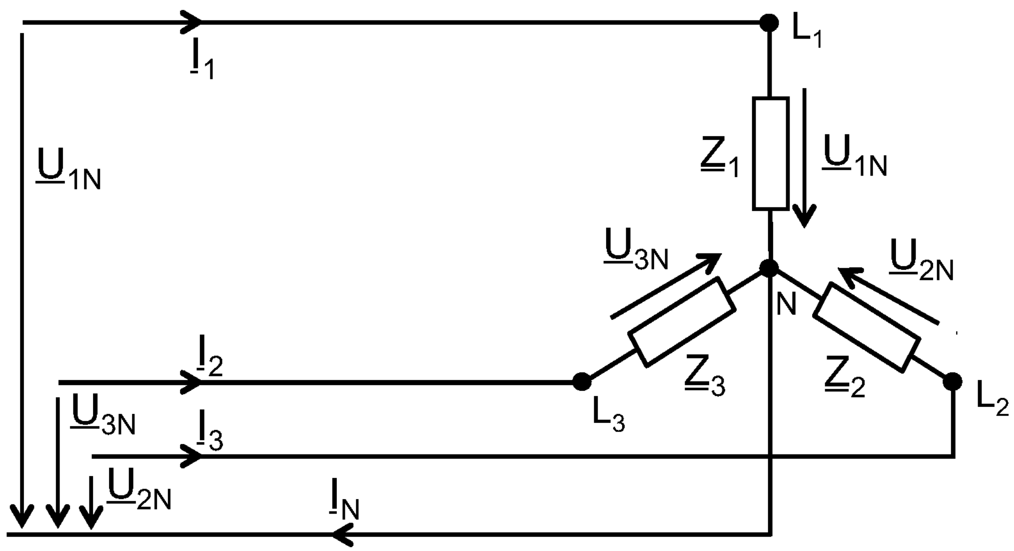
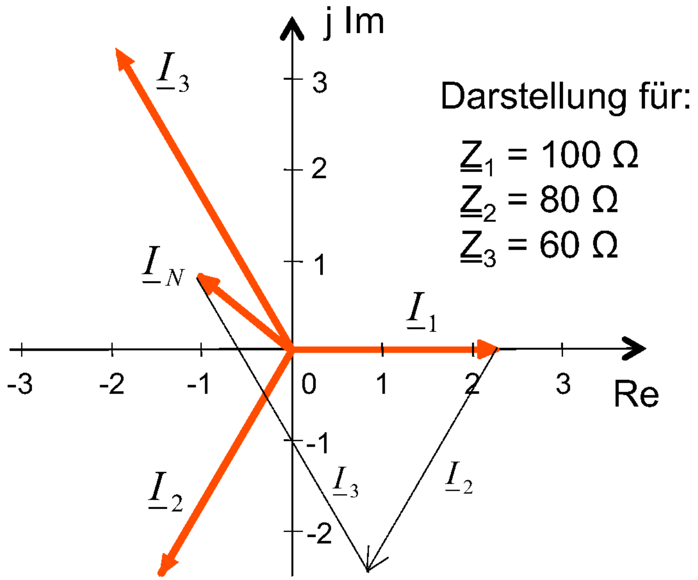
Unsymmetrischer Verbraucher in Sternschaltung mit **verbundenem** Sternpunkt





