

ÜBUNGEN ZU „ELEKTRISCHE ENERGIETECHNIK II“

Umdruck I: Stromsysteme, Drehstrom

1. Stromsysteme in der elektrischen Energietechnik

(in Anlehnung an DIN 40 108)

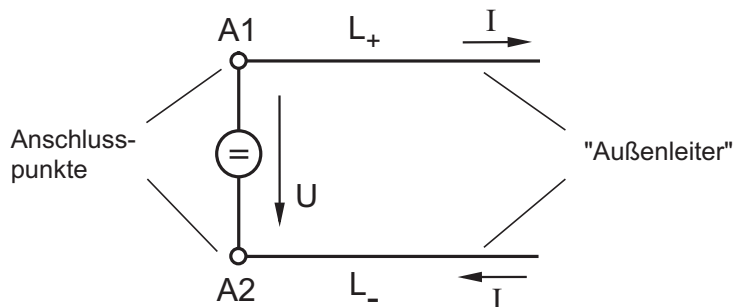
Gleichstromsysteme (1.1)		Wechselstromsysteme (1.2)	
Zweileiter- systeme	Dreileiter- systeme	Einphasen- systeme	Mehrphasen- systeme

1.1 Gleichstromsysteme

In Gleichstromsystemen sind die Augenblickswerte der elektrischen Größen zeitlich *im Wesentlichen* konstant:

Beispiele:

Gleichstrom-Zweileitersystem



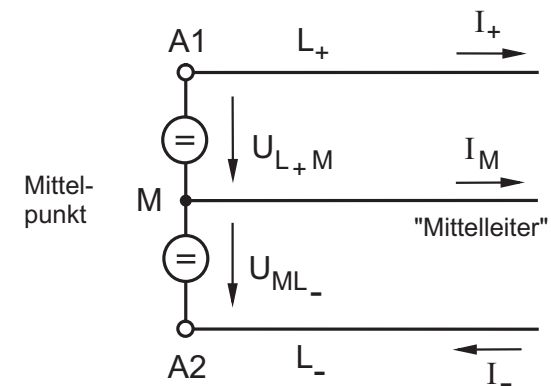
Erzeugung:

Gleichstromgeneratoren, Batterien, meist mittels Halbleiter-Stromrichtern (im einfachsten Fall mittels Gleichrichtern) aus dem Drehstromnetz

Anwendungsbeispiele:

Kleinspannungsnetze in Kraftfahrzeugen, Speisung von Gleichstromantrieben, Erregerwicklung von Synchronmaschinen, Straßenbahnen, Galvanotechnik, Kernphysik, Fernsprechanlagen, Versorgung elektronischer Schaltungen.

Gleichstrom-Dreileitersystem



Erzeugung:

Wie beim Zweileitersystem

Anwendungsbeispiele:

Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ), Versorgung von Elektronikanlagen

1.2 Wechselstromsysteme

Ein Wechselstromsystem ist ein Stromsystem, entlang dessen Strombahnen die Augenblickswerte der elektrischen und magnetischen Größen periodische Funktionen der Zeit sind. Ihr arithmetischer Mittelwert (Gleichwert) ist Null.

Ein *Einphasensystem* ist ein Wechselstromsystem mit je einer Strombahn für Hin- und Rückleitung.

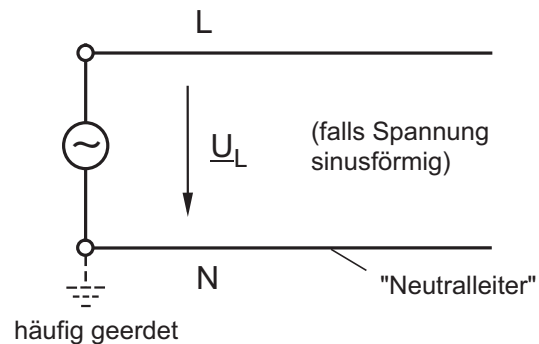
Ein *Mehrphasensystem* ist ein Wechselstromsystem mit mehr als zwei Strombahnen, in und entlang denen die elektrischen und magnetischen Größen mit gleicher Frequenz, mit gleichen (oder angenähert gleichen) Amplituden, mit vorgegebener Phasenfolge und mit gleichen (oder angenähert gleichen) Phasenverschiebungswinkeln verlaufen.

