrische Belastung

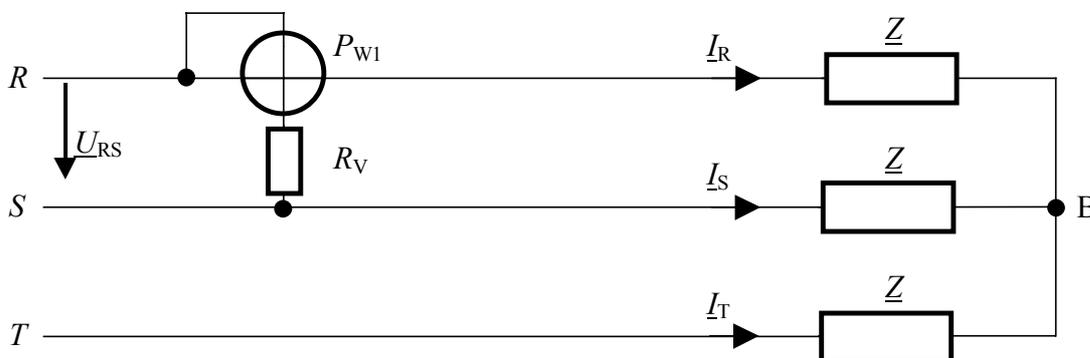
Für zwei vom Versuchsbetreuer anzugebende Belastungen (siehe Anhang) sollen die Wirk-, Blind- und Scheinleistungen in den einzelnen Strängen und die Gesamtleistungen nach Methode A und B bestimmt werden.

Außerdem sind die Ströme  $I_R$ ,  $I_S$ ,  $I_T$ , die Strangspannungen  $U_{RB}$ ,  $U_{SB}$ ,  $U_{TB}$ , die Außenleiterspannungen  $U_{RS}$ ,  $U_{ST}$ ,  $U_{TR}$  sowie die Phasenwinkel  $\varphi_R$ ,  $\varphi_S$ ,  $\varphi_T$  (siehe (1a)) zu ermitteln.

Anschließend ist für jede Last auf Millimeterpapier ein maßstäbliches Zeigerdiagramm zu zeichnen.

### 2.1.3 Untersuchung einer speziellen Schaltung

Mit der in Bild 8 dargestellten Schaltung soll für eine symmetrische Belastung die Gesamtwirkleistung gemessen werden. Es ist zu untersuchen, für welche Phasenwinkel  $\varphi_R = \varphi_S = \varphi_T$  die Beziehung  $P_{W\text{ges}} = 2 P_{W1}$  zutrifft.



**Bild 8**

### 2.1.4 Symmetrierschaltung

Für eine Schaltung nach Bild 6 mit  $\underline{Z}_M \approx (47 + j83) \Omega$  (Reihenschaltung eines Widerstandsleiters mit  $R = 13 \Omega$  und Spule mit  $L = 35\text{mH}$ ) ist zu untersuchen, ob sich mit einem Kondensator der Impedanz  $1,5 |\underline{Z}_M| < |X_C| < 2 |\underline{Z}_M|$  ein symmetrisches Stromsystem erzeugen läßt. Notieren Sie die eingestellte Kapazität, messen Sie Strangströme und -spannungen mit dem Leistungsmesser sowie die Außenleiterspannungen mit einem Multimeter. Ermitteln sie die Phasenwinkel  $\varphi_R = \arg(\underline{U}_{RB} / \underline{I}_R)$ ,  $\varphi_S = \arg(\underline{U}_{SB} / \underline{I}_S)$ ,  $\varphi_T = \arg(\underline{U}_{TB} / \underline{I}_T)$  und zeichnen Sie ein maßstäbliches Zeigerbild.

#### Literaturhinweise:

[1] *Frohne, H.*: Einführung in die Elektrotechnik 3. Wechselstrom, Kapitel 5

### Anhang

**Tabelle 1** Unsymmetrische Belastungen

Lfd. Nr.	Strang R	Strang S	Strang T
1	Kond. / Spule	Spule / Wid.	Kond.
2	Spule	Kond. / Wid.	Kond. / Wid.
3	Kond. / Spule / Wid.	Wid.	Kond./ Spule / Wid
4	Kond. / Spule	Wid.	Kond. / Wid.
5	Kond./ Spule / Wid.	Spule	Kond.
6	Kond./ Spule / Wid.	Wid.	Wid.
7	Kond./ Spule / Wid.	Kond. / Wid.	Kond. / Wid.
8	Spule / Wid.	Kond. / Wid.	Spule / Wid.
9	Kond. / Wid.	Wid.	Spule / Wid.
10	Spule	Spule	Kond. / Spule
11	Spule / Wid.	Wid.	Spule / Wid.

