

Elektrotechnik – 7. Drehstrom

Luft- und Raumfahrttechnik Bachelor, 1. Semester

David Straub

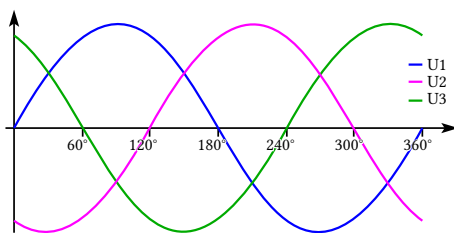
7. Drehstrom

1. Das symmetrische Dreiphasensystem
2. Verbraucher in Stern- und Dreieckschaltung
3. Leistung im Drehstromsystem
4. Blindleistungskompensation

Warum Drehstrom?

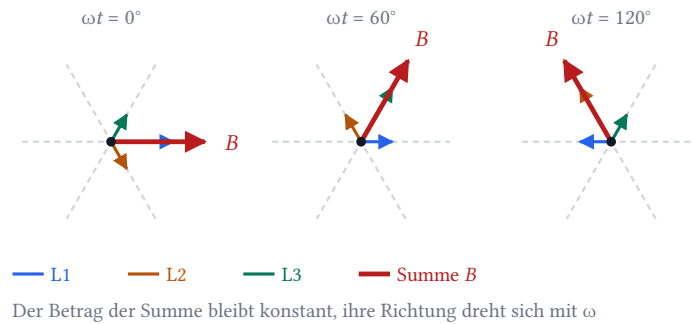
Fast die gesamte elektrische Energieversorgung arbeitet mit **drei** um 120° versetzten Wechselspannungen:

- **Weniger Material:** 3 (bzw. 4) Leiter übertragen die Leistung von 3 getrennten Wechselstromkreisen (6 Leiter)
- **Konstante Leistung:** Die Gesamtleistung pendelt nicht (anders als bei einer Phase!)
- **Drehfeld gratis:** Drei versetzte Spulen erzeugen ein rotierendes Magnetfeld $\rightarrow$ einfache, robuste Motoren (Asynchronmaschine)



Das Drehfeld

Drei räumlich um 120° versetzte Spulen, gespeist mit den drei zeitversetzten Strömen: jede erzeugt ein Feld **entlang ihrer eigenen Achse**. Die Summe hat **konstanten Betrag** und dreht sich mit ω – ein Rotor folgt ihr: **Motor ohne Schleifringe oder Kommutator**.



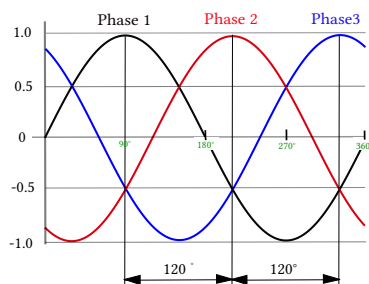
Das symmetrische Dreiphasensystem

Drei Spannungsquellen mit gleicher Amplitude und Frequenz, jeweils um 120° ($\frac{2\pi}{3}$) verschoben — als Effektivwertzeiger (Länge U_Y , die **Sternspannung**):

$$\underline{U}_1 = U_Y \cdot e^{j0^\circ}, \quad \underline{U}_2 = U_Y \cdot e^{-j120^\circ}, \quad \underline{U}_3 = U_Y \cdot e^{+j120^\circ}$$

Wichtige Eigenschaft (Zeiger addieren!):

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



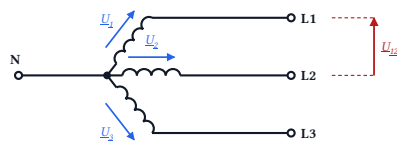
Das Vierleiternetz

Die drei Quellen werden im **Sternpunkt N** zusammengeschaltet:

- **Außenleiter** L1, L2, L3
- **Neutralleiter** N

Zwei Spannungsebenen im selben Netz:

