Elektrotechnik 2. Klasse

Ing. Volker Regenfelder

Lehrmittel: Elektrotechnik Grundlagen 2025 - 11007

Diverses Anschauungsmaterial
Verlag Jugend und Volk

LEHRSTOFFÜBERSICHT

1. INDUKTION

Induktion nennt man die Spannungserzeugung mit magnetischer Feldern.

Es gibt drei Arten der Induktion:

- Induktion der Bewegung
- Induktion der Ruhe
- Selbstinduktion

Die induzierte Spannung ist Größer, wenn die Änderung des magnetischen Flusses größer ist.

$$u = -N . \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Legende aus Buch übertragen

https://studyflix.de/elektrotechnik/spule-und-induktion-267

1.1. Induktion der Bewegung

Bewegt man eine Leiterschleife in einem Magnetfeld und schneidetet diese dabei die Feldlinien, wird in der Leiterschleife Spannung induziert.

Man kann aber auch des Magnetfeld bewegen.

Siehe Abbildung 3 und 4 Seite 127

$$u_i = B . l . v . z$$

Legende aus Buch übertragen

Findet Verwendung bei Generatoren.

1.2. Induktion der Ruhe (Transformatorprinzip)

Die Induktion entsteht durch die Änderung des magnetischen Flusses ohne Bewegung.

Ein Transformator besteht aus zwei Wicklungen. Der Primärwicklung (Eingangswicklung) und der Sekundärwicklung (Ausgangswicklung).

Siehe Abbildung 5 und 6 Seite 128

Verwendung: Transformatoren und bei Zündspulen von Motoren

1.3. Selbstinduktion

Ist eine besondere Form der Induktion der Ruhe.

Durch die Änderungen des elektrischen Stromes in einer Spule entsteht eine magnetische Flussänderung und somit erzeugt die Spule selbst eine Induktionsspannung.

Die Selbstinduktion versucht also:

- beim Ausschalten den Strom am Abfallen zu hindern
- beim Einschalten den Anstieg des Stromes zu hindern.

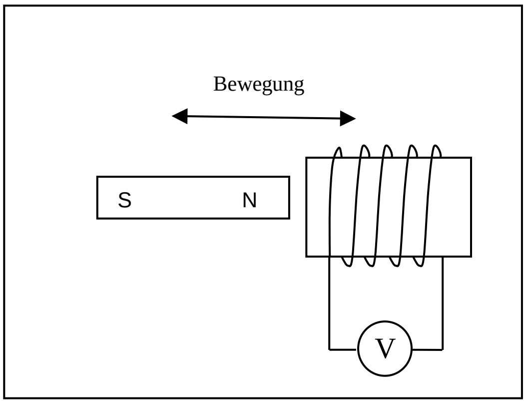
Verwendung: Zündspulen von Motoren

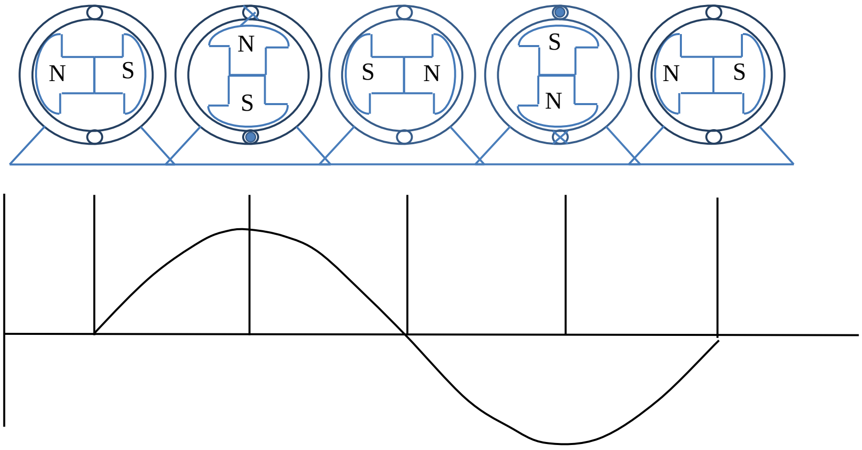
Siehe Abbildung 2 Seite 132

Spannung an der Spule

2. WECHSELSTROMGRÖßEN

Wechselstrom oder Wechselspannung ändern fortlaufend ihre Richtung, man verwendet die Abkürzung AC (alternating current = Wechselstrom). Siehe Fachkunde Buch Seite 136 Abb. 2





Jedesmal, wenn der Magnet hinein- und herausbewegt wird oder eine ganze Umdrehung macht, wird eine Periode (pos. und neg. Halbwelle) induziert. Die Spannung wird also nach dem Generatorprinzip erzeugt.