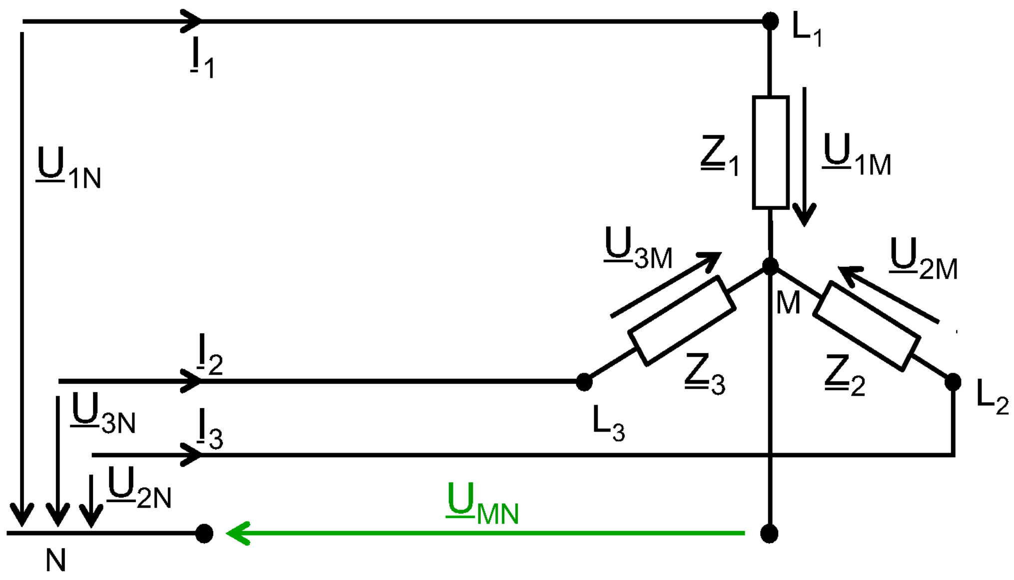
Auch in diesem Fall sind die Strangströme unabhängig voneinander bestimmbar:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{1N}}{\underline{Z}_1} \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{2N}}{\underline{Z}_2} \quad \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{3N}}{\underline{Z}_3}$$

Strom im Nullleiter: $\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \neq 0$

Bei unsymmetrischer Last und angeschlossenem Nullpunkt fließt ein Ausgleichsstrom über den Nullleiter

Unsymmetrischer Verbraucher in Sternschaltung mit **abgetrenntem** Sternpunkt



Der abgetrennte Sternpunkt verhindert das Fließen eines Ausgleichsstromes:

$$\underline{I}_N = 0$$

Symmetrische Drehstromquelle:

$$\underline{U}_{1N} = U_N \cdot e^{j0^\circ}$$

$$\underline{U}_{2N} = U_N \cdot e^{-j120^\circ}$$

$$\underline{U}_{3N} = U_N \cdot e^{j120^\circ}$$

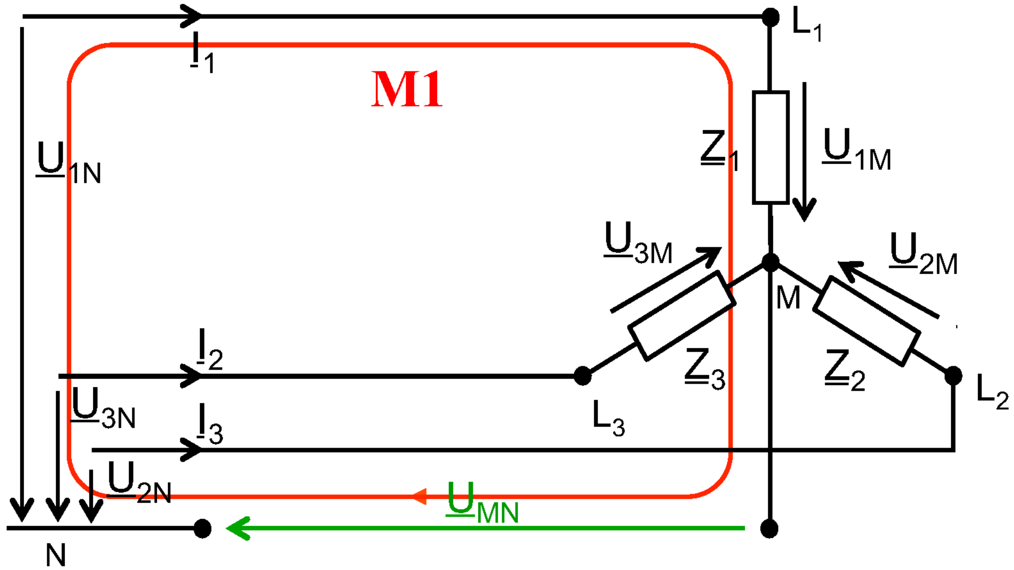
Unsymmetrischer Drehstromverbraucher:

$$\underline{U}_{1M} = \underline{U}_{1N} - \underline{U}_{MN}$$

$$\underline{U}_{2M} = \underline{U}_{2N} - \underline{U}_{MN}$$

$$\underline{U}_{3M} = \underline{U}_{3N} - \underline{U}_{MN}$$

Berechnung der unsymmetrisch belasteten Sternschaltung mit abgetrenntem Sternpunkt