- **Sternspannung** U_Y : Außenleiter $\leftrightarrow$ Neutralleiter ($\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3$)
- **Dreieckspannung** (Außenleiterspannung) U_Δ : Außenleiter $\leftrightarrow$ Außenleiter ($\underline{U}_{12}, \underline{U}_{23}, \underline{U}_{31}$)



Sternspannung: Außenleiter $\leftrightarrow$ N
 Dreiecksspannung: Außenleiter $\leftrightarrow$ Außenleiter

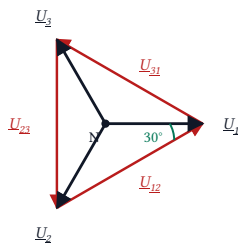
Zusammenhang der Spannungen

Maschengleichungen:

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2, \quad \underline{U}_{23} = \underline{U}_2 - \underline{U}_3, \quad \underline{U}_{31} = \underline{U}_3 - \underline{U}_1$$

Aus dem Zeigerdiagramm (Zeigersubtraktion, gleichschenkliges Dreieck mit 30°):

$$\boxed{U_\Delta = \sqrt{3} \cdot U_Y}$$



$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 \rightarrow U_\Delta = 2 \cos 30^\circ \cdot U_Y = \sqrt{3} \cdot U_Y$$

Unser Niederspannungsnetz: $U_Y = 230 \text{ V}$, $U_\Delta = \sqrt{3} \cdot 230 \text{ V} = 400 \text{ V}$

→ Schreibweise auf Typenschildern und in Aufgaben: „**Drehstromnetz 400/230 V**“

Verbraucher in Sternschaltung (Y)

Drei gleiche Impedanzen $\underline{Z}$ (**symmetrischer Verbraucher**), jeweils zwischen Außenleiter und Sternpunkt:

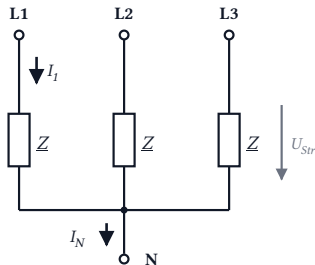
Strangspannung = Sternspannung:

$$U_{\text{Str}} = U_Y = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}$$

Strangstrom = Außenleiterstrom:

$$I_{\text{Str}} = I = \frac{U_Y}{Z}$$

Neutralleiterstrom: $I_N = I_1 + I_2 + I_3 = 0$ – bei symmetrischer Last fließt im Neutralleiter **kein Strom!**



Verbraucher in Dreieckschaltung (Δ)

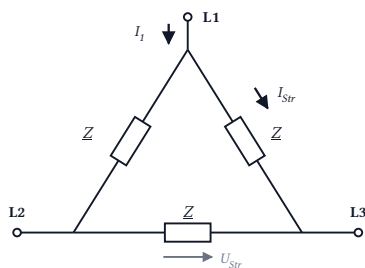
Drei gleiche Impedanzen Z , jeweils **zwischen zwei Außenleitern**:

Strangspannung = Dreieckspannung:

$$U_{\text{Str}} = U_{\Delta} = \sqrt{3} \cdot U_Y$$

Strangstrom vs. Außenleiterstrom (Knotenregel an den Ecken):

$$I_{\text{Str}} = \frac{U_{\Delta}}{Z} = \frac{I}{\sqrt{3}}$$



Merke: Der Faktor $\sqrt{3}$ sitzt bei Y zwischen den *Spannungen*, bei Δ zwischen den *Strömen*.

Leistung im Drehstromsystem

Symmetrischer Verbraucher: Gesamtleistung = $3 \times$ Strangleistung

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

Einsetzen der Y- bzw. Δ -Beziehungen liefert **in beiden Fällen dasselbe Ergebnis** in Netzgrößen (U_{Δ} , Außenleiterstrom I):

$$\boxed{S = \sqrt{3} \cdot U_{\Delta} \cdot I} \quad P = S \cdot \cos \varphi, \quad Q = S \cdot \sin \varphi$$

Aber Achtung: Dieselbe Impedanz $\underline{Z}$ nimmt in Δ die **dreifache Leistung** auf wie in Y (U_{Str} ist $\sqrt{3}$ -mal so groß, $P \propto U_{\text{Str}}^2$)!

