

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Drehstrom</b> .....	<b>2</b>
1.1. Erzeugung.....	2
1.2. Sternschaltung des Generators und Stromweiterleitung mit 4 Leitungen.....	3
1.3. Dreieckschaltung des Generators und Stromweiterleitung mit 3 Leitungen.....	3
1.4. Strang- und Außenleiterspannungen in der Sternschaltung als Zeigergrößen.....	4
1.5. Sternschaltung des Verbrauchers mit angeschlossenem Neutralleiter.....	5
1.5.1. Symmetrische Last.....	5
1.5.2. Asymmetrische Last.....	5
1.6. Sternschaltung des Verbrauchers ohne Neutralleiter.....	6
1.6.1. Symmetrische Last.....	6
1.6.2. Asymmetrische Last.....	6
1.7. Dreieckschaltung des Verbrauchers.....	7
1.7.1. Symmetrische Last.....	7
1.7.2. Asymmetrische Last.....	8
1.8. Leistung bei symmetrischem Verbraucher.....	9
1.9. Leistung bei asymmetrischem Verbraucher.....	10
<b>2. Laboraufbau</b> .....	<b>11</b>
2.1. Versuchsplatine.....	11
<b>3. Versuche</b> .....	<b>12</b>
3.1. Aufbau des Drehstromsystems.....	12
3.1.1. Effektivwerte der Spannungen des Drehstromsystems .....	12
3.1.2. Spitzenwerte der Spannungen des Drehstromsystems .....	12
3.1.3. Phasenbeziehungen der Spannungen des Drehstromsystem.....	12
3.1.4. Frequenz der Spannungen des Drehstromsystem.....	12
3.1.5. Außenspannungen des Drehstromsystems .....	12
3.2. Untersuchung der unterschiedlichen Strangimpedanzen.....	13
3.3. Verbraucher in Sternschaltung mit angeschlossenem Sternpunkt N' .....	14
3.3.1. Symmetrischer ohmscher Verbraucher.....	14
3.3.2. Symmetrischer ohmsch/kapazitiver Verbraucher.....	15
3.3.3. Asymmetrischer Verbrauchern.....	16
3.4. Verbraucher in Sternschaltung ohne angeschlossenen Sternpunkt N' .....	18
3.4.1. Nullpunktpotenzial bei symmetrischem Verbraucher.....	18
3.4.2. Nullpunktpotenzial bei asymmetrischem Verbraucher.....	18
3.4.3. Asymmetrischer Referenzverbraucher.....	18
3.5. Dreieckschaltung .....	19
3.5.1. Symmetrischer ohmscher Verbraucher.....	19
3.5.2. Referenzverbraucher .....	19
3.6. Leiterströme der verschiedenen Verbraucher-Verschaltungen .....	21
3.7. Leistungen.....	22
3.7.1. Referenz-Verbraucher in Sternschaltung mit angeschlossenem Nullleiter.....	22

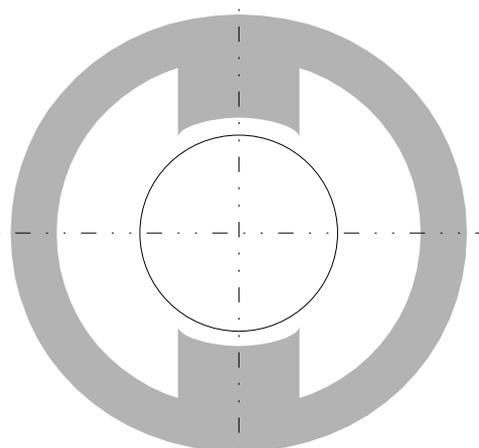
# I. Drehstrom

Das Kapitel 1 wurde meinem Skript zur Vorlesung GET 2 entnommen, in dem die entsprechenden Studenten die in der Vorlesung ergänzten Ergebnisse finden können.

## I.1. Erzeugung

Um den 3-phasigen Drehstrom zu erzeugen benutzt man sog. Drehstromgeneratoren mit drei symmetrischen je um 120° versetzten Wicklungen (Strängen), in denen beim Durchlaufen des Magnetfelds drei üblicherweise gleich große Spannungen derselben Frequenz erzeugt werden, die zeitlich um 120° zueinander phasenverschoben sind.

Der obere Statorpol des vereinfachten Generators sei z. B. ein magnetischer Nordpol, der untere ein magnetischer Südpol. Zeichnen Sie passend zur Abb. 2 die drei um je 120° versetzten Wicklungen des Rotors ein.



Die drei Ausgangsspannungen des Generator, die sog. Phasen, haben folgende zeitliche Spannungsverläufe:

$$u_1(t) = \hat{u}_{strang} \cdot \sin(\omega t)$$

$$u_2(t) = \hat{u}_{strang} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_3(t) = \hat{u}_{strang} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Abbildung 1: Querschnitt eines vereinfachten Drehstromgenerators

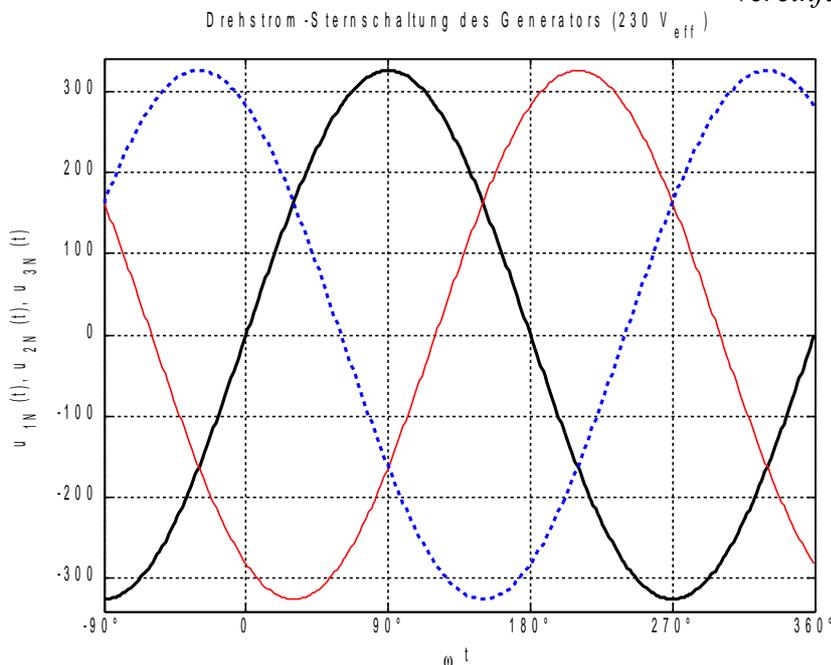


Abbildung 2: Die drei Ausgangsspannungen eines 230V-Drehstromnetzes.

Da drei voneinander unabhängige Spannungen erzeugt werden, könnten zu den drei zu versorgenden Verbrauchern/Verbrauchergruppen vom Drehstromgenerator insgesamt 3 x 2 = 6 Leitungen geführt werden.

Bezieht man jede der drei Phasen auf eine gemeinsame Masse, reichen 3 + 1 = 4 Leitungen. In der Praxis werden zum Teil auch nur drei Leiter eingesetzt (vgl. 1.6).

### 1.2. Sternschaltung des Generators und Stromweiterleitung mit 4 Leitungen

Werden die drei Generatorwicklungen an einem gemeinsamen (Stern-)Punkt verbunden, erhält man die sog. Sternschaltung des Generators (*wye-connected system or Y-connected system*):

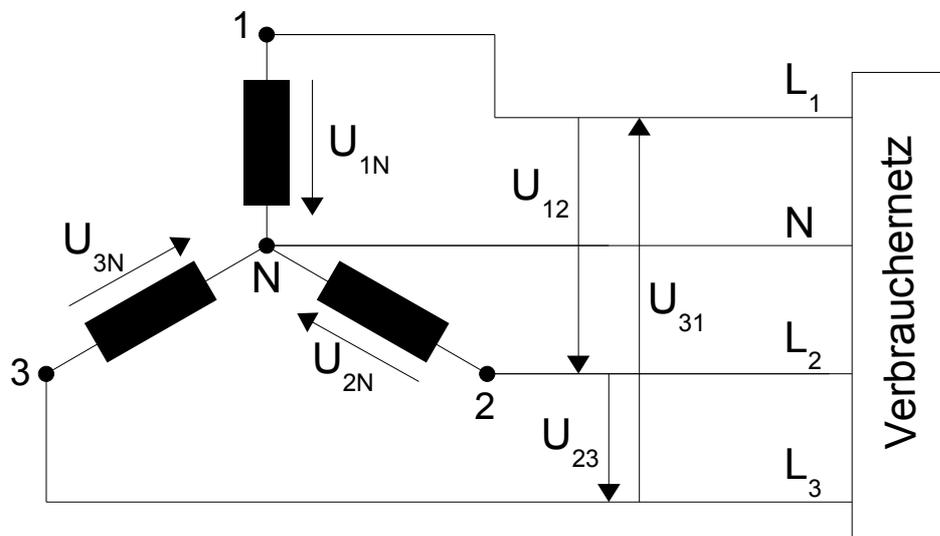


Abbildung 3: Sternschaltung des Generators.