Knotengleichung:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{0}$$

Maschengleichungen:

$$-\underline{U}_{1N} + \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 + \underline{U}_{MN} = \underline{0} \quad \textbf{M1}$$

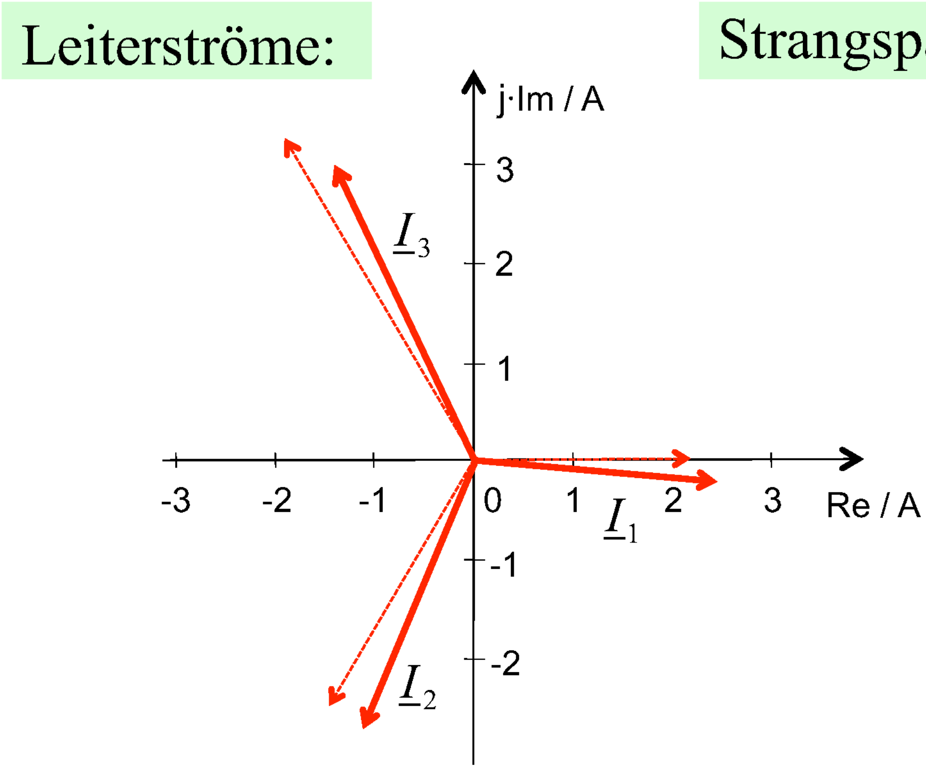
$$-\underline{U}_{2N} + \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 + \underline{U}_{MN} = \underline{0}$$