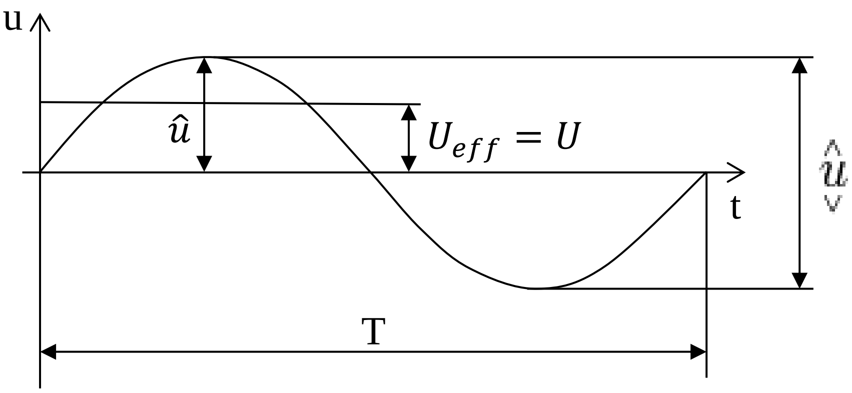
2.1. Kenngrößen des Wechselstromes

Buch Seite 121/125

2.1.1. Periode, Scheitelwert und Effektivwert.

Eine Periode besteht aus einer **positiven** und einer **negativen** Halbwelle eines Wechselstromes oder einer Wechselspannung.
Buch Seite 133 Bild 1, 134 Bild 2 und 3

Legende: erarbeiten durch Schüler
Sprich: U dach, U effektiv und U Spitze-Tal (früher Spitze-Spitze)



û, U_m,U_{max} … ________________ (Amplitude)
t… _______
T… ______________
$\hat{\check{u}}$… ______________ (Schwingungsbreite)
U_{eff}… ______________

Effektivwert: U, $u_{eff.}$ Der Effektivwert des Wechselstromes ist so groß, wie ein Gleichstrom mit der gleichen Wärmewirkung.

Messgeräte zeigen immer Effektivwerte an !

Scheitelwert: û, Maximalwert, Amplitudenwert, Höchstwert, Spitzenwert, ist der höchste Wert einer Halbwelle.

$$\boldsymbol{I_{eff} = I = \frac{\hat{\imath}}{\sqrt{2}}; \quad U_{eff} = U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}}$$

Legende:

I_{eff}, I	Effektivstrom in A
U_{eff}, U	Effektivspannung in V
î	Maximal-, Scheitelstrom in A
û	Maximal-, Scheitelspg in V

2.1.2. Frequenz und Periodendauer

Periodendauer: ist die Dauer einer vollständigen Periode (2 Halbwellen).

Frequenz: Ist die Anzahl der Perioden in 1 Sekunde.

$$f = \frac{1}{T}; \quad T = \frac{1}{f}$$

Legende:
f ....Frequenz in Hz (Hertz)
T ....Periodendauer in s

Unsere Netzwechselspannung hat eine Frequenz von 50 Hz und eine Periodendauer von 20 ms.