Die in den Wicklungen induzierten Generatorspannungen  $\underline{U}_{1N}$ ,  $\underline{U}_{2N}$  und  $\underline{U}_{3N}$  heißen hier Sternspannungen (*line-to-neutral voltage*) bzw. allgemein **Strangspannungen**.

Die sog. **Außenspannungen** (*line-to-line voltage*), die zwischen den 3 Phasen auftreten, sind:

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{1N} - \underline{U}_{2N} \qquad \underline{U}_{23} = \underline{U}_{2N} - \underline{U}_{3N} \qquad \underline{U}_{31} = \underline{U}_{3N} - \underline{U}_{1N}$$

Normalerweise sind die Beträge bzw. Effektivwerte der Strangspannungen gleich und damit auch die der Außenspannungen:

$$U_{1N} = U_{2N} = U_{3N} = U_{strang} \qquad \text{und} \qquad U_{12} = U_{23} = U_{31} = U$$

### 1.3. Dreieckschaltung des Generators und Stromweiterleitung mit 3 Leitungen

Werden jeweils zwei Generatorwicklungen miteinander verbunden, erhält man die sog. Dreieckschaltung des Generators (*delta-connected system or Δ-connected system*):

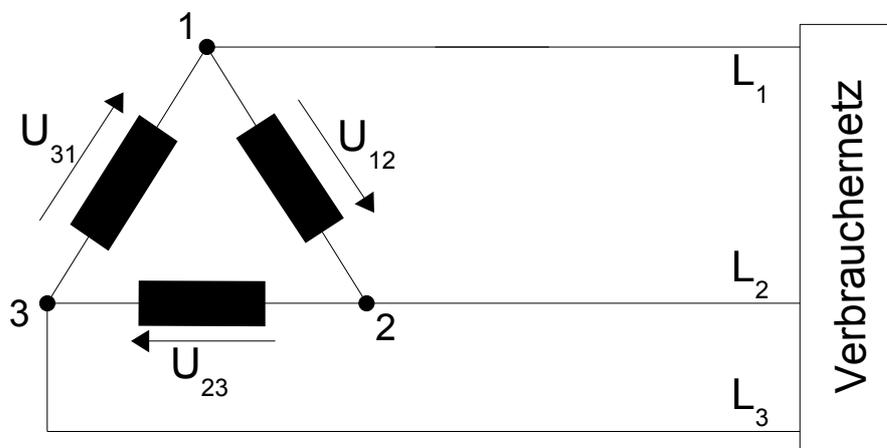
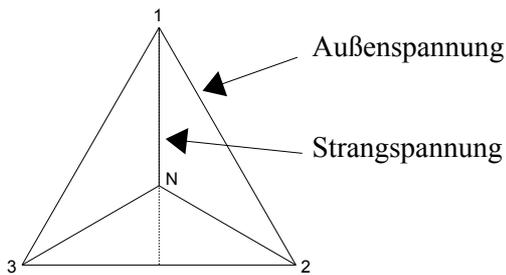


Abbildung 4: Dreieckschaltung der Generatorwicklungen.

Hier entsprechen die Strangspannungen den Außenspannungen, d. h.  $U_{strang, Dreieck} = U$ . Ein Bezugspunkt fehlt.

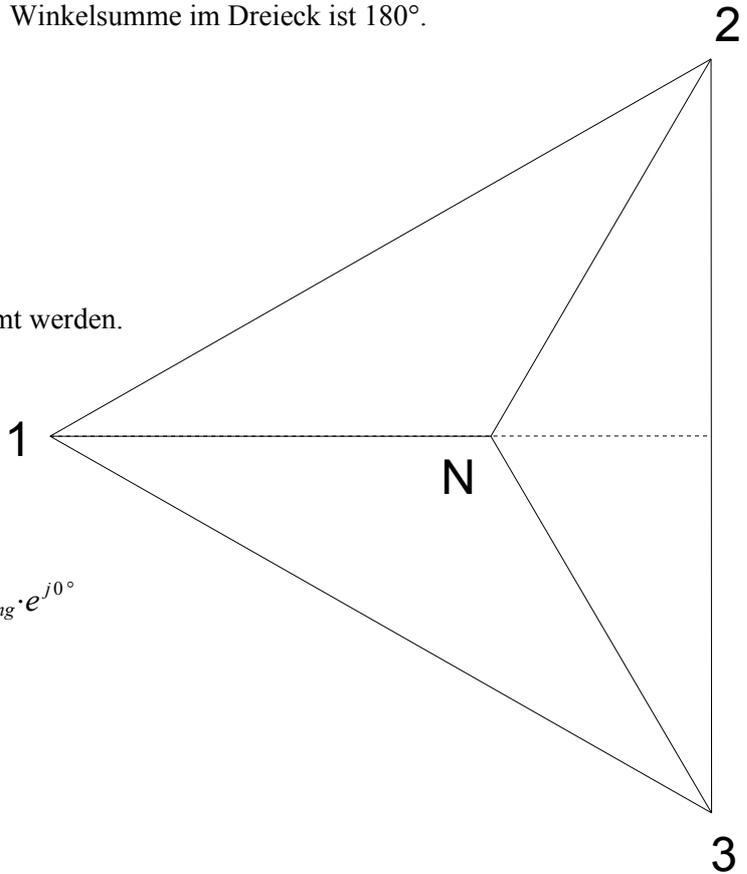
### I.4. Strang- und Außenleiterspannungen in der Sternschaltung als Zeigergrößen



Winkelsumme im Dreieck ist 180°.

Die Beziehung zwischen den Strang- und den Außenspannungen können geometrisch bestimmt werden.

Das Diagramm wird gegenüber der Skizze gekippt, damit der Zeiger der Strangspannung  $\underline{U}_{1N}$  die zeichnerische Richtung 0° besitzt.



Zeichnen Sie die Pfeilspitzen der 3 Strang- und der 3 Außenspannungen in das nebenstehende Zeigerdiagramm, wenn:  $\underline{U}_{1N} = U_{strang} \cdot e^{j0^\circ}$

Ergänzen Sie folgendes:

Strangspannungen:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1N} &= U_{strang} \cdot e^{j0^\circ} &= \\ \underline{U}_{2N} &= U_{strang} \cdot e &= \\ \underline{U}_{3N} &= U_{strang} \cdot e &= \\ \underline{U}_{1N} + \underline{U}_{2N} + \underline{U}_{3N} &= \end{aligned}$$

Bestimmen Sie mittels Winkelbeziehungen und/oder Pythagoras den Effektivwert (Betrag der Zeiger) der Außenleiterspannungen:

$$U = U_{12} = U_{23} = U_{31} = \quad \cdot U_{strang}$$

Wie groß ist der Effektivwert der Außenspannung, wenn die Strangspannung  $\underline{U}_{1N} = 230 \text{ V}$  ?

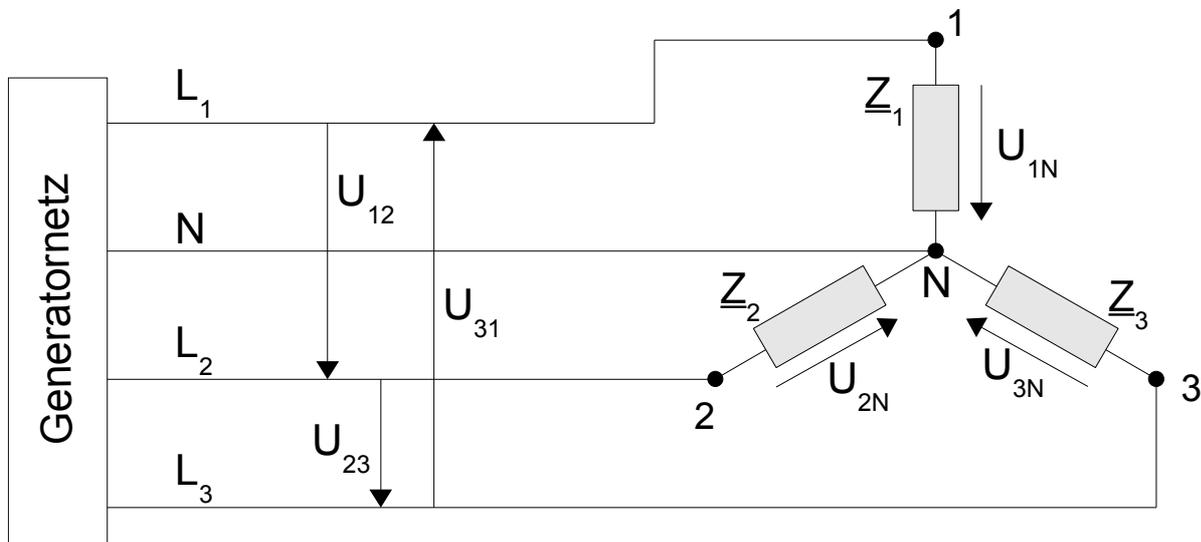
$$\implies U =$$

Außenspannungen:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} &= U_{strang} \cdot e &= \\ \underline{U}_{23} &= U_{strang} \cdot e &= \\ \underline{U}_{31} &= U_{strang} \cdot e &= \\ \underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} &= \end{aligned}$$