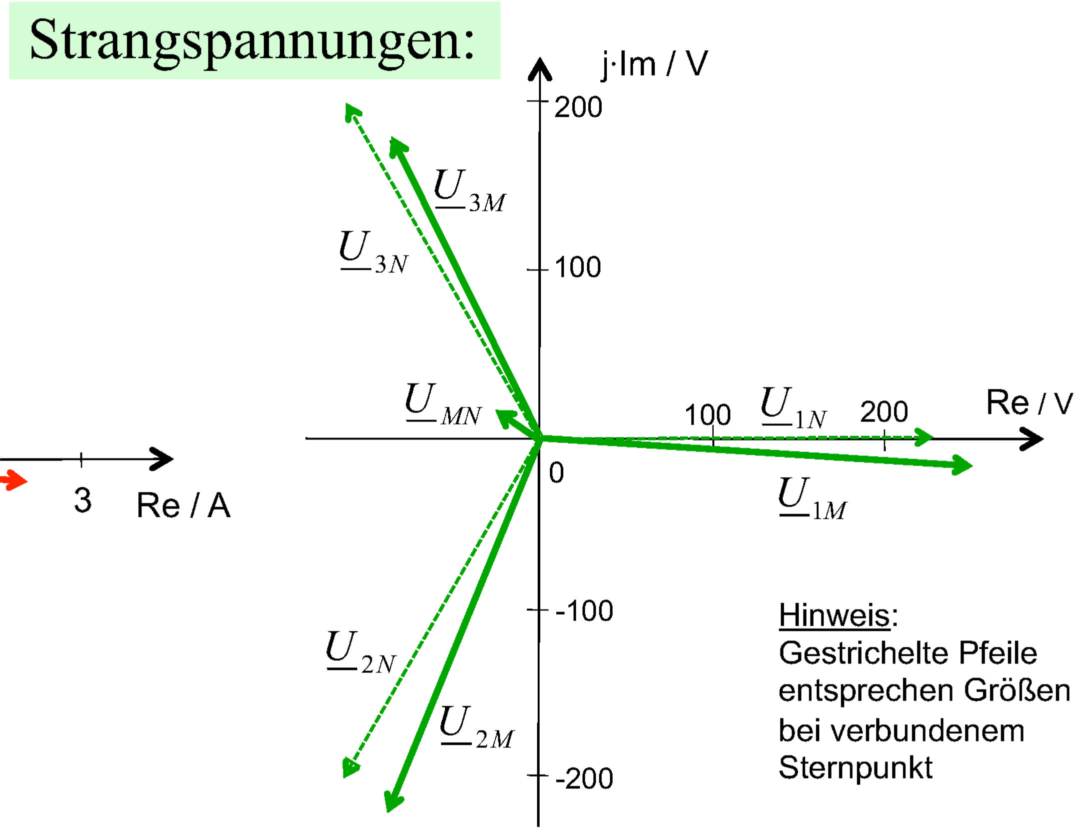
$$-\underline{U}_{3N} + \underline{I}_3 \cdot \underline{Z}_3 + \underline{U}_{MN} = \underline{0}$$

Gleichungssystem mit 4 Unbekannten lösen:

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \underline{Z}_2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{U}_{MN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{1N} \\ \underline{U}_{2N} \\ \underline{U}_{3N} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3, \underline{U}_{MN}$$