→ Anwendung: **Stern-Dreieck-Anlauf** von Motoren (sanft in Y starten, auf Δ umschalten)

Vertiefung: Konstante Momentanleistung

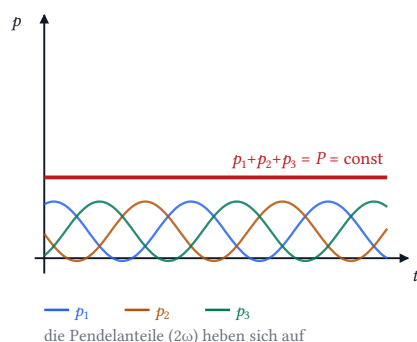
Bei einer Phase pendelt die Momentanleistung mit 2ω (Kapitel 6). Addiert man die drei Strangleistungen, heben sich die Pendelanteile auf:

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) = 3 \cdot U_{\text{Str}} I_{\text{Str}} \cos \varphi = P = \text{const}$$

Konsequenz:

- Drehstrommotoren liefern ein **konstantes Drehmoment** (kein Rütteln)
- Generatoren werden gleichmäßig belastet

Das ist neben der Leitermaterial-Ersparnis *der* technische Grund für Drehstrom.



Aufgabe 22: Heizofen

Die Heizstäbe eines Industrie-Heizofens ($R = 20 \, \Omega$ pro Strang) liegen in **Dreieckschaltung** an einem Drehstromnetz mit $U = 400/230 \, \text{V}$.

- Wie groß sind die Strangströme I_{Str} und die Außenleiterströme I ?
- Welche Leistung P_{Δ} wird umgesetzt?
- Welche Leistung P_Y wird umgesetzt, wenn die Heizstäbe stattdessen in **Stern** geschaltet werden?
- Vergleichen Sie P_{Δ} und P_Y : Welcher Faktor ergibt sich, und warum?

Blindleistungskompensation im Drehstromnetz

Wie in Kapitel 6: Kondensatoren parallel zum induktiven Verbraucher. Im Drehstromnetz gibt es dafür **zwei Möglichkeiten**:

Kondensatoren in Stern (an U_Y):

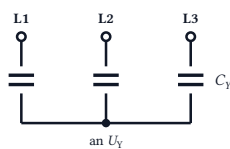
$$Q_C = 3 \cdot U_Y^2 \cdot \omega C_Y \Rightarrow C_Y = \frac{Q_C}{3 \cdot U_Y^2 \cdot \omega}$$

Kondensatoren in Dreieck (an $U_\Delta = \sqrt{3} U_Y$):

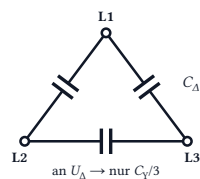
$$C_\Delta = \frac{Q_C}{3 \cdot U_\Delta^2 \cdot \omega} = \frac{C_Y}{3}$$

→ In Dreieckschaltung genügt **ein Drittel der Kapazität** (aber: Kondensatoren müssen für 400 V ausgelegt sein)

Kondensatoren in Stern



Kondensatoren in Dreieck



Zusammenfassung: Drehstrom

- **Symmetrisches Dreiphasensystem:** drei Spannungen, je 120° versetzt, Summe = 0
- **Zwei Spannungen:** $U_\Delta = \sqrt{3} \cdot U_Y$ – Netz „400/230 V“
- **Sternschaltung:** $U_{Str} = U_Y$, $I_{Str} = I$, symmetrisch $\rightarrow I_N = 0$
- **Dreieckschaltung:** $U_{Str} = U_\Delta$, $I_{Str} = I/\sqrt{3}$
- **Leistung** (beide Schaltungen): $S = \sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot I$; dieselbe Last in Δ nimmt $3\times$ so viel Leistung auf wie in Y
- **Kompensation:** $C_\Delta = C_Y/3$

Nächstes Kapitel: Schaltvorgänge — was passiert im Moment des Einschaltens? ⚡