2.1.3. Kreisfrequenz

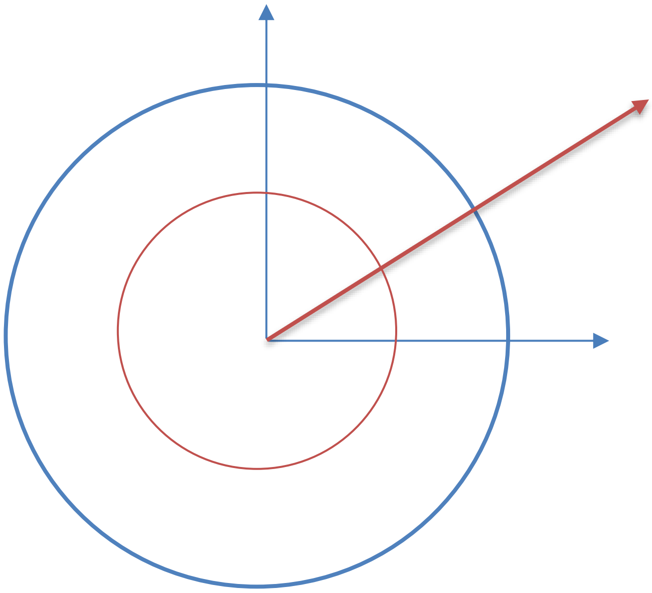
Die Kreisfrequenz ω (Omega) ist die Frequenz des drehenden Zeigers im Bogenmaß. Die Sinusform entsteht durch die Kreisbewegung.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Legende:
ω Kreisfrequenz

$Einheit: \frac{1}{s} \ oder \ s^{-1}$

Kreisumfang:
U = 2 . r. π



1 Umdrehung in 2 Sekunden
1 Umdrehung ist eine Periodendauer (T / s)

$\frac{1}{T}$ = Frequenz (f / Hz)

ω = 2 . π . f Kreisfrequenz (ω / s^{-1})

2.1.4. Frequenz und Maschinendrehzahl

Buch Seite 136 Bild 3

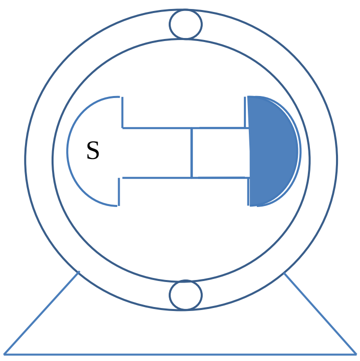
Da eine Periode aus einer pos. und einer neg. Halbwelle besteht, und dies nur mit einem Polpaar (2 Pole/Norden und Süden) erzeugt werden kann, ist die Polpaarzahl zur Umdrehungszahl zu multiplizieren.

$$\boxed{f = \frac{p \cdot n}{60}}$$

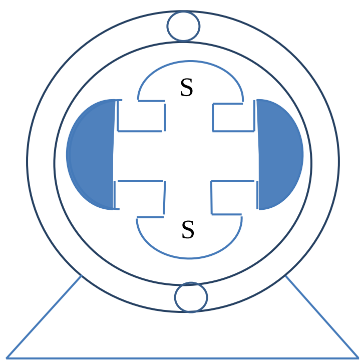
Legende:
f.........Frequenz in Hz
p........Polpaarzahl (Anzahl der Pole / 2)
n........Drehzahl in min^{-1}
60......Umrechnungsfaktor min. ⇒ sec.

Aufgabe: Mit welcher Drehzahl dreht sich ein Motor mit 2 Polpaaren in unserem Netz?

Polrad hat 2 Pole = 1 Polpaar
Polpaarzahl = 1



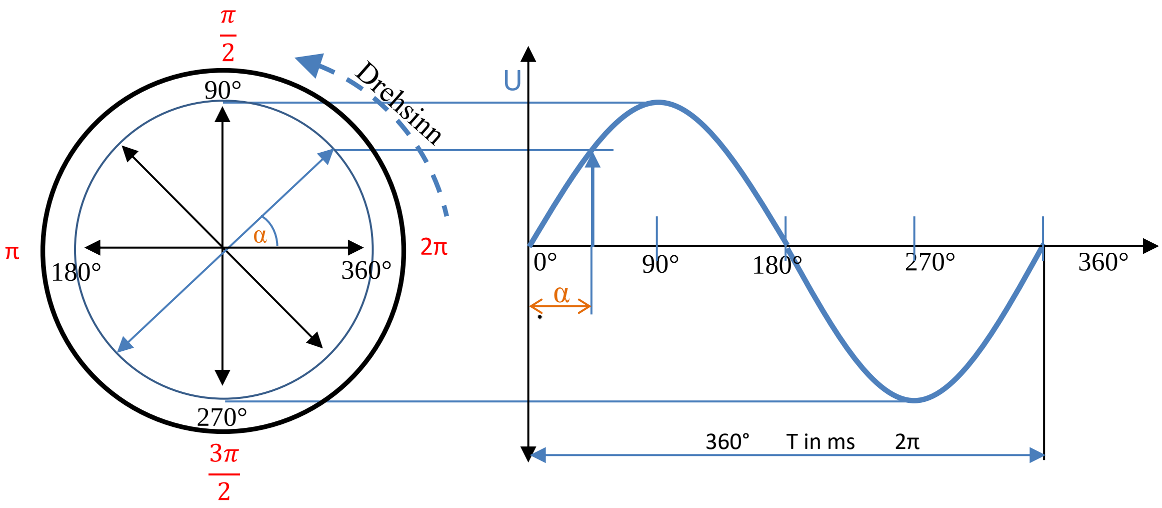
Polrad hat 4 Pole = 2 Polpaare
Polpaarzahl = 2