### Formeln und Begriffe

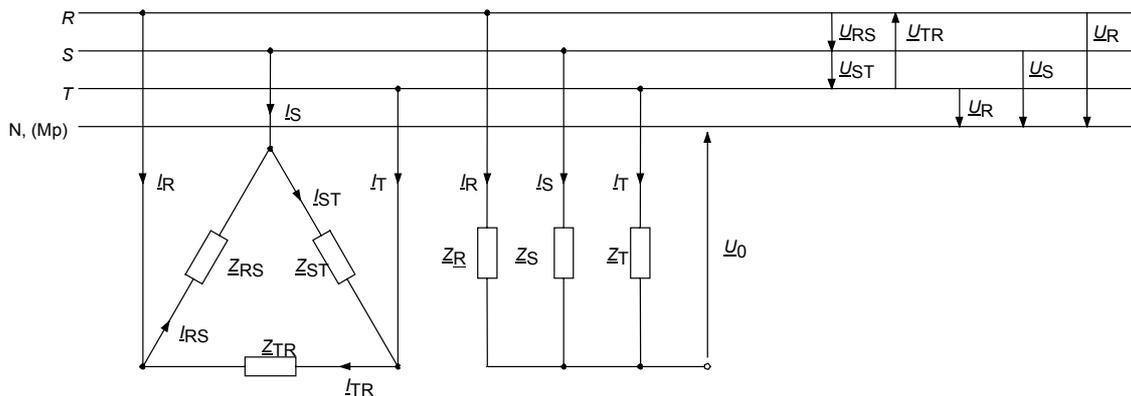
Impedanz (Scheinwiderstand)	Reaktanz (Blindwiderstand)	Resistanz (Wirkwiderstand)
$Z :=  Z  = \frac{ U }{ I }$ $\underline{Z} = Z \cdot \exp(j\varphi) = Z \cdot (\cos\varphi + j \sin\varphi)$ $Z^2 = R^2 + X^2$	$X = \Im\{\underline{Z}\} = Z \sin\varphi$ $X_L = \omega L \quad X_C = \frac{-1}{\omega C}$ $\omega = 2\pi f$	$R = \Re\{\underline{Z}\} =  Z  \cdot \cos\varphi$
<b>Phasenverschiebung</b>		
$\varphi = \arctan \frac{\Im\{\underline{Z}\}}{\Re\{\underline{Z}\}} = \arctan \frac{X}{R}$		

Strangspannungen:  $\underline{U}_R, \underline{U}_S, \underline{U}_T$

Strangströme:  $\underline{I}_{RS}, \underline{I}_{ST}, \underline{I}_{TR}$

Leiterspannungen:  $\underline{U}_{RS}, \underline{U}_{ST}, \underline{U}_{TR}$ , die Spannungen zwischen den Außenleitern.

Leiterströme:  $\underline{I}_R, \underline{I}_S, \underline{I}_T$ , die Ströme, die durch die Außenleiter fließen.



	Leiterstrom	Leiterspannung
Dreieck-Schaltung	$I_{LT} = \sqrt{3} \cdot I_{STR}$	$U_{STR} = U_{LT}$
Stern-Schaltung	$I_{STR} = I_{LT}$	$U_{LT} = \sqrt{3} \cdot U_{STR}$

Die Bezeichnungen R, S, T erlauben eine kompakte Schreibweise. Normgerecht ist jedoch die Kennzeichnung mit L1, L2, L3. Der Neutraleiter (N) wurde früher als Mittelpunktleiter bezeichnet (Mp).

## Schaltungsarten des Dreiphasen-Transformators

Oberspannungs- und Unterspannungs-Wicklung eines Dreiphasen-Transformators können auf verschiedenen Weisen geschaltet sein. Die Angabe der Schaltgruppe liefert hierüber Auskunft. Folgende Symbole werden verwendet:

D( $\Delta$ ) oder d: Dreiecksschaltung  
 Y oder y: Sternschaltung  
 z: Zickzackschaltung

Hinter der Buchstabenkombination wird ein Zahlenwert eingetragen, der in Vielfachen von  $30^\circ$  angibt, wie groß die Phasenverschiebung zwischen korrespondierenden Spannungen der Primär- und Sekundärseite ist.

Schalt- gruppe	Zeigerbild		Schaltung	
	OS	US	OS	US
$\Delta y0$				
$\Delta y5$				
$\Delta d5$				
$\Delta z5$				
$Yy0$				
$Yy5$				
$Yd5$				
$Yz5$				