### 1.5. Sternschaltung des Verbrauchers mit angeschlossenem Neutraleiter

Der Gesamtverbraucher besteht aus drei einzelnen, in der Regel komplexen Strangverbrauchern  $Z_1$ ,  $Z_2$  und  $Z_3$ . Es sind die drei Phasen und der Neutraleiter mit dem Verbraucher verbunden => Vierleitersystem.



Ergänzen Sie die fehlenden Pfeile der Ströme in der Zeichnung.

Laut Definition werden die positiven Richtungen der Leiterströme von der Quelle zum Verbraucher hin definiert. Wird der positive Strom im Neutraleiter vom Verbraucher zur Quelle definiert, folgt (Knotenregel):  $I_1 + I_2 + I_3 = I_N$

#### 1.5.1. Symmetrische Last

Eine symmetrische Last (*balanced three-phase load*) liegt vor, wenn alle drei komplexen Verbraucher/Strang-Impedanzen identisch sind, d. h. wenn

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$$

Dadurch werden alle Ströme vom Betrag her gleich groß und zusätzlich sind die Phasenverschiebungen zwischen den Strömen und den jeweiligen Strangspannungen identisch.

$$\implies I_1 + I_2 + I_3 = I_N = 0$$

$\implies$  Im Neutraleiter fließt kein Strom !

In der Theorie! Praktisch gibt es keine absolut gleichen Verbraucherimpedanzen.

#### 1.5.2. Asymmetrische Last

Eine asymmetrische Last (*unbalanced three-phase load*) liegt vor, wenn mindestens eine der drei komplexen Verbraucher/Strang-Impedanzen sich von den anderen unterscheidet, d. h. wenn

$$Z_1 \neq Z_2 = Z_3 \quad \text{oder} \quad Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$$

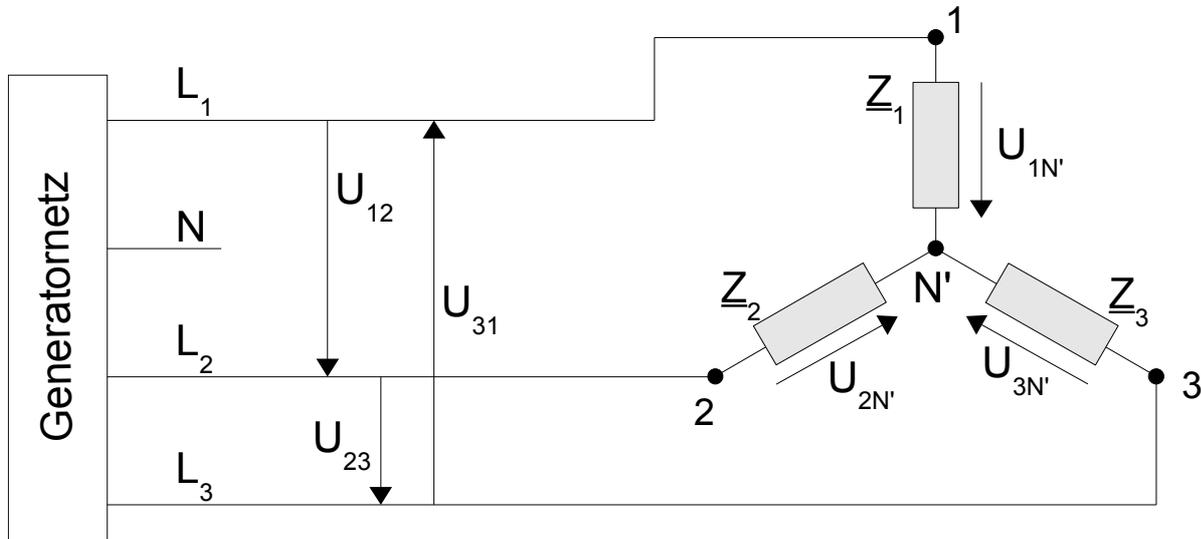
Da sich mindestens ein Strom sowohl phasen- als auch betragsmäßig von den anderen unterscheidet, wird im Neutraleiter ein (Ausgleichs-)Strom fließen.

$$\implies I_1 + I_2 + I_3 = I_N \neq 0$$

$\implies$  Im Neutraleiter fließt ein Strom !

## I.6. Sternschaltung des Verbrauchers ohne Neutralleiter

Um eine der 4 Leitungen einzusparen, wird der Verbraucher-Sternpunkt mit der neuen Bezeichnung  $N'$  nicht mit dem Neutralleiter  $N$  verbunden  $\Rightarrow$  Dreileitersystem.



### I.6.1. Symmetrische Last

Wie oben erwähnt, fließt bei symmetrischer Last kein Strom im Neutralleiter.

Die Verbindung zwischen Sternpunkt und Neutralleiter ist überflüssig und kann ohne Konsequenzen entfallen, was in der Praxis dann umgesetzt wird.

### I.6.2. Asymmetrische Last

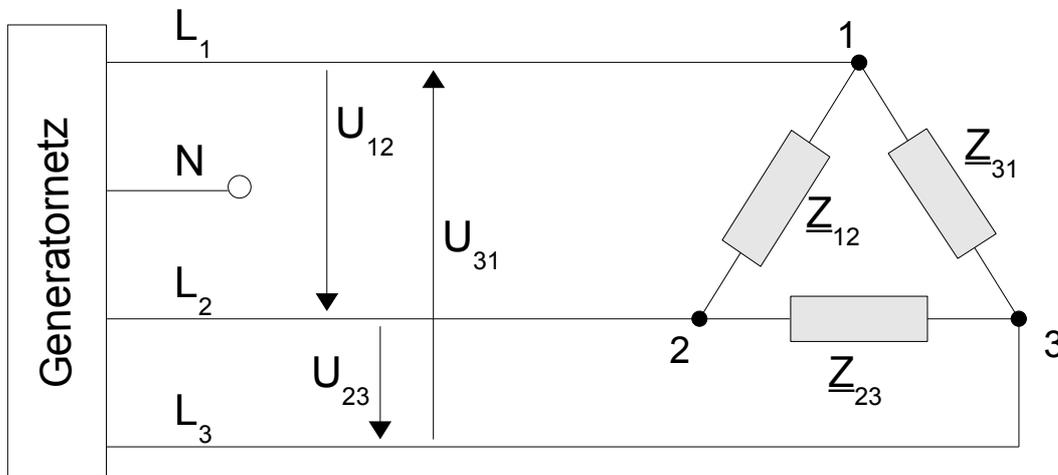
Wird der Neutralleiter bei asymmetrischer Last nicht mit dem Sternpunkt der Last verbunden, ergeben sich Spannungen an den Impedanzen, die sich betragsmäßig deutlich von den normalen Strangspannungen (Sternpunkt mit Neutralleiter verbunden) unterscheiden.

Folge:

$\Rightarrow$  Zwischen dem Verbrauchersternpunkt bzw. -knoten  $N'$  und dem nicht angeschlossenen Neutralleiter  $N$  (weiterhin Bezugspunkt aller Spannungen !) muss es eine Potenzialdifferenz geben, die sog. Sternpunktspannung des Verbrauchers.

### 1.7. Dreieckschaltung des Verbrauchers

Werden die drei Verbraucher-Impedanzen zum Dreieck verbunden, so erübrigt sich generell der Neutralleiter, d. h. es handelt sich verbraucherseitig dann um ein reines Dreileitersystem. Die Strangspannungen entsprechen den Spannungen zwischen den entsprechenden Phasen.