2.2. Sinusform der Wechselspannung

Buch Seite 138

2.2.1. Zeigerdarstellung und Sinusform



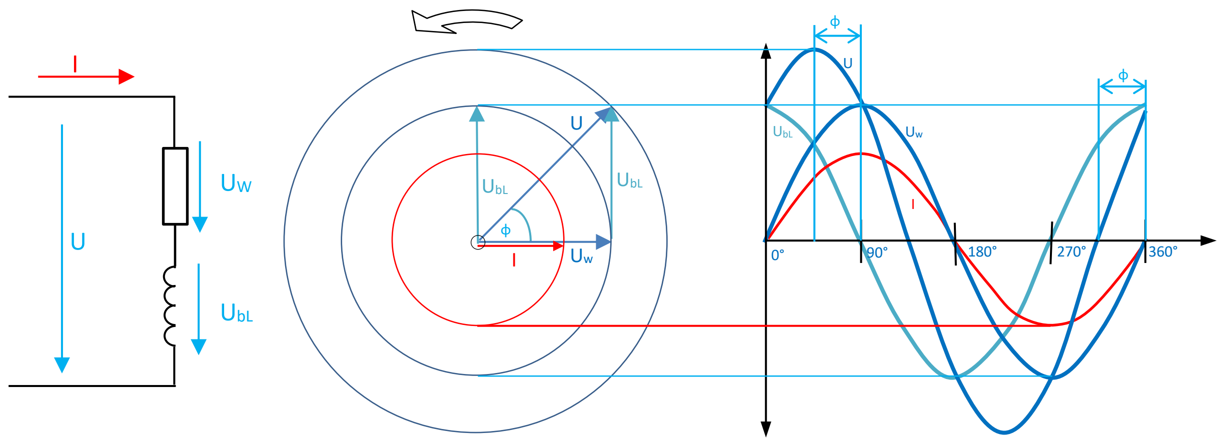
Folgende Vereinbarungen gelten:

☞ Zeigerlänge = Wechselgröße (u, i)
☞ Drehzahl des Zeigers = Frequenz der Sinuslinie
☞ Zeigerdrehrichtung ist entgegen dem Uhrzeigersinn

2.2.2. Addition von Sinusspannungen (vertieft):

Buch Seite 142

U_w und U_{bL} müssen in Zeigerform vektoriell zusammengezählt werden (Hintereinander-legen der Vektoren) und in Sinusform (vertieft) werden die Augenblickswerte addiert.



2.2.3. Phasenverschiebung

Buch Seite 139

Durch unterschiedliche Belastung wie kapazitiv (durch einen Kondensator) und/oder induktiv (durch eine Spule) sind **Strom** und **Spannung** nicht gleichzeitig beim Nulldurchgang der Perioden.

Beim **ohmschen Widerstand** sind Strom und Spannung (Spannungsabfall durch den Strom) **immer in Phase** (ohne Verschiebung).

Die Phasenverschiebung wird in einem Winkel dem Phasenverschiebungswinkel φ angegeben (meist als cos φ dem Leistungsfaktor).

Siehe Abbildung 2 Seite139

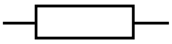
Die Verschiebung von U und I ergibt für I einen Winkel von ca 45°, der Strom ist nacheilend.

3. Wechselstromwiderstände

3.1. Wirkwiderstand

Buch Seite 144

So wird ein Widerstand bezeichnet, der im Wechselstromkreis die gleiche Wirkung hat, wie im Gleichstromkreis (z. B.: Glühlampe, Heizofen).