Zeigerdiagramme für unsymmetrische Sternschaltung

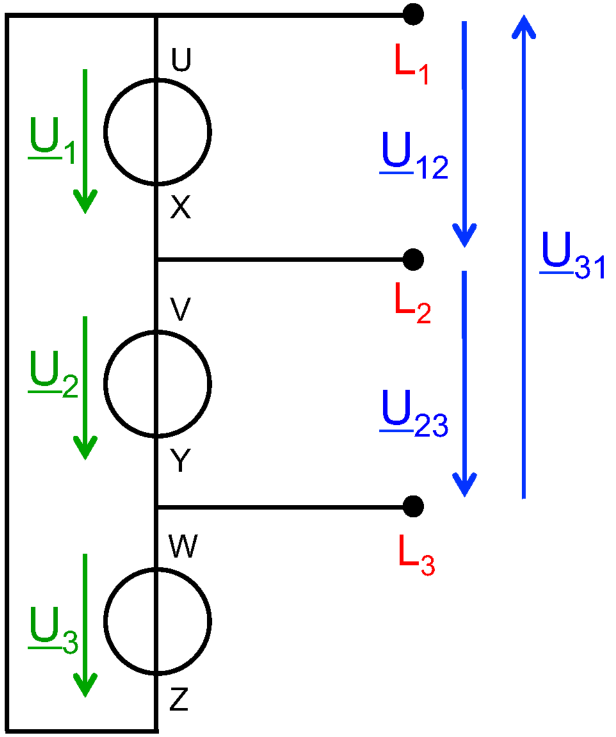




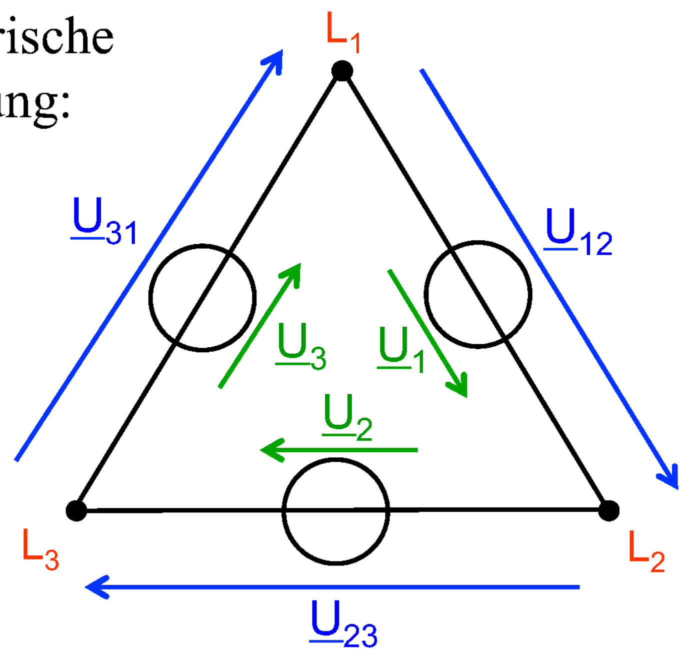
Bei unsymmetrischer Last und abgetrenntem Nullleiter tritt an mindestens einem Verbraucher eine Spannungserhöhung auf !

Dreieckschaltung

Bei der Dreieckschaltung werden drei Spannungsquellen zyklisch so in Reihe geschaltet, dass Strang- und Leiterspannungen identisch sind



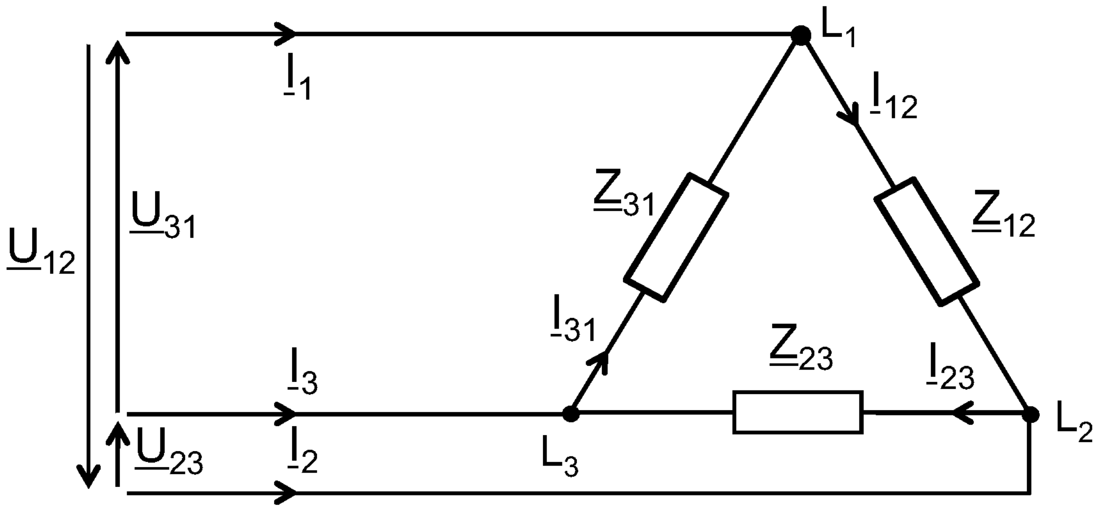
Symmetrische Darstellung:



$\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 \qquad \underline{U}_{23} = \underline{U}_2 \qquad \underline{U}_{31} = \underline{U}_3$

allgemein: $U_{Leiter} = U_{Strang}$

Anschluss von Verbrauchern in Dreieckschaltung



Leiterspannungen = Strangspannungen:

$$\underline{U}_{12} = U_0 \cdot e^{j30°}$$

$$\underline{U}_{23} = U_0 \cdot e^{-j90°}$$

$$\underline{U}_{31} = U_0 \cdot e^{j150°}$$

Strangströme:

$$\underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}_{12}} \qquad \underline{I}_{23} = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}_{23}} \qquad \underline{I}_{31} = \frac{\underline{U}_{31}}{\underline{Z}_{31}}$$