Drehstromsystem ist die übliche Bezeichnung für ein dreiphasiges Wechselstromsystem.

Mit Mehrphasensystemen kann man räumlich umlaufende, elektrische und magnetische Felder erzeugen (Drehfelder).

Beispiele:

Einphasen-Zweileitersystem



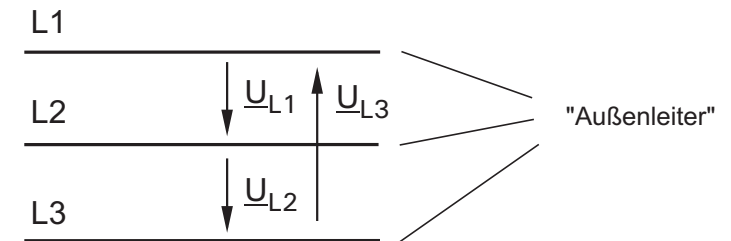
Erzeugung:

Üblicherweise mittels Wechselstromgeneratoren, teilweise mittels Umformern oder Halbleiter-Stromrichtern

Anwendungsbeispiele:

Mitteuropäischer Bahnbetrieb, Fahrleitung 15 kV; Frequenz 16,7 Hz; (eigenes Versorgungsnetz). Allgemeine Stromversorgung im Niederspannungsbereich 230 V, 50 Hz (einphasiger Anschluss an das Drehstromnetz)

Drehstrom-Dreileitersystem



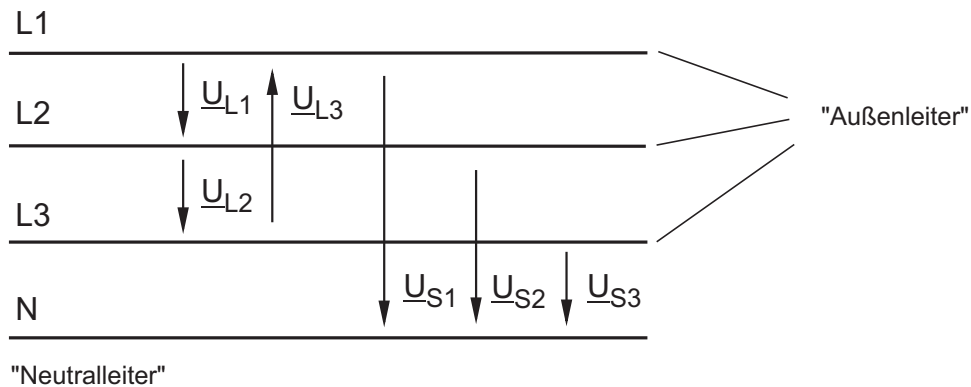
Erzeugung:

Mittels Drehstromgeneratoren; in Sonderfällen mittels Halbleiter-Stromrichtern

Anwendungsbeispiele:

Gesamte allgemeine Stromversorgung (Erzeugung, Fortleitung, Verbrauch), Hochspannungsleitungen und -Netze, z. B. 10 kV; 110 kV; 220 kV; 380 kV. Frequenz in Europa 50 Hz; in Übersee meist 60 Hz

Drehstrom-Vierleitersystem



Erzeugung:

Wie beim Dreileitersystem

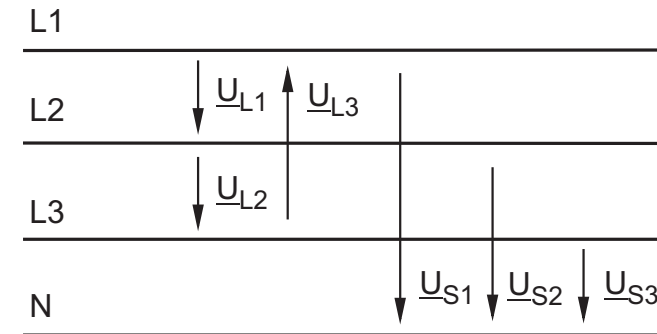
Anwendungsbeispiele:

Allgemeine Niederspannungs-Stromversorgung 400/230 V; 50 Hz

2. Drehstrom

Wegen der überragenden Bedeutung von Drehstromsystemen für die allgemeine Stromversorgung werden diese noch etwas eingehender behandelt.