Laut Definition werden die positiven Richtungen der Leiterströme von der Quelle zum Verbraucher hin definiert. Die Leiterströme setzen sich aus jeweils 2 Strangströmen zusammen.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{12} - I_{31} \\ I_2 &= I_{23} - I_{12} \\ I_3 &= I_{31} - I_{23} \end{aligned}$$

Ergänzen Sie zeichnerisch diese 6 Ströme in obiger Schaltung.

Die drei Spannungen der Verbraucher (es sind die Außenspannungen) haben den gleichen Betrag  $U$  und sind jeweils um  $120^\circ$  phasenverschoben. Wenn (anders als in 1.4) die Spannung  $U_{12}$  den Phasenwinkel  $0^\circ$  erhält, folgt:

$$\begin{aligned} U_{12} &= U \cdot e^{j0^\circ} \\ U_{23} &= U \cdot e^{-j120^\circ} \\ U_{31} &= U \cdot e^{-j240^\circ} \end{aligned}$$

Zwischen den Strangsströmen und den Leiterspannungen, die auch Strangspannungen des Verbrauchers sind, gelten folgende Beziehungen:

$$I_{12} = \frac{U_{12}}{Z_{12}} \qquad I_{23} = \frac{U_{23}}{Z_{23}} \qquad I_{31} = \frac{U_{31}}{Z_{31}}$$

#### 1.7.1. Symmetrische Last

Bei symmetrischer Last (s. o.) sind alle drei komplexen Verbraucher/Strang-Impedanzen identisch.  
 $\implies Z_{12} = Z_{23} = Z_{31} = Z$

Dadurch werden alle Strangströme vom Betrag her gleich groß und zusätzlich sind die Phasenverschiebungen zwischen den Strömen und den jeweiligen Strangspannungen identisch. Die Strangströme sind jeweils um  $120^\circ$  phasenverschoben.

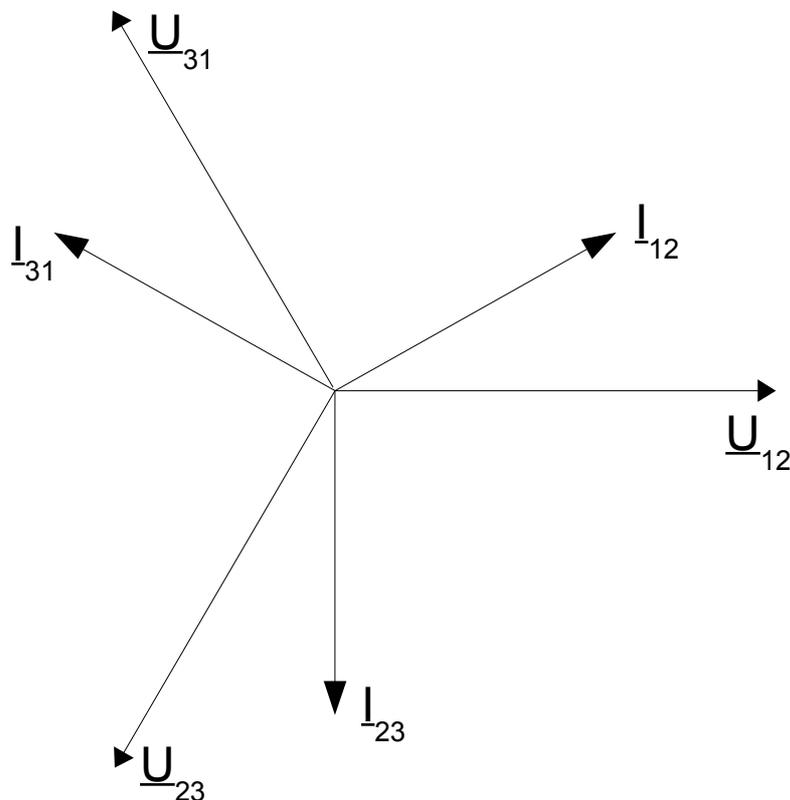
$$\implies I_{12} + I_{23} + I_{31} = I_{strang} \qquad (\text{Beträge der Strangströme})$$

$\implies I_1 + I_2 + I_3 = I$  (Beträge der Leiterströme)

$\implies$  Zeigerdiagramm der Ströme:

Aufgrund derselben Geometrie wie in Abschnitt 1.4 gilt für die Beträge der symmetrischen Strangströme  $I_{strang}$  und den symmetrischen Leiterströmen  $I$  :

$$I = \sqrt{3} \cdot I_{strang}$$



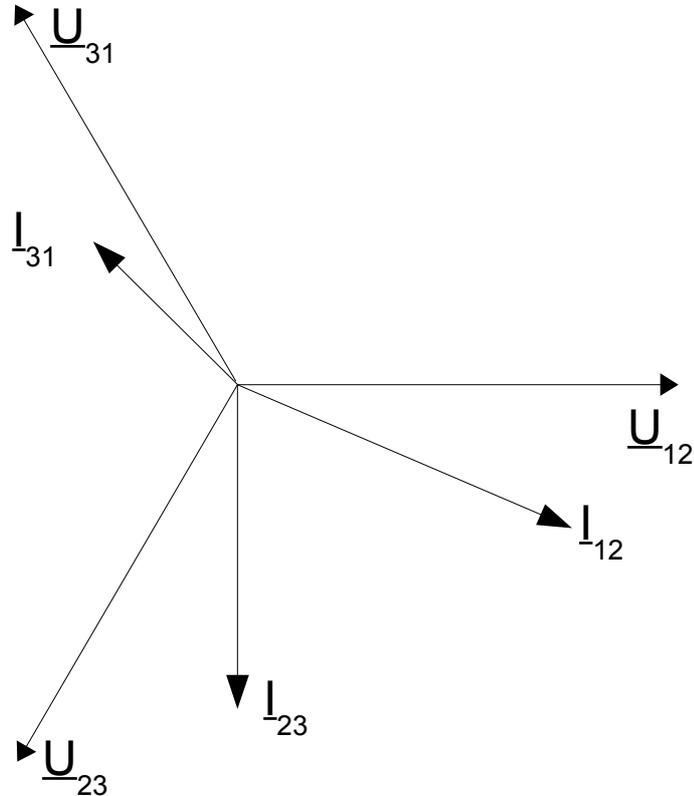
**1.7.2. Asymmetrische Last**

Bei asymmetrischer Last unterscheidet sich mindestens eine der drei komplexen Verbraucher/Strang-Impedanzen sich von den anderen, d. h.

$$\underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 \text{ oder } \underline{Z}_1 \neq \underline{Z}_2 \neq \underline{Z}_3 .$$

Die Phasenverschiebungen zwischen den Strangspannungen und den jeweiligen Strangströmen sowie die Beträge der Strangströme sind dann unterschiedlich.

Nebenstehend das Zeigerdiagramm für den Fall asymmetrischer Last.



## 1.8. Leistung bei symmetrischem Verbraucher

Bei symmetrischem Verbraucher sind die 3 Strangimpedanzen gleich:  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$ .

Da die Amplituden der drei Strangspannungen gleich sind, sind wegen der gleichen Impedanzen auch die Amplituden der Strangströme und demzufolge auch die Phasenverschiebungen zwischen den Strangspannungen und den jeweiligen Strangströmen gleich.

$$\implies \hat{i}_{strang,1} = \hat{i}_{strang,2} = \hat{i}_{strang,3} = \hat{i}_{strang}$$

$$\implies \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi$$

Die zeitlichen Augenblicksleistungen der 3 Phasen sind damit:

$$p_1(t) = \hat{u}_{strang} \cdot \sin(\omega t) \cdot \hat{i}_{strang} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$p_2(t) = \hat{u}_{strang} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \hat{i}_{strang} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ + \varphi)$$

$$p_3(t) = \hat{u}_{strang} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \cdot \hat{i}_{strang} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ + \varphi)$$

Durch trigonometrische Umformung erhält man:

$$p_1(t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang} \cdot (\cos \varphi - \cos(2 \cdot \omega t + \varphi))$$

$$p_2(t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang} \cdot (\cos \varphi - \cos(2 \cdot \omega t - 240^\circ + \varphi))$$

$$p_3(t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang} \cdot (\cos \varphi - \cos(2 \cdot \omega t - 480^\circ + \varphi))$$

Die Summe der drei Leistungen ist, da sich die drei zeitabhängigen Terme aufheben, eine Konstante:

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = \frac{3}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang} \cdot \cos \varphi = \mathbf{Konstante}$$

Man braucht folglich nur die Leistung eines Strangs oder die Stromamplitude sowie die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom eines Strangs bestimmen, um auf einfachem Wege zur Gesamtleistung zu kommen.