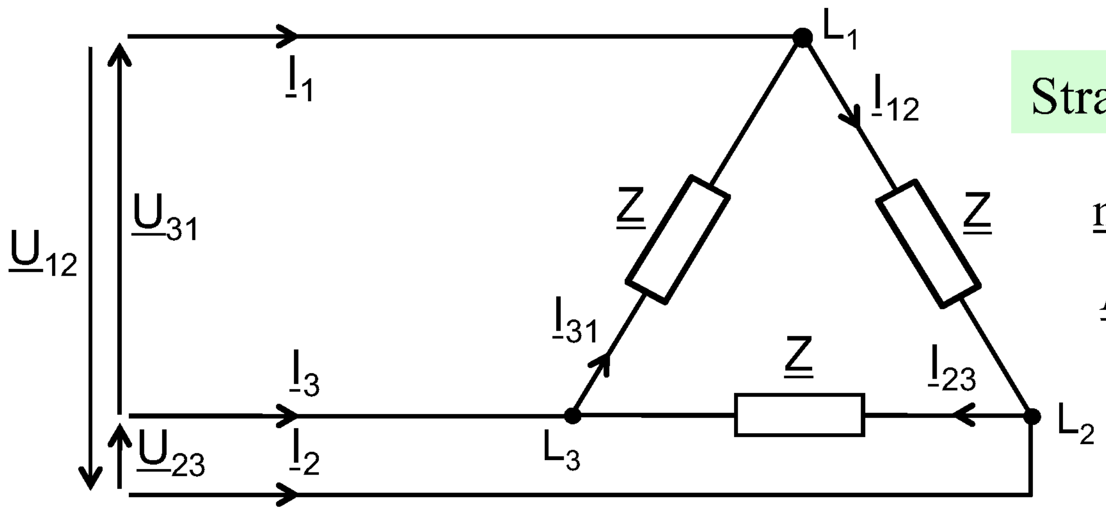
Leiterströme:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12}$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23}$$

Symmetrische Verbraucher in Dreieckschaltung



Strangströme:

$$\underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}} = \underline{I}_0 \cdot e^{j30°}$$

$$\underline{I}_{23} = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}} = \underline{I}_0 \cdot e^{-j90°}$$

$$\underline{I}_{31} = \frac{\underline{U}_{31}}{\underline{Z}} = \underline{I}_0 \cdot e^{j150°}$$

mit:

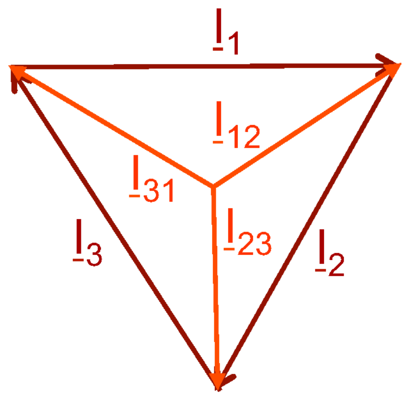
$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_0}{\underline{Z}}$$

Leiterströme:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31} = \underline{I}_0 \cdot (e^{j30°} - e^{j150°}) = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_0 \cdot e^{j0°}$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12} = \underline{I}_0 \cdot (e^{-j90°} - e^{j30°}) = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_0 \cdot e^{-j120°}$$

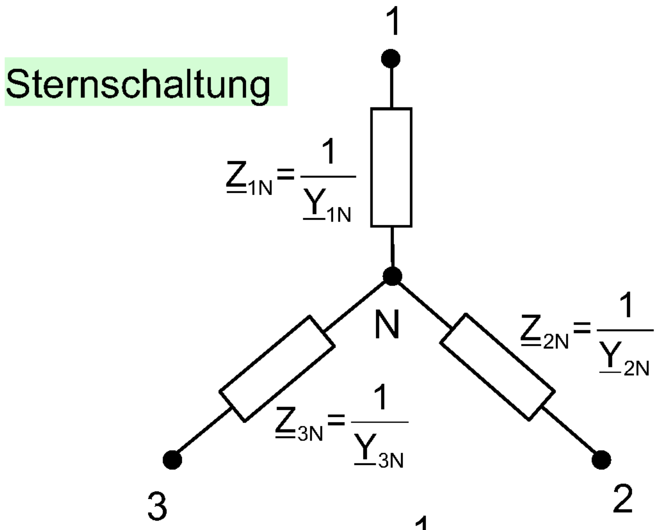
$$\underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23} = \underline{I}_0 \cdot (e^{j150°} - e^{-j90°}) = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_0 \cdot e^{j120°}$$