2.1 Leiter- und Sternspannungen



In einem Drehstromsystem mit gedachtem oder tatsächlich vorhandenem Neutralleiter (N) können zwei Arten von Spannungen definiert werden:

Sternspannungen:

von jedem Außenleiter (L1, L2, L3) zum Neutralleiter (N)

$$U_{S1}, U_{S2}, U_{S3}$$

Leiterspannungen:

von jedem Außenleiter (L1, L2, L3) zum nächsten Außenleiter (L2, L3, L1)

$$U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}$$

In einem *symmetrischen Drehstromsystem* sind die drei Stern- und die drei Leiterspannungen sinusförmig und weisen jeweils gleiche Frequenz und gleiche Amplitude auf, d.h. es gilt

$$U_{L1} = U_{L2} = U_{L3} = U_L \quad (\text{häufig einfach } U)$$

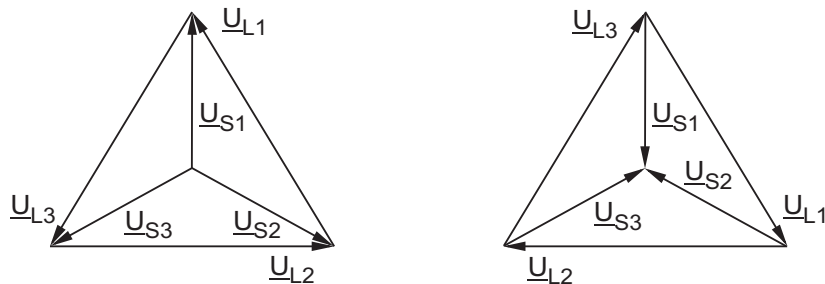
$$U_{S1} = U_{S2} = U_{S3} = U_S .$$

Die Phasenverschiebung zwischen U_{L1} , U_{L2} und U_{L3} sowie zwischen U_{S1} , U_{S2} und U_{S3} beträgt jeweils 120° .

Mit den Beziehungen

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{S1} - \underline{U}_{S2} \quad \underline{U}_{L2} = \underline{U}_{S2} - \underline{U}_{S3} \quad \underline{U}_{L3} = \underline{U}_{S3} - \underline{U}_{S1}$$

sind daher folgende Darstellungen der Stern- und Leiterspannungen in Zeigerdiagrammen möglich:



Aus den Zeigerdiagrammen sind zwei wichtige Aussagen ablesbar:

1. Zwischen den Beträgen (Effektivwerten) der Leiter- und Sternspannungen besteht die Beziehung

$$U_L = \sqrt{3} \cdot U_S \quad \text{z.B. } U_L = 400\text{V} ; U_S = 230\text{V}$$

2. Die Leiterspannungen eilen den gleichnamigen Sternspannungen um 30° vor.

Wichtige Hinweise (vgl. DIN 40 108):

Für Effektivwerte von Wechselstromgrößen werden als Formelzeichen stets Großbuchstaben (z.B. U), für Augenblickswerte Kleinbuchstaben (z.B. u) und für Zeigergrößen unterstrichene Großbuchstaben (z.B. \underline{U}) verwendet.

Der Betrag eines Zeigers bzw. die Zeigerlänge im Zeigerdiagramm entspricht dem Effektivwert:

$$|\underline{U}_S| = U_S = \frac{\hat{u}_S}{\sqrt{2}} \quad \text{bzw.} \quad |\underline{U}_L| = U_L = \frac{\hat{u}_L}{\sqrt{2}} \quad !$$

Drehstromsysteme werden grundsätzlich nach dem Effektivwert der Leiterspannung benannt (z. B. „400 V-Drehstromnetz“!)

2.2 Darstellung als Zeitfunktionen

Bei geeigneter Wahl des Zeitpunktes $t = 0$ können die Spannungen U_{Sv} und U_{Lv} auch als folgende Zeitfunktionen dargestellt werden:

$$\begin{aligned} u_{S1} &= \hat{u}_S \cos \omega t &= \sqrt{2} U_S \cos \omega t \\ u_{S2} &= \hat{u}_S \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) &= \sqrt{2} U_S \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ u_{S3} &= \hat{u}_S \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) &= \sqrt{2} U_S \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{aligned} \quad \omega = 2\pi f$$

bzw. in komplexer Schreibweise (Zeigerdarstellung):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{S1} &= U_S \cdot e^{j\omega t} \\ \underline{U}_{S2} &= U_S \cdot e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{3})} \\ \underline{U}_{S3} &= U_S \cdot e^{j(\omega t - \frac{4\pi}{3})} \end{aligned}$$