Wie in der Wechselstromrechnung (letztes Kapitel) sind die effektiven Leistungen eines Stranges zu bestimmen:

$$\bar{P}_1 = \bar{P}_2 = \bar{P}_3 = \bar{P} = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang} \cdot \cos \varphi$$

Die effektive Gesamtleistung ist die Summe dieser Einzelleistungen, d. h. man erhält wie oben dieselbe Konstante:

$$\bar{P}_{ges} = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{P}_3 = \frac{3}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang} \cdot \cos \varphi$$

## I.9. Leistung bei asymmetrischem Verbraucher

Bei asymmetrischem Verbraucher sind mindestens 2 der 3 Strangimpedanzen ungleich.

Die Amplituden der drei Strangspannungen sind zwar weiterhin gleich, jedoch werden die Amplituden und Phasenverschiebungen der 3 Strangströme in der Regel ungleich sein.

$$\implies \hat{i}_{strang,1} \neq \hat{i}_{strang,2} \neq \hat{i}_{strang,3}$$

$$\implies \varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$$

Zur Berechnung der Gesamtleistung muss für jeden Strang die Leistung berechnet werden. Analog zur obigen Umformung erhält man:

$$p_1(t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang,1} \cdot (\cos \varphi_1 - \cos(2 \cdot \omega t + \varphi_1))$$

$$p_2(t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang,2} \cdot (\cos \varphi_2 - \cos(2 \cdot \omega t - 240^\circ + \varphi_2))$$

$$p_3(t) = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang,3} \cdot (\cos \varphi_3 - \cos(2 \cdot \omega t - 480^\circ + \varphi_3))$$

Die momentane Gesamtleistung erhält man durch Addition der zeitlichen Einzelleistungen. Die momentane Gesamtleistung ist wie beim Wechselstrom (1-phasiges System) zeitlich abhängig. Man erhält keine Konstante.

Die mittleren, d. h. die effektiven Strangleistungen sind:

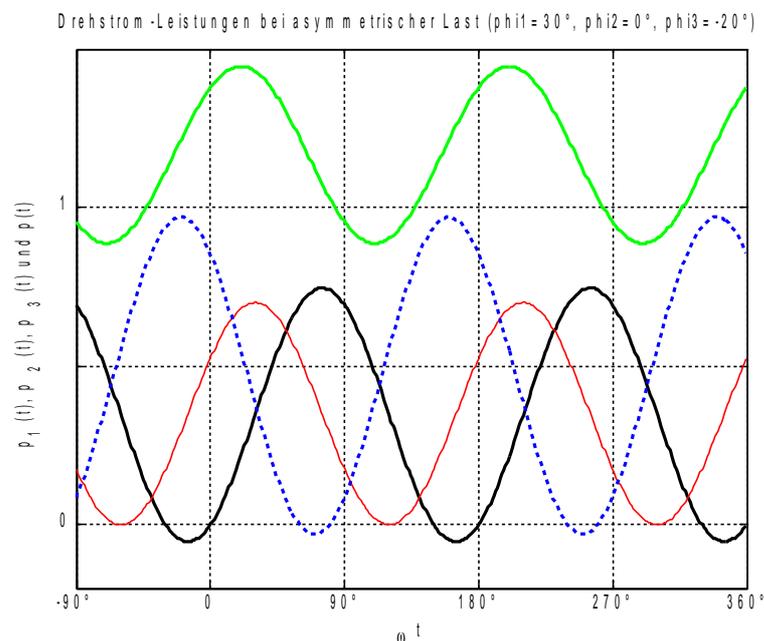
$$\bar{P}_1 = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang,1} \cdot \cos \varphi_1 = U_{Strang,1} \cdot I_{Strang,1} \cdot \cos \varphi_1$$

$$\bar{P}_2 = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang,2} \cdot \cos \varphi_2$$

$$\bar{P}_3 = \frac{1}{2} \cdot \hat{u}_{strang} \cdot \hat{i}_{strang,3} \cdot \cos \varphi_3$$

Die mittlere Gesamtleistung ist die Addition der effektiven Strangleistungen.

$$\bar{P}_{ges} = \bar{P}_1 + \bar{P}_2 + \bar{P}_3$$



## 2. Laboraufbau

Aus Sicherheitsgründen besteht das zu vermessende Drehstromsystem aus Spannungen kleiner Amplitude. Die drei Phasen des Versuchsdrehstromsystems werden jeweils durch Transformatoren aus den im Elektrolabor vorhandenen Drehstromnetz zur Verfügung gestellt. Sie benötigen 3 Netzsteckertrafos, die Sie richtig verwenden bzw. zusammenschalten.

Mit diesen drei Versorgungsspannungen versorgen Sie die Mess- und Versuchsplatine, auf der Sie die unterschiedlichen Drehstromverbrauchersysteme aufbauen und vermessen.

Beachten Sie bitte, dass die Sinusspannungen der 3 Phasen aufgrund leistungsstarker elektronisch angesteuerter Verbraucher im Gebäude und seiner Umgebung (Lüftungsanlagen, Baustelle des Krankenhauses, etc. ) relativ stark verzerrt sind, d. h. einen hohen Anteil an Oberwellen besitzen. Dadurch sind die Messsignale teilweise etwas schwierig zu interpretieren. Beispielsweise kann der Nulldurchgang des Signals nicht korrekt ablesbar sein und muss durch gedankliche Interpolation mit einem Sinusverlauf abgeschätzt werden.

Durch Filtern der Spannungen des Drehstromnetzes könnten diese Oberwellen beseitigt werden, worauf bewusst verzichtet wurde um den Versuch möglichst realitätsnah zu machen.

Falls Sie die Störungen zu extrem empfinden, können Sie das Drehstromsystem des Versuchs ohne Störungen simulieren und erhalten die in der Theorie zu erwartenden „sauberen“ Signalverläufe.

### 2.1. Versuchsplatine

Siehe Originalhardware.

## 3. Versuche

### 3.1. Aufbau des Drehstromsystems

Schließen Sie die Sekundärspannungen der Netzsteckertrafos an Ihre Versuchsplatine an. Die drei gelben LEDs müßten leuchten.

#### 3.1.1. Effektivwerte der Spannungen des Drehstromsystems

Messen Sie mittels Multimeter die Effektivwerte der drei Spannungen Ihres Drehstromsystems.

$$U_{1N} = \quad V \qquad U_{2N} = \quad V \qquad U_{3N} = \quad V$$

#### 3.1.2. Spitzenwerte der Spannungen des Drehstromsystems

Bestimmen Sie mittels Oszilloskop die Spitzenwerte der drei Spannungen Ihres Drehstromsystems.

$$U_{1N} = \quad V \qquad U_{2N} = \quad V \qquad U_{3N} = \quad V$$

#### 3.1.3. Phasenbeziehungen der Spannungen des Drehstromsystem

Überprüfen Sie, ob die Phasenbeziehung zwischen den Drehstromnetzspannungen folgender Definition entsprechen. Gegebenenfalls korrigieren Sie Ihren Aufbau. Ergänzen Sie die Effektivwerte.

$$\underline{U}_{1N} = \quad V \cdot e^{j0^\circ} \qquad \underline{U}_{2N} = \quad V \cdot e^{-j \cdot 120^\circ} \qquad \underline{U}_{3N} = \quad V \cdot e^{-j \cdot 240^\circ}$$

#### 3.1.4. Frequenz der Spannungen des Drehstromsystem

Bestimmen Sie die Frequenz Ihres Drehstromsystems.  $f = \quad \text{Hz}$

#### 3.1.5. Außenspannungen des Drehstromsystems

Überprüfen Sie mit dem **Multimeter !!!**, ob das Verhältnis der Amplituden bzw. der Effektivwerte der Außenspannungen zu den Strangspannungen der Theorie entspricht.

$$U_{12} = \quad V \qquad U_{23} = \quad V \qquad U_{31} = \quad V$$

Warum können Sie mit einem normalen Oszilloskop prinzipiell nicht die drei Außenspannungen des Drehstromsystems anzeigen?

Antwort:

Bestimmen Sie die Verhältnisse der Effektivwerte von Strang- zu Außenspannungen:

$$\frac{U_{12}}{U_{1N}} = \qquad \frac{U_{23}}{U_{2N}} = \qquad \frac{U_{31}}{U_{3N}} =$$



### 3.3. Verbraucher in Sternschaltung mit angeschlossenem Sternpunkt N'

Bauen Sie eine symmetrische Verbraucher-Sternschaltung auf, deren Strangimpedanzen alle denselben Widerstand  $R_1=R_2=R_3=680\ \Omega$  haben. Es handelt sich theoretisch somit um einen symmetrischen Verbraucher

Strangspannungen = Leiterspannungen

Strangströme = Leiterströme

#### 3.3.1. Symmetrischer ohmscher Verbraucher

Bauen Sie einen symmetrischen Drehstromverbraucher in Sternschaltung auf. Die Strangimpedanzen haben alle denselben Wert:  $Z_1=R_1=680\ \Omega$ ,  $Z_2=R_2=680\ \Omega$  und  $Z_3=R_3=680\ \Omega$ .