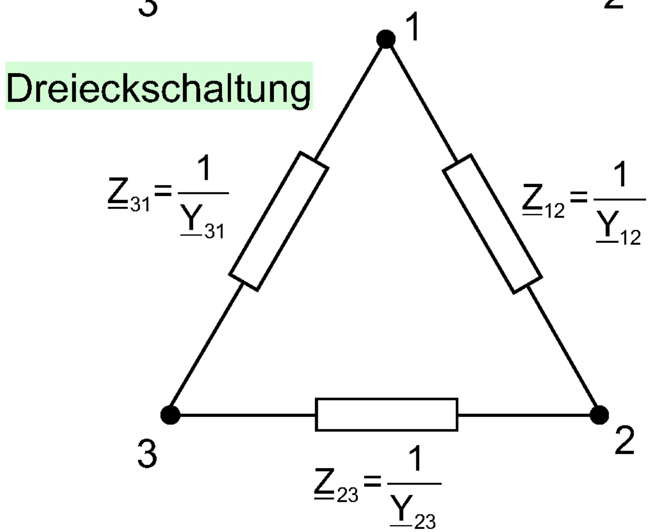


Darstellung für $\underline{Z}$ = Z

$$I_{Leiter} = \sqrt{3} \cdot I_{Strang}$$

Umrechnung zwischen Stern- und Dreieckschaltung





Beliebige Widerstände:

$$\underline{Z}_{1N} = \frac{\underline{Z}_{12} \cdot \underline{Z}_{31}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}$$

$$\underline{Z}_{2N} = \frac{\underline{Z}_{23} \cdot \underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}$$

$$\underline{Z}_{3N} = \frac{\underline{Z}_{31} \cdot \underline{Z}_{23}}{\underline{Z}_{12} + \underline{Z}_{23} + \underline{Z}_{31}}$$

$$\underline{Y}_{12} = \frac{\underline{Y}_{1N} \cdot \underline{Y}_{2N}}{\underline{Y}_{1N} + \underline{Y}_{2N} + \underline{Y}_{3N}}$$

$$\underline{Y}_{23} = \frac{\underline{Y}_{2N} \cdot \underline{Y}_{3N}}{\underline{Y}_{1N} + \underline{Y}_{2N} + \underline{Y}_{3N}}$$

$$\underline{Y}_{31} = \frac{\underline{Y}_{3N} \cdot \underline{Y}_{1N}}{\underline{Y}_{1N} + \underline{Y}_{2N} + \underline{Y}_{3N}}$$

Bei Symmetrie:

$$\underline{Z}_{1N} = \underline{Z}_{2N} = \underline{Z}_{3N}$$
$$= \underline{Z}_{12}/3 = \underline{Z}_{23}/3 = \underline{Z}_{31}/3$$

$$\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{23} = \underline{Y}_{31}$$
$$= \underline{Y}_{1N}/3 = \underline{Y}_{2N}/3 = \underline{Y}_{3N}/3$$

Leistung in symmetrischen Dreiphasensystemen

$$P_{gesamt} = 3 \cdot U_{Strang} \cdot I_{Strang} \cdot \cos\varphi$$

$$Q_{gesamt} = 3 \cdot U_{Strang} \cdot I_{Strang} \cdot \sin\varphi$$

Bezug auf Leitergrößen

Sternschaltung:

$$I_{Strang} = I_{Leiter} \qquad U_{Strang} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_{Leiter}$$