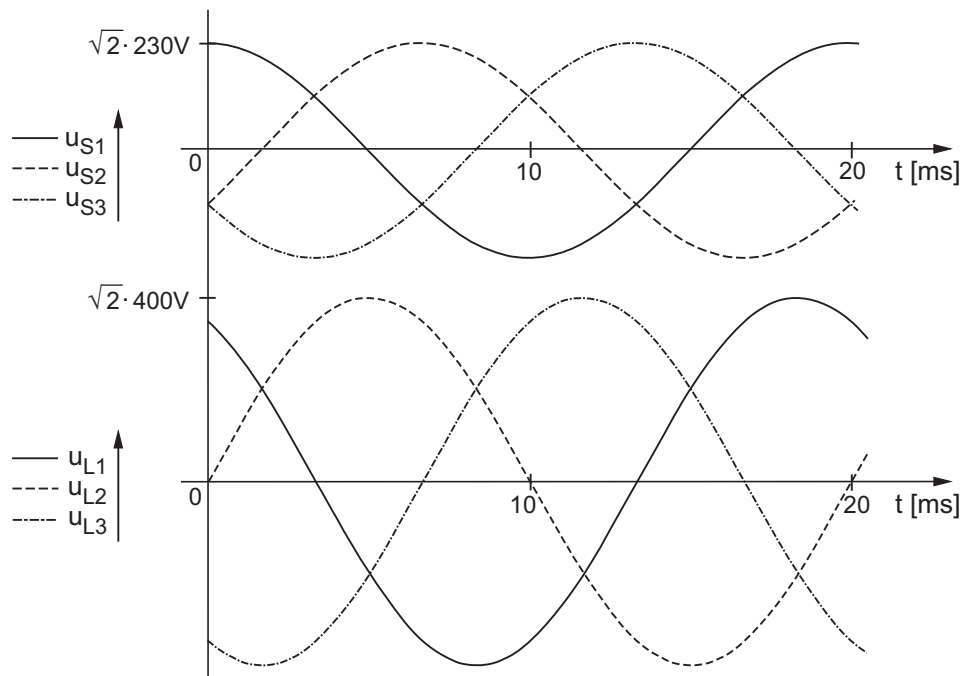
Für die Leiterspannungen gilt entsprechend:

$$u_{L1} = \hat{u}_L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) = \sqrt{2} U_L \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)$$

$$u_{L2} = \hat{u}_L \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sqrt{2} U_L \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad U_L = \sqrt{3} \cdot U_S$$

$$u_{L3} = \hat{u}_L \cos\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right) = \sqrt{2} U_L \cos\left(\omega t - \frac{7\pi}{6}\right)$$

Darstellung für das Niederspannungssystem mit $U_N = 400 \text{ V}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$:



3. Verbraucher in Wechsel- und Drehstromsystemen

3.1 Einphasen-Wechselstromverbraucher

3.1.1 Phasenverschiebung φ

An einem Wechselstromzweipol tritt im allgemeinen eine Phasenverschiebung zwischen der anliegenden Spannung \underline{U} und dem Strom \underline{I} in den Zweipol auf.



Der Phasenverschiebungswinkel φ wird stets *vom Strom zur Spannung* gepeilt (DIN 40 110, Teil 1).

Daher ist $\varphi > 0$, falls der Strom \underline{I} der Spannung \underline{U} **nacheilt**,
(Zweipol mit induktivem Verhalten)
 $\varphi < 0$, falls der Strom \underline{I} der Spannung \underline{U} **voreilt**
(Zweipol mit kapazitivem Verhalten).

Zerlegung des Stromes \underline{I} in die Komponenten:

„Wirkstrom“: $I_W = I \cdot \cos\varphi$ (in Phase oder in Gegenphase zu \underline{U})

„Blindstrom“: $I_B = I \cdot \sin\varphi$ (gegenüber \underline{U} um $\pi/2$ vor- oder nacheilend)

Anmerkung:

Oft wird das Vorzeichen von φ nicht angegeben und stattdessen beispielsweise

$$\begin{array}{ll} \varphi = 34^\circ \text{ (ind.)} & \text{für } \varphi = + 34^\circ \\ \varphi = 34^\circ \text{ (kap.)} & \text{für } \varphi = - 34^\circ \end{array}$$

geschrieben.