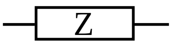
Schaltzeichen:  Formelzeichen: R Einheit: Ω

Am Wirkwiderstand sind Spannung und Strom phasengleich ($\varphi = 0°$, $\cos\varphi = 1$).

3.2. Scheinwiderstand

Buch Seite 153

Unter Scheinwiderstand versteht man, den aus den Messwerten (Effektivwerten) von Wechselspannung und Wechselstrom ermittelten Widerstand.

Schaltzeichen: 

Formelzeichen: Z Einheit: Ω

$$\boxed{Z = \frac{U}{I}}$$

Legende:
Z ....Scheinwiderstand. in Ω
U ....Effektivwert Wechselspannung in V
I...........Effektivwert Wechselstrom in A

3.3. Induktiver Blindwiderstand

Buch Seite 147

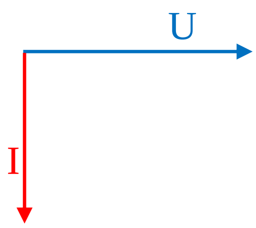
Spule an Gleichspannung ⇒ hoher Strom, Spule an Wechselspannung ⇒ kleiner Strom.

Folgerung: Spule an Wechselspannung hat einen zusätzlichen Innenwiderstand = induktiver Blindwiderstand X_L.

Schaltzeichen:  Formelzeichen: X_L Einheit: Ω

$$\boxed{X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}$$

Legende:
X_L ....ind. Blindwid. in Ω
ω ....Kreisfrequenz in s^{-1}
f ....Frequenz in Hz (Hertz)
L ....Induktivität in H (Henry)



Ursache ist die Selbstinduktion: (Betrachtet wird ein rein induktiver Verbraucher)
Der Strom wird zuerst für den Aufbau des Magnetfeldes benötigt.

I ist U um 90° nacheilend

Es fließt nur soviel Blindstrom (kein Wirkstrom), um jenen magnetischen Fluss aufzubauen, der die gleiche Selbstinduktionsspannung erzeugt, wie die angelegte Spannung.
vertieft

Reihenschaltung von L:	Parallelschaltung von L:
$L = L_1 + L_2 + L_3 + \ldots$	$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \ldots$
$X_L = X_{L1} + X_{L2} + X_{L3} + \ldots$	$\frac{1}{X_L} = \frac{1}{X_{L1}} + \frac{1}{X_{L2}} + \frac{1}{X_{L3}} + \ldots$

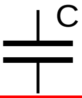
3.4. Kapazitiver Blindwiderstand

Buch Seite 150

Der Kondensator speichert Energie in Form einer Spannung, welche zuerst aufgebaut werden muss.

I ist U um 90° voreilend

I_C ist ein Blindstrom, da der Kondensator beim Laden Energie (W) aufnimmt und beim Entladen diese Energie wieder abgibt.

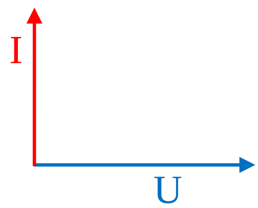
Schaltzeichen: 

Formelzeichen: X_C

Einheit: Ω

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Legende:
X_C ...... kap. Blindwid. in Ω
ω .... Kreisfrequenz in s^{-1}
f .... Frequenz in Hz
C .... Kapazität in F (Farad)



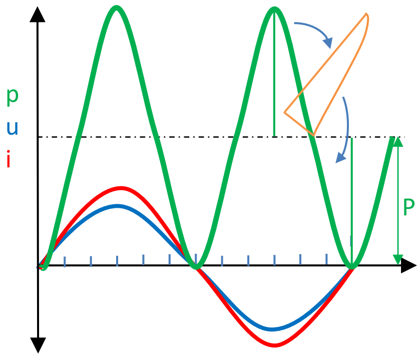
vertieft

Serienschaltung	Parallelschaltung
$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots$	$C = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots$
$X_C = X_{C1} + X_{C2} + X_{C3} + \cdots$	$\frac{1}{X_C} = \frac{1}{X_{C1}} + \frac{1}{X_{C2}} + \frac{1}{X_{C3}} + \cdots$

3.5. Wechselstromleistung

Buch Seite 144

3.5.1. Wirkleistung



Zur Bestimmung der Wirkleistung multipliziert man die Augenblickswerte von Strom und Spannung. So erhält man ein neue Sinuskurve mit doppelter Frequenz, welche ausschließlich im positiven Bereich liegt.