Dreieckschaltung:

$$I_{Strang} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot I_{Leiter} \qquad U_{Strang} = U_{Leiter}$$

$$\Longrightarrow \quad P_{gesamt} = \sqrt{3} \cdot U_{Leiter} \cdot I_{Leiter} \cdot \cos\varphi \qquad mit: \quad \varphi = \varphi_u - \varphi_i$$

$$Q_{gesamt} = \sqrt{3} \cdot U_{Leiter} \cdot I_{Leiter} \cdot \sin\varphi$$

$$\underline{S}_{gesamt} = P + jQ = \sqrt{3} \cdot U_{Leiter} \cdot I_{Leiter} \cdot e^{j\varphi} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{Leiter} \cdot \underline{I}^{*}_{Leiter}$$

Vorteile von Drehstrom

Bei symmetrischer Belastung in Sternschaltung oder bei Verwendung einer Dreieckschaltung ergibt die Summe der Leitungsströme zu jedem Zeitpunkt Null, so dass **kein Rückleiter** benötigt wird.

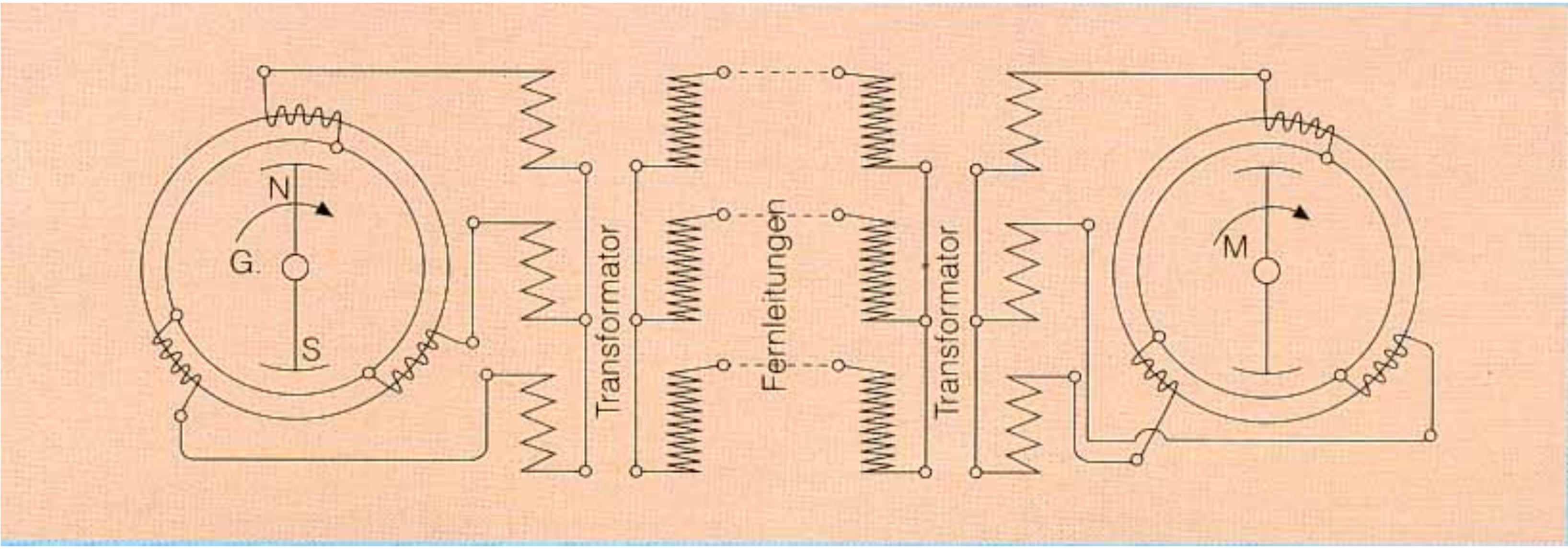
In Sternschaltung stehen zum Anschluss von Verbrauchern **zwei unterschiedliche Spannungen** zur Verfügung (220V und 380V)

Bei der Erzeugung in Generatoren und Wandlung mit Transformatoren entstehen aufgrund der hohen Symmetrie nur **geringe Verluste**

Die um 120° phasenverschobenen Ströme erzeugen ein **Drehfeld zum Antrieb verlustarmer, robuster Motoren**

Prinzip der Drehstromübertragung

Bild aus Patentanmeldung von F. A. Haselwander (1888)



Generator Motor