Beispiel: Ohmisch-induktiver Verbraucher Z_1

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = R_1 + j\omega L_1 = Z_1 \cdot e^{j\varphi_{Z1}}$$

mit $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$

und $\varphi_{Z1} = \varphi = \arctan \frac{X_1}{R_1} > 0$

Wichtiger Hinweis:

Die Definition des Phasenverschiebungswinkels φ in der Vorlesung „Einführung in die Energietechnik I“ wurde zum Wintersemester 2003/2004 der aktuellen Normung angepasst.

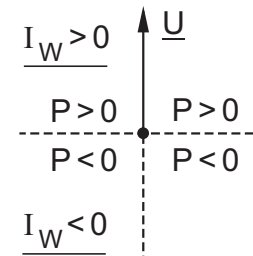
Beachten Sie bitte die Vorzeichenänderungen von φ gegenüber älteren Übungs- und Prüfungsaufgaben!

3.1.2 Leistungs-Mittelwerte bei Einphasen-Wechselstrom

Wirkleistung:

$$P = U \cdot \underbrace{I \cdot \cos\varphi}_{I_W} \quad \text{Einheit: Watt (W)}$$

U und I sind Effektivwerte und daher stets > 0 , $\cos\varphi$ kann jedoch auch negative Werte annehmen!



"Obere" Halbebene

$\cos\varphi > 0, (-\frac{\pi}{2} < \varphi < +\frac{\pi}{2})$:

$P > 0$: Zweipol verbraucht Wirkleistung

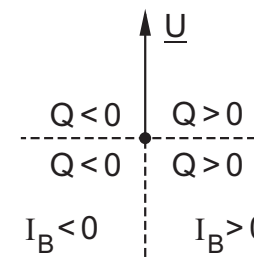
"Untere" Halbebene

$\cos\varphi < 0, (\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{3\pi}{2})$:

$P < 0$: Zweipol liefert Wirkleistung

Blindleistung, Verschiebungs-Blindleistung

$$Q = U \cdot \underbrace{I \cdot \sin\varphi}_{I_B} \quad \text{Einheit: Voltampere reaktiv (Var)}$$



"Linke" Halbebene

$\sin\varphi < 0, (-\pi < \varphi < 0)$:

$Q < 0$: I eilt U voraus, Zweipol hat kapazitiven Charakter

"Rechte" Halbebene

$\sin\varphi > 0, (0 < \varphi < \pi)$:

$Q > 0$: I eilt U nach, Zweipol hat induktiven Charakter

Scheinleistung:

$$S = U \cdot I$$

Einheit: Voltampere (VA)

U und I sind Effektivwerte, daher ist S stets > 0 .

Zusammenhang zwischen den verschiedenen Leistungen:

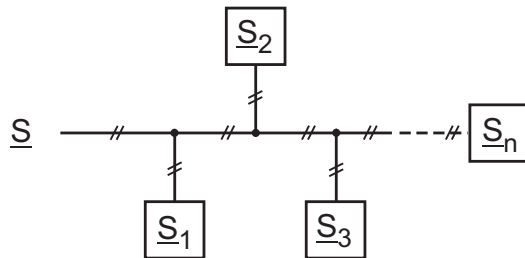
$$P = S \cos \varphi ; \quad Q = S \sin \varphi ; \quad \frac{Q}{P} = \tan \varphi ; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Diese Zusammenhänge legen für die Leistungen die komplexe Schreibweise nahe:

$$\underline{S} = P + jQ$$

(Spannungszeiger in Richtung der positiv reellen Achse)

Die komplexe Schreibweise ist besonders von Nutzen, wenn mehrere verschiedene Zweipole parallel geschaltet werden:



Für die gesamte Scheinleistung gilt dann:

$$\underline{S} = \underline{S}_1 + \underline{S}_2 + \underline{S}_3 + \dots + \underline{S}_n$$

$$= (P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n) + j(Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n)$$

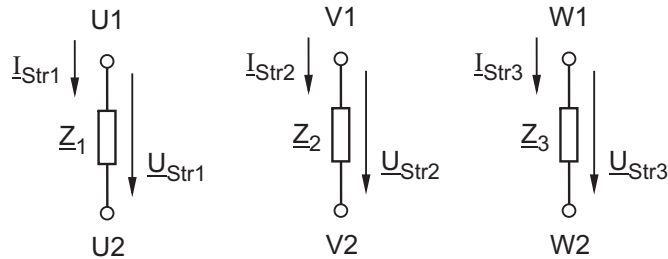
Achtung: jeweils Vorzeichen von P_v und Q_v beachten!