Stellen Sie gemeinsam die Leiterspannungen  $U_1$ ,  $U_2$  und  $U_3$  auf einem 4-Kanal-Oszilloskop dar. Auf dem 4. Kanal stellen Sie nacheinander die Leiterströme  $I_1$ ,  $I_2$  und  $I_3$  dar.

Entsprechen die Anzeigen Ihren Erwartungen? Warum?

Antwort:

Bestimmen Sie die Effektivwerte der drei Strangströme:

$$I_1 = \quad mA \qquad I_2 = \quad mA \qquad I_3 = \quad mA$$

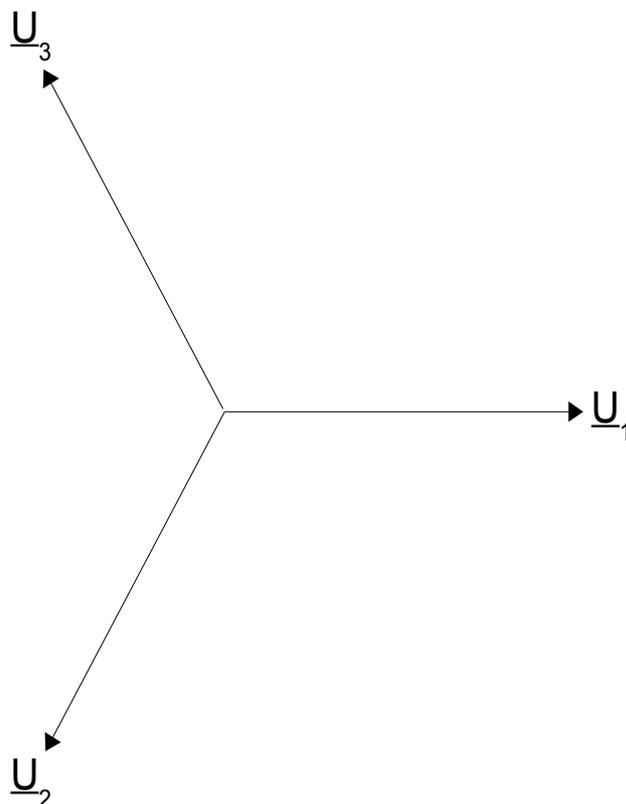
Laut Theorie sollte der Strom zwischen dem Sternpunkt N' des symmetrischen Verbrauchers und dem Nullleiter N bei symmetrischem Drehstromverbraucher (hier drei gleiche ohmsche Widerstände) null sein, d. h.  $I_N = 0$ .

Wie groß ist der Nullleiterstrom (Rückstrom):  $I_N = \quad \mu A$

Warum ist der Nullleiterstrom hier ungleich null?

Antwort:

Zeichnen Sie die Zeiger der Leiter/Strangströme maßstäblich in das Diagramm:



### 3.3.2. Symmetrischer ohmsch/kapazitiver Verbraucher

Realisieren Sie einen symmetrischen Drehstromverbraucher in Sternschaltung, dessen Strangimpedanzen jeweils aus derselben RC-Reihenschaltung bestehen.

Bestimme Sie z. B. die Strangimpedanz:  $Z_1 = R_1 - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C_1} =$

Stellen Sie gemeinsam die Leiterspannungen  $U_1$ ,  $U_2$  und  $U_3$  auf einem 4-Kanal-Oszilloskop dar. Auf dem 4. Kanal stellen Sie nacheinander die Leiterströme  $I_1$ ,  $I_2$  und  $I_3$  dar.

Entsprechen die Anzeigen Ihren Erwartungen? Warum?

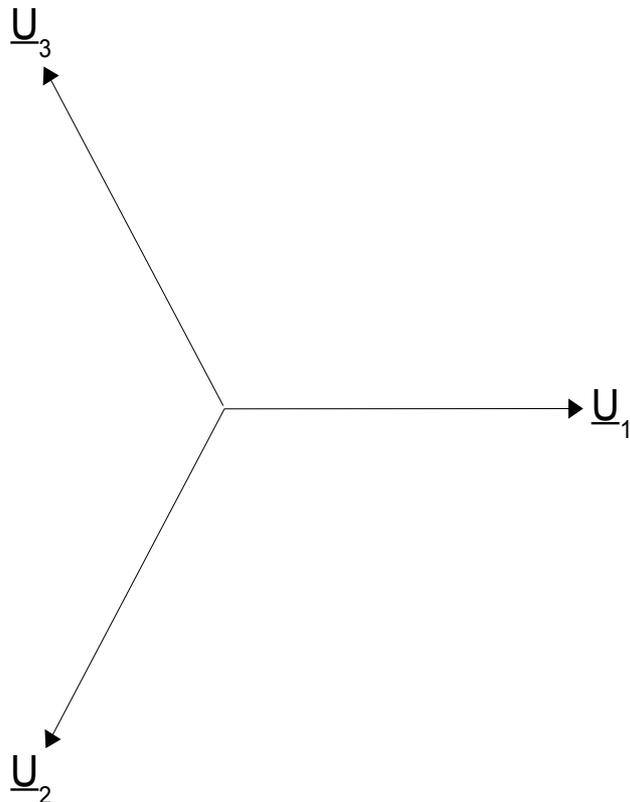
Antwort:

Bestimmen Sie die Effektivwerte der drei Strangströme:

$$I_1 = \quad mA \qquad I_2 = \quad mA \qquad I_3 = \quad mA$$

Wie groß ist der Effektivwert des Nullleiterstrom (Rückstrom):  $I_N = \quad \mu A$

Zeichnen Sie die Zeiger (vgl. Messergebnis aus 3.2) der Leiter/Strangströme maßstäblich in das Diagramm:



### 3.3.3. Asymmetrischer Verbrauchern

#### a) Nullleiterstrom

Wie groß war der Strom im Nullleiter bei symmetrischem ohmschen Verbraucher?

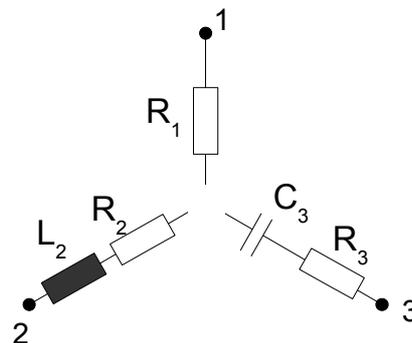
Symmetrischer Drehstromverbraucher:  $I_N = \quad \mu A$

Belassen Sie die rein ohmschen Verbraucher im Strang 1 und im Strang 2. Im Strang 3 soll der Verbraucher aus der Reihenschaltung aus R und C bestehen. Messen Sie an diesem asymmetrischen Drehstromverbraucher den Strom im Nullleiter:

Asymmetrischer Drehstromverbraucher:  $I_N = \quad \mu A$

#### b) Asymmetrische Referenzschaltung

Aufbau des Verbrauchers: Strang 1: R  
 Strang 2: R+L  
 Strang 3: R+C



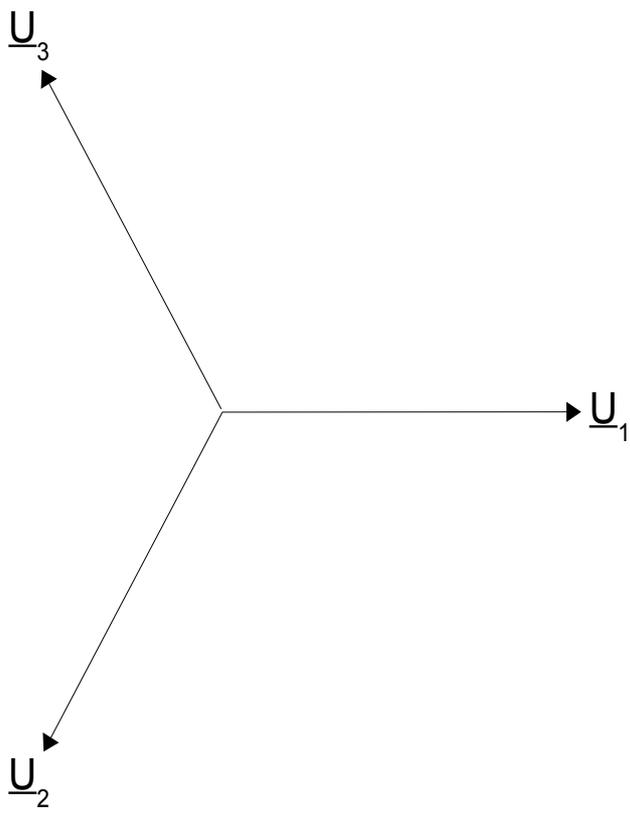
Vergleichen Sie Theorie und Praxis. Bestimmen Sie hierzu rechnerisch und messtechnisch die Ströme der Verbraucherstränge (vgl. 3.3).