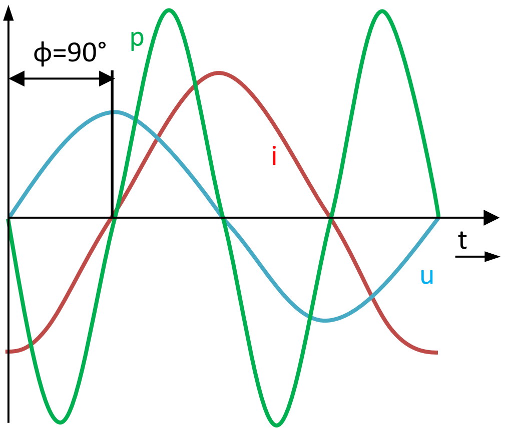
Der Effektivwert der Leistung liegt bei der gedachten Nulllinie der Leistungskurve.

$$\boxed{\begin{array}{c} P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi \\ P = \frac{1}{2}\,\hat{p} \end{array}}$$

Legende:
P ....Wirkleistung in W (Watt)
U_{eff} ......Spannungseffektivwert in V
I_{eff}........Stromeffektivwert in A
cosφ….ist 1 bei Wirkwiderstand

3.5.2. Blindleistung

Buch Seite 148 und 151



Hier ist der Strom um 90° nacheilend: Induktivität.

Wird bei einer **reinen** Induktivität oder Kapazität (φ = 90°) die Augenblickswerte von Strom und Spannung multipliziert, so erhält man zwei gleich große positive und negative Leistungsflächen.

Positive Leistungsfläche: Leistungsaufnahme aus dem Netz.

Negative Leistungsfläche: Leistungsrückgabe ans Netz.

Die Leistung pendelt also zwischen Netz und Verbraucher mit der doppelten Frequenz hin und her. Sie hat keine Wirkung.

Formelzeichen: Q **Einheit: var (VoltAmpereReaktiv)**

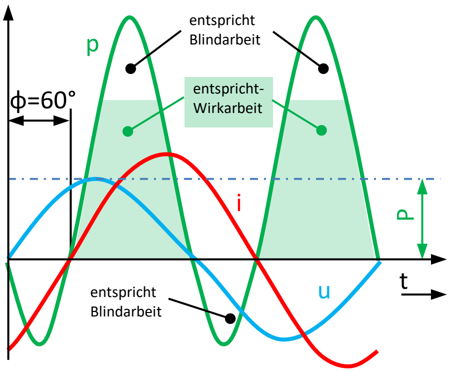
$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$$

Vergleicht man an ein und deselben Wechselstromverbraucher kapazitive und induktive Blindleistung, so erkannt man, dass sie gegengeleich Energie aufnehmen oder abgeben.

Siehe Buch Seite 152 Abbildung 2

3.5.3. Scheinleistung

Siehe Buch Seite 153



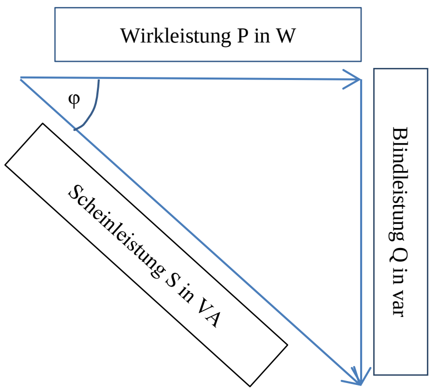
Die Multiplikation der Messwerte von Spannung (V-Meter) und phasenverschobenen Strom (A-Meter) ergibt eine scheinbare Leistung $\Rightarrow$ Scheinleistung.