Die Blindleistung Q ist an der Umsetzung in die Nutzenergien nicht beteiligt, sie wird nur zum Aufbau elektrischer und insbesondere magnetischer Felder benötigt.

Sie belastet Generatoren, Transformatoren und Leitungen und führt zu höheren Verlusten. Man ist daher bestrebt, die resultierende Blindleistungsaufnahme einer Anlage so klein wie möglich zu halten (Blindstromkompensation).

3.2 Drehstromverbraucher

Ein Drehstromverbraucher besteht stets aus drei Verbrauchersträngen mit den Strangimpedanzen Z_1 , Z_2 , Z_3 und insgesamt sechs Anschlussklemmen (U_1 , U_2 , V_1 , V_2 , W_1 , W_2):



Die an den Verbrauchersträngen anliegenden Spannungen heißen *Strangspannungen* U_{Str} , die durch die Stränge fließenden Ströme heißen *Strangströme* I_{Str} .

Bei einem "symmetrischen" Verbraucher ist

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$$

(Strangimpedanzen sind nach Betrag und Phase gleich)

Der Anschluss eines solchen Verbrauchers an ein symmetrisches Drehstromnetz ist auf zwei Arten möglich:

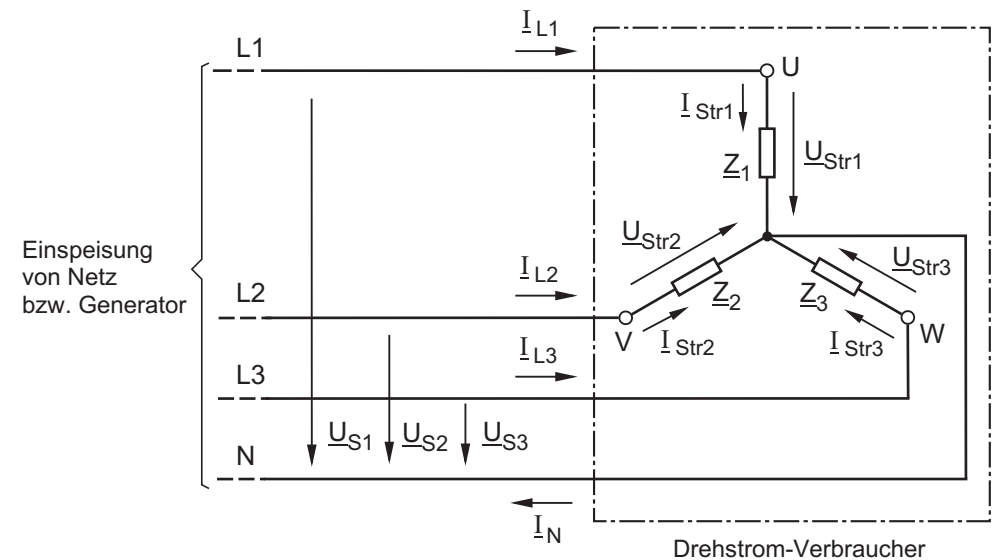
Sternschaltung: Stränge von den Außenleitern zu einem gemeinsamen Mittelpunkt geschaltet

Dreieckschaltung Stränge zwischen zwei Außenleiter geschaltet

Die umgesetzten Leistungen (Wirk-, Blind- und Scheinleistung) in einem Drehstromverbraucher ergeben sich grundsätzlich aus der Summe der entsprechenden Leistungen in den drei Strängen (Leistungen bei Einphasen-Wechselstrom):