Strang	Rechnung		Messung			
	Impedanz	Strangstrom $\underline{I}$	Strom (Effektivwert)	Versatz in ms	Phase	$\underline{I}$ (komplex mit Betrag und Phase)
1						
2						
3						

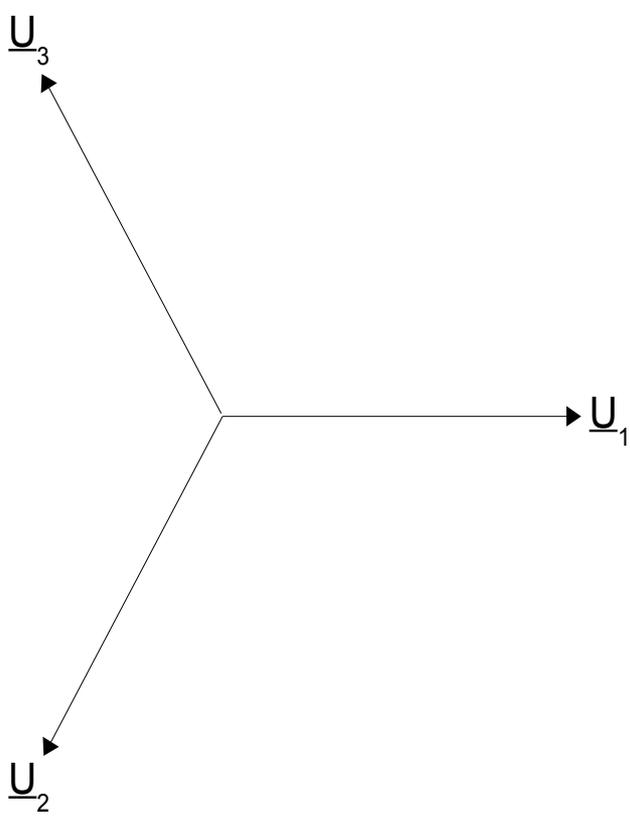
Berechnen und messen Sie an diesem asymmetrischen Drehstromverbraucher den Strom im Nullleiter (z. B: als Spannungsabfall an einem 1 Ω Widerstand). Addieren Sie die oben gemessenen Strangströme:  $\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3$  (jeweils Betrag und Phase)

	Rechnung	Messung	Summe der gemessenen Strangströme
$I_N$			

Zeichnen Sie die Zeiger der Leiter/Strangströme maßstäblich in das Diagramm:



Zeichnen Sie die Zeiger der Leiter/Strangströme aus 3.4.3 (nächste Seite) maßstäblich in das Diagramm:



### 3.4. Verbraucher in Sternschaltung ohne angeschlossenen Sternpunkt N'

#### 3.4.1. Nullpunktspotenzial bei symmetrischem Verbraucher

Messen Sie bei einem ohmschen symmetrischen Verbraucher, dessen Sternpunkt nicht mit dem Nullleiter verbunden ist, das Potenzial des Verbrauchersternpunkts.

Symmetrischer Drehstromverbraucher:  $U_{N'} = V$

#### 3.4.2. Nullpunktspotenzial bei asymmetrischem Verbraucher

Belassen Sie die rein ohmschen Verbraucher im Strang 1 und im Strang 2. Im Strang 3 soll der Verbraucher aus der Reihenschaltung aus R und C bestehen. Messen Sie an diesem asymmetrischen Drehstromverbraucher das Sternpunktspotenzial:

Asymmetrischer Drehstromverbraucher:  $U_{N'} = V$

#### 3.4.3. Asymmetrischer Referenzverbraucher

Aufbau des Verbrauchers: Strang 1: R  
 Strang 2: R+L  
 Strang 3: R+C

Vergleichen Sie Theorie und Praxis. Bestimmen Sie hierzu rechnerisch und messtechnisch die Leiter- bzw. Strangströme:

	Rechnung	Messung			
	<i>Strangstrom</i> (Betrag und Phase)	<i>Strom</i> (Effektivwert)	<i>Versatz in ms</i> (gegenüber der Strangspannung)	<i>Phase</i>	<i>I</i> (komplex mit Betrag und Phase)
<b>I<sub>1</sub></b>					
<b>I<sub>2</sub></b>					
<b>I<sub>3</sub></b>					

Ebenso das Sternpunktspotenzial:

	Rechnung	Messung			
	(Betrag und Phase)	(Effektivwert)	<i>Versatz in ms</i> (gegenüber $\underline{U}_1$ )	<i>Phase</i>	$\underline{U}_N$ (Betrag und Phase)
<b><math>\underline{U}_{N'}</math></b>					

Zeichnen sie auf der vorherigen Seite die Strangströme in das Zeigerdiagramm.

### 3.5. Dreieckschaltung

Strangspannungen  $\neq$  Leiterspannungen  
 Strangspannungen = Außenspannungen

Strangströme  $\neq$  Leiterströme

#### 3.5.1. Symmetrischer ohmscher Verbraucher

Bauen Sie einen rein ohmschen symmetrischen Drehstromverbraucher in Dreieckschaltung auf. Messen Sie die Leiterströme nach Betrag (Effektivwert und Phase gegenüber den Leiterspannungen) und vergleichen Sie die Ströme mit den Leiterströmen des Verbrauchers in Sternschaltung (vgl. 3.3).

	<i>Sternschaltung</i>	<i>Messung Dreieckschaltung</i>			
	<i>Leiterstrom</i> (Betrag und Phase)	<i>Strom</i> (Effektivwert)	<i>Versatz in ms</i> (gegenüber der Leiterspannung)	<i>Phase</i>	<i>I</i> (komplex mit Betrag und Phase)
<b>I<sub>1</sub></b>					
<b>I<sub>2</sub></b>					
<b>I<sub>3</sub></b>					

Was fällt Ihnen auf?

Antwort:

#### 3.5.2. Referenzverbraucher

Bauen Sie den Referenzverbraucher in Dreieckschaltung.

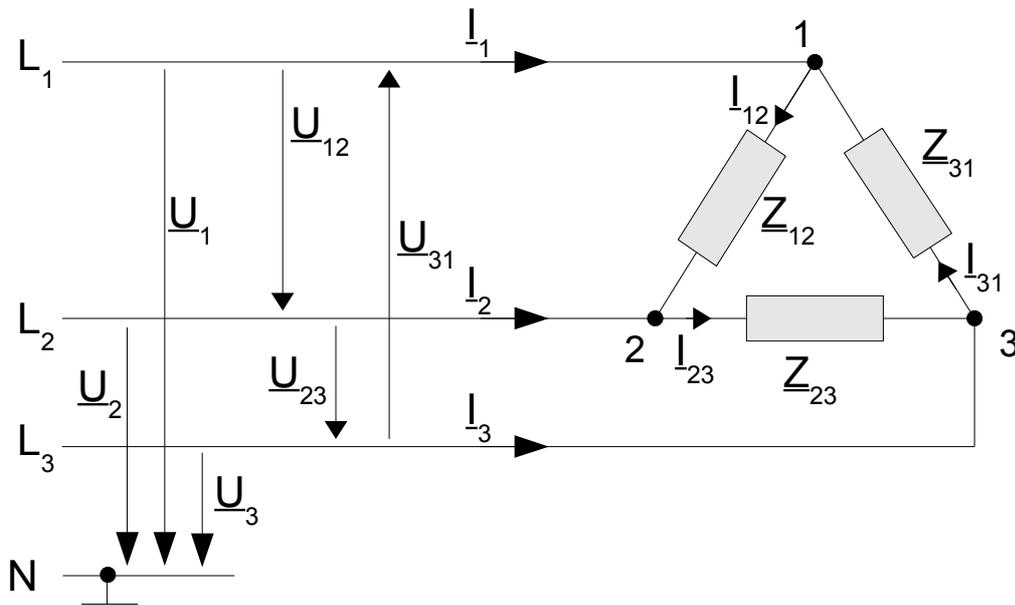
##### a) Leiterströme

Vergleichen Sie Theorie und Praxis. Bestimmen Sie hierzu rechnerisch und messtechnisch die Leiterströme:

	<i>Rechnung</i>	<i>Messung</i>			
	<i>Leiterstrom</i> (Betrag und Phase)	<i>Strom</i> (Effektivwert)	<i>Versatz in ms</i> (gegenüber der Leiterspannung)	<i>Phase</i>	<i>I</i> (komplex mit Betrag und Phase)
<b>I<sub>1</sub></b>					
<b>I<sub>2</sub></b>					
<b>I<sub>3</sub></b>					

**b) Strangströme**

Berechnen Sie aus den gemessenen komplexen Leiterströmen die Strangströme.