Drehstromleistung = Summe der Einphasen-Strangleistungen

3.2.1 Drehstromverbraucher in Sternschaltung



Strangspannungen U_{Str} = Sternspannungen U_S

Strangströme I_{Str} = Leiterströme I_L

Bei symmetrischem Verbraucher und symmetrischem Netz wird

$$I_{Str1} = I_{Str2} = I_{Str3} = I_{Str}$$

und damit

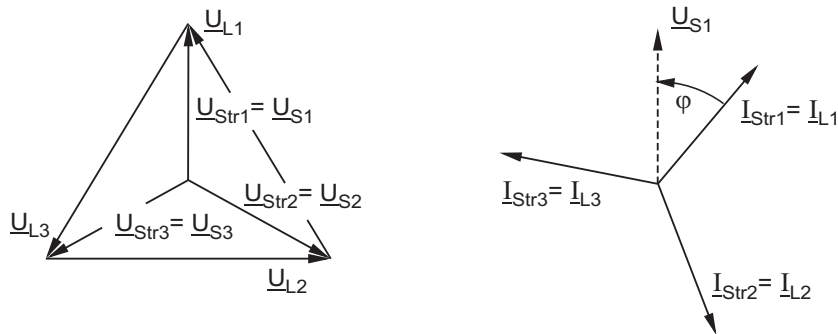
$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = I_L$$

und zugleich der Strom im Neutralleiter

$$I_N = I_{Str1} + I_{Str2} + I_{Str3} = 0$$

(Neutralleiter kann entfallen)

Darstellung im Zeigerdiagramm:



Hinweis: Es ist stets

φ = Phasenverschiebung zwischen \underline{I}_{Strv} und \underline{U}_{Strv}
 (Verbrauchergrößen)
 = Phasenverschiebung zwischen \underline{I}_{Lv} und \underline{U}_{Sv}
 (Netzgrößen)

(Drehstrom-) Wirkleistung

Die Drehstrom-Wirkleistung setzt sich aus den Wirkleistungen der drei Stränge zusammen:

$$P = P_{Str1} + P_{Str2} + P_{Str3}$$

$$= U_{Str1} \cdot I_{Str1} \cdot \cos\varphi_1 + U_{Str2} \cdot I_{Str2} \cdot \cos\varphi_2 + U_{Str3} \cdot I_{Str3} \cdot \cos\varphi_3$$

Bei Symmetrie von Verbraucher und Netz sind die Effektivwerte der Strangspannungen und der Strangströme jeweils gleich groß, ebenso die Leistungsfaktoren. Somit ist

$$P_{Str1} = P_{Str2} = P_{Str3} = P_{Str}$$

Und die Drehstrom-Wirkleistung

$$P = 3 \cdot P_{Str} = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str} \cdot \cos\varphi$$

Wegen der Sternschaltung des Verbrauchers gilt $U_{Str} = U_S$ und $I_{Str} = I_L$ und damit

$$P = 3 \cdot U_S \cdot I_L \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi$$

(Drehstrom-) Blindleistung:

Bei Symmetrie von Verbraucher und Netz ergibt sich für die Drehstrom-Blindleistung entsprechend

$$Q = 3 \cdot Q_{Str} = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str} \cdot \sin\varphi$$

oder auch

$$Q = 3 \cdot U_S \cdot I_L \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin\varphi$$

(Drehstrom-) Scheinleistung:

Bei Symmetrie von Verbraucher und Netz ergibt sich für die Drehstrom-Scheinleistung entsprechend

$$S = 3 \cdot S_{Str} = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str}$$

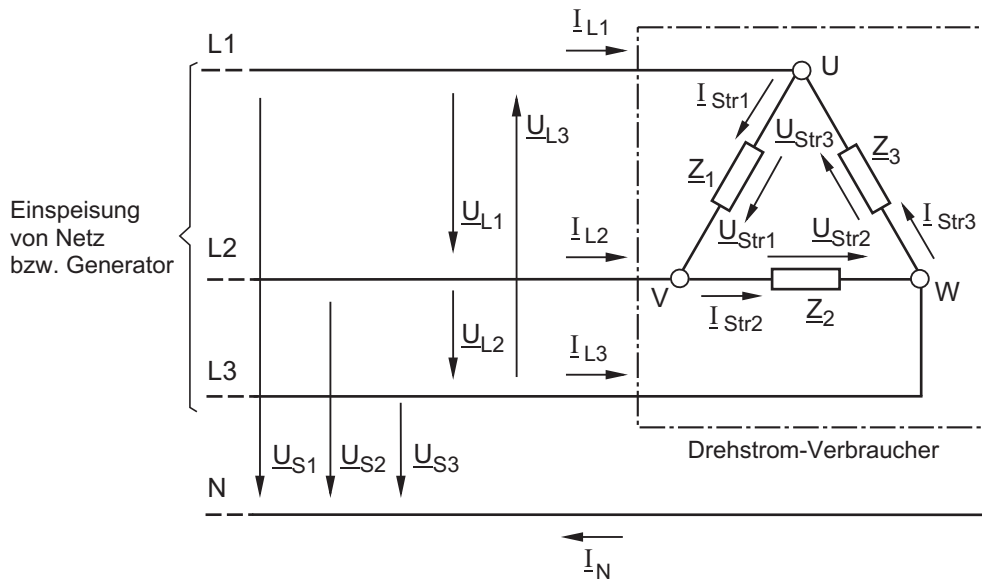
oder auch

$$S = 3 \cdot U_S \cdot I_L = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L$$

Komplexe Schreibweise der Drehstromleistungen:

$$\underline{S} = P + jQ$$

3.2.2 Drehstromverbraucher in Dreieckschaltung



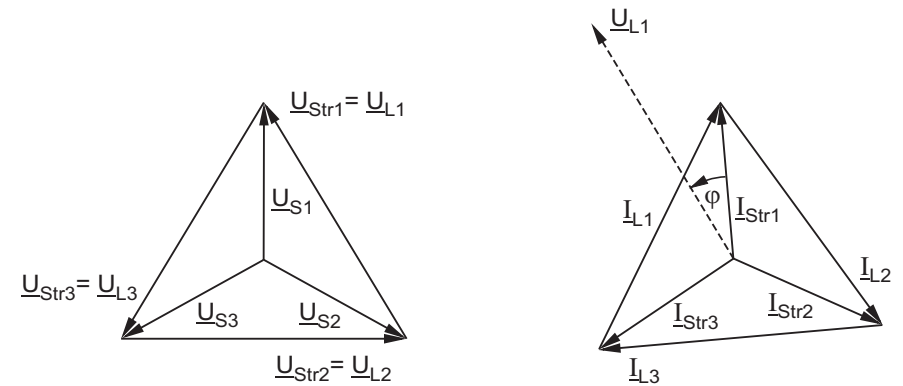
Strangspannungen $U_{Str} =$ Leiterspannungen U_L

Leiterströme I_L setzen sich aus jeweils zwei Strangströmen I_{Str} zusammen

Ein Sternpunktleiter ist nicht erforderlich.

Bei Symmetrie von Verbraucher und Netz stimmen auch hier die Effektivwerte der Strangspannungen und der Strangströme jeweils überein, ebenso die Leistungsfaktoren.

Darstellung im Zeigerdiagramm:



Die Leiterströme setzen sich aus jeweils zwei Strangströmen zusammen:

$$I_{L1} = I_{Str1} - I_{Str3} \quad I_{L2} = I_{Str2} - I_{Str1} \quad I_{L3} = I_{Str3} - I_{Str2}$$

Zwischen den Beträgen (Effektivwerten) der Leiterströme und der Strangströme besteht der Zusammenhang

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_{Str}$$

Hinweis: Auch hier gilt

φ = Phasenverschiebung zwischen I_{Str0} und U_{Str0}
 (Verbrauchergrößen)
 = Phasenverschiebung zwischen I_{L0} und U_{S0}
 (Netzgrößen)

(Drehstrom-) Wirkleistung

$$\mathbf{P = 3 \cdot P_{Str} = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str} \cdot \cos\varphi}$$

Wegen $U_{Str} = U_L = \sqrt{3} U_S$ und $I_{Str} = \frac{I_L}{\sqrt{3}}$ bei Dreieckschaltung kann die Drehstrom-Wirkleistung auch in der Form

$$\mathbf{P = 3 \cdot U_S \cdot I_L \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\varphi}$$

geschrieben werden

(Drehstrom-) Blindleistung:

$$\mathbf{Q = 3 \cdot Q_{Str} = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str} \cdot \sin\varphi}$$

oder auch $\mathbf{Q = 3 \cdot U_S \cdot I_L \cdot \sin\varphi = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin\varphi}$

(Drehstrom-) Scheinleistung:

$$\mathbf{S = 3 \cdot S_{Str} = 3 \cdot U_{Str} \cdot I_{Str}}$$

oder auch $\mathbf{S = 3 \cdot U_S \cdot I_L = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L}$

Komplexe Schreibweise der Drehstromleistungen

$$\mathbf{\underline{S} = P + jQ}$$

Schlussfolgerung:

Die aufgenommenen Leistungen als Funktion der Spannungen und der Leiterströme des Drehstromnetzes sind von der Schaltungsart des Verbrauchers unabhängig.