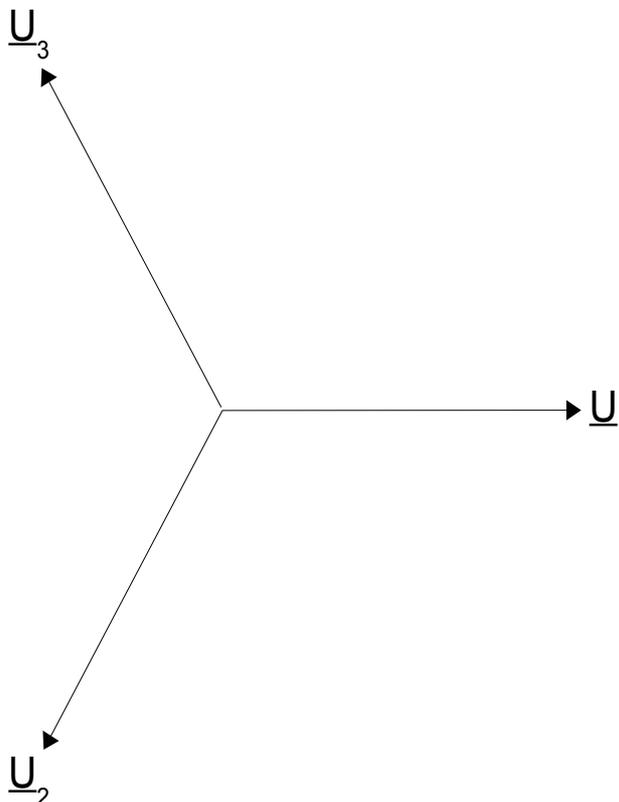


Wie aus obiger Schaltung zu erkennen gilt für den Strangstrom  $I_{12}$  des Teilverbrauchers  $Z_{12}$  :

$$I_{12} = I_1 - I_{31} \quad \text{bzw. für die anderen Strangströme: } I_{23} = I_2 - I_{12} \quad \text{und} \quad I_{31} = I_3 - I_{23}$$

Bestimmen Sie daraus und mit den gemessenen Leiterströmen die mit dem Oszilloskop nicht messbaren Strangströme.

Zeichnen Sie die Zeiger der Leiterströme und der Strangströme maßstäblich in das Diagramm:

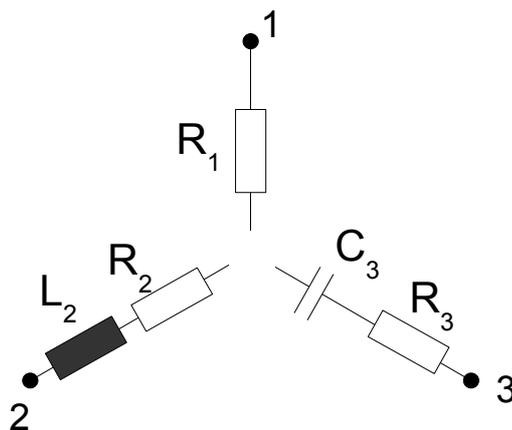


### 3.6. Leiterströme der verschiedenen Verbraucher-Verschaltungen

Als Vergleich dient der Referenz-Drehstromverbraucher mit:

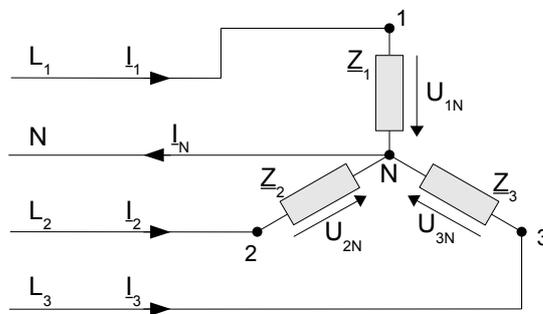
- Strang 1: R
- Strang 2: R+L
- Strang 3: R+C

Zum Vergleich des Effekts der drei Drehstromverbraucherschaltungen tragen Sie die Messergebnisse (Betrag und Phase) in folgende Tabelle:



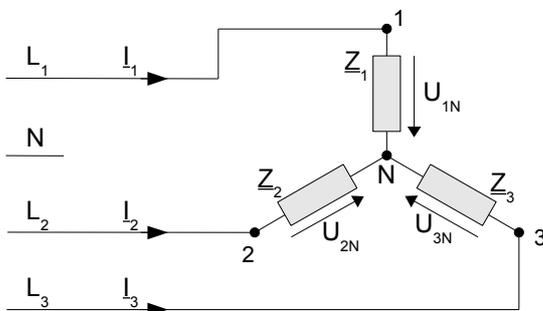
#### Sternschaltung mit Nullleiter

$I_1$	$I_2$	$I_3$



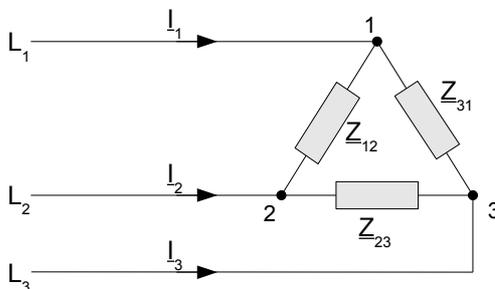
#### Sternschaltung ohne Nullleiter

$I_1$	$I_2$	$I_3$



#### Dreieckschaltung

$I_1$	$I_2$	$I_3$



### 3.7. Leistungen

Weiterhin gelte der Referenzverbraucher. Bestimmen Sie anhand der Messergebnisse bzw. noch durchzuführender Messungen die Schein-, Wirk- und Blindleistung der drei Stränge sowie des gesamten Drehstromverbrauchers in den drei unterschiedlichen Verschaltungen.

#### 3.7.1. Referenz-Verbraucher in Sternschaltung mit angeschlossenem Nullleiter

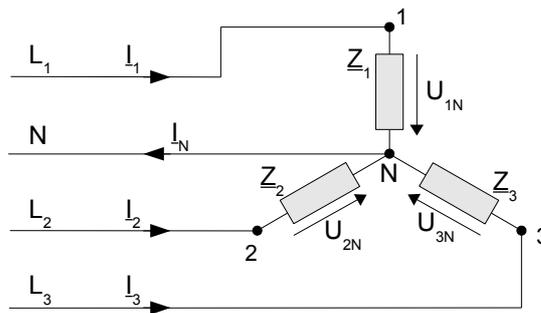
Sternschaltung mit Nullleiter

Scheinleistungen der Stränge:

$\underline{S}_1$	$\underline{S}_2$	$\underline{S}_3$
(Betrag und Phase)	(Betrag und Phase)	(Betrag und Phase)

Gesamt-Schein-, Wirk- und Blindleistung

$\underline{S}$	$\underline{P}$	$\underline{Q}$
(Betrag und Phase)		(mit Vorzeichen)



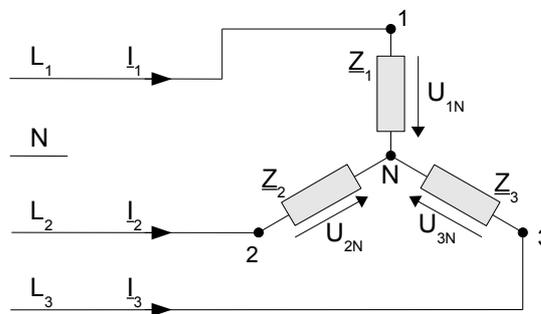
Sternschaltung ohne Nullleiter

Scheinleistungen der Stränge:

$\underline{S}_1$	$\underline{S}_2$	$\underline{S}_3$
(Betrag und Phase)	(Betrag und Phase)	(Betrag und Phase)

Gesamt-Schein-, Wirk- und Blindleistung

$\underline{S}$	$\underline{P}$	$\underline{Q}$
(Betrag und Phase)		(mit Vorzeichen)



Dreieckschaltung

Scheinleistungen der Stränge:

$\underline{S}_1$	$\underline{S}_2$	$\underline{S}_3$
(Betrag und Phase)	(Betrag und Phase)	(Betrag und Phase)

Gesamt-Schein-, Wirk- und Blindleistung

$\underline{S}$	$\underline{P}$	$\underline{Q}$
(Betrag und Phase)		(mit Vorzeichen)