Auch hier wird negative Leistung an das Netz zurückgegeben.

$$\boxed{S = U \cdot I}$$

Legende:
S .... Scheinleistung in VA (Volt-Ampere)
U .... Spannung in V
I .... Strom in A

3.5.4. Leistungsdreieck



$S^2 = P^2 + Q^2 \Rightarrow S = \sqrt{P^2 + Q^2}$		
$\cos\varphi = \frac{P}{S}$	$P = S \bullet \cos\varphi$	$P = U \times I \times \cos\varphi$
$\sin\varphi = \frac{Q}{S}$	$Q = S \bullet \sin\varphi$	$Q = U \bullet I \bullet \sin\varphi$

Legende:

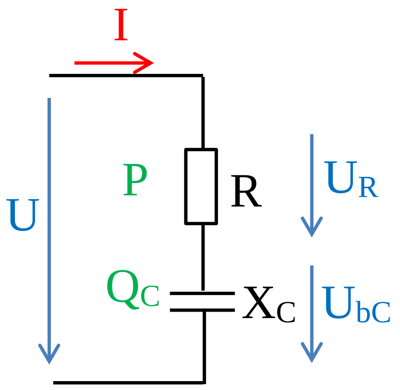
S	Scheinleistung in VA
P	Wirkleistung in W
Q	Blindleistung (kap. od. ind.) in var
cos φ	Wirk- oder Leistungsfaktor: Ist das Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung
sin φ	Blindleistungsfaktor

4. WIDERSTANDSSCHALTUNGEN

4.1. Reihenschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

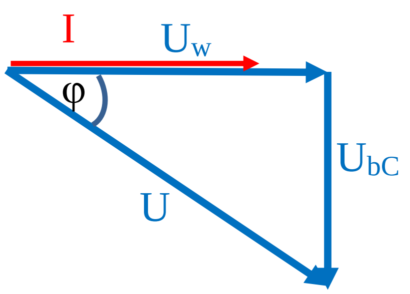
Buch Seite 160 / 161

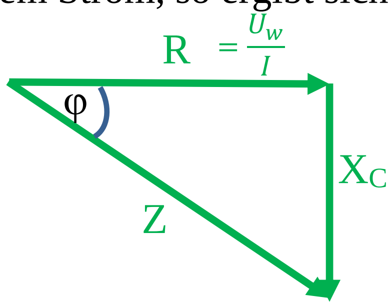
4.1.1. Reihenschaltung von R und X_C

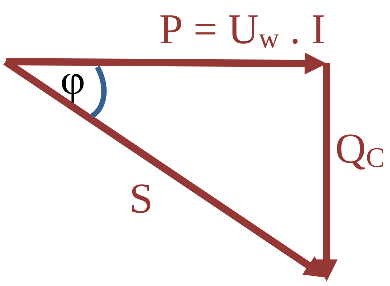


Die gemeinsame Größe für beide Widerstände ist bei der Reihenschaltung der Strom. U_w ist mit I phasengleich, U_C ist 90° nacheilend (also nach Unten), die Resultierende ist U. Der Winkel zwischen U und I ist der Phasenverschiebungswinkel φ.

Dividiert man die Teilspannungen durch den Strom, so erhält man das Widerstandsdreieck und multipliziert man mit dem Strom, so ergibt sich das Leistungsdreieck.







Spannungsdreieck	Widerstandsdreieck	Leistungsdreieck
$U_W = I \cdot R$	$R = \frac{U_w}{I}$	$P = U_w \cdot I$
$U_{bC} = I \cdot X_C$	$X_C = \frac{U_{bC}}{I}$	$Q_C = U_{bC} \cdot I$
$U = I \cdot Z$	$Z = \frac{U}{I}$	$S = U \cdot I$
$U = \sqrt{U_W^2 + U_B^2}$	$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$	$S = \sqrt{P^2 + Q_C^2}$
$\sin\varphi = \frac{X_C}{Z} = \frac{U_{bC}}{U} = \frac{Q_C}{S}$	$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_w}{U} = \frac{P}{S}$	$\tan\varphi = \frac{X_C}{R} = \frac{U_{bC}}{U_w} = \frac{Q_C}{P}$
$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$	$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	

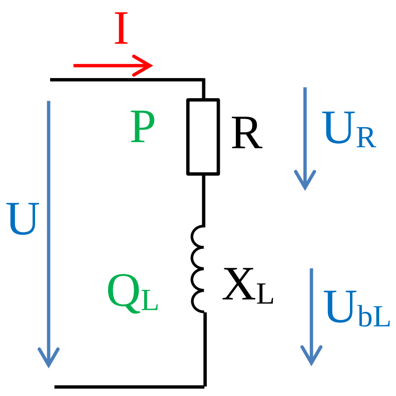
Legende:

U_w .... ohm. Spannungsabfall in V
U_{bC} .... kap. Spannungsabfall an X_C
U .... Gesamtspannung in V
R .... ohm. Wid. in Ω
X_C.......... kap. Blindwiderstand in Ω

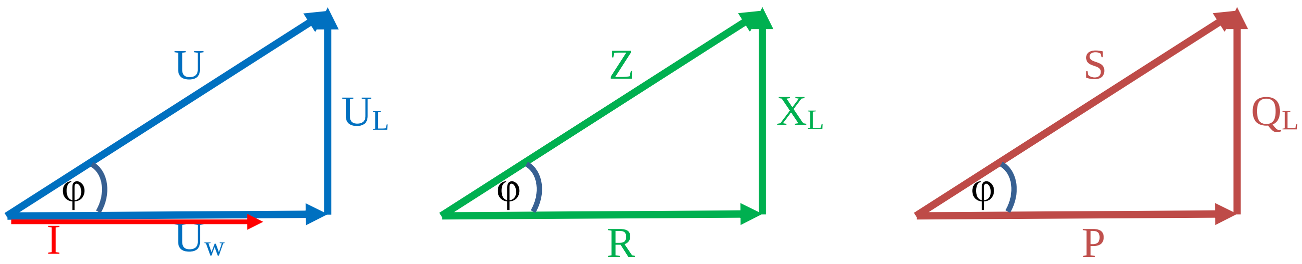
Z ....Scheinwiderstand in Ω
P ....Wirkleistung in W
Q_C ....kap. Blindleistung in var
S ....Scheinleistung in VA

4.1.2. Reihenschaltung aus R und X_L.

Buch Seite 160

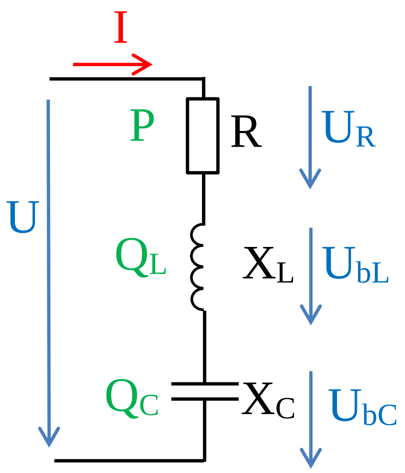


Die gemeinsame Größe für beide Widerstände ist bei der Reihenschaltung der Strom. U_w ist mit I phasengleich, U_L ist 90° voreilend, die Resultierende ist U. Der Winkel zwischen U und I ist der Phasenverschiebungswinkel φ.



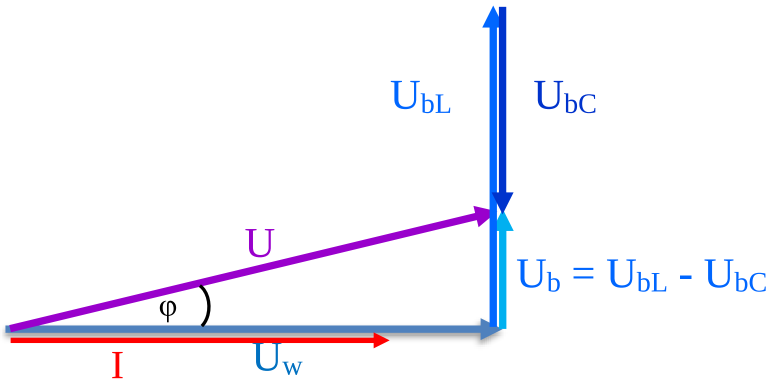
Reihenschaltung aus R und X_L ist analog zu Reihenschaltung aus R und X_c.
Schüler entwickeln die Schaltung und Formeln.

4.1.3. Reihenschaltung von R, X_L und X_C



Annahme: $X_L > X_C$ d. h.: der Strom erzeugt über X_L einen größeren Spannungsabfall als über X_C.

Gegenüber I ist U_L um 90° voreilend und U_C um 90° nacheilend. Die zahlenmäßige Differenz der beiden Blindspannungen U_L und U_C ist zu ermitteln und mit dieser ist im Spannungsdreieck zu rechnen. Sonst gelten die Formeln wie besprochen.



<u>Widerstände:</u>	<u>Spannungen:</u>	<u>Leistungen:</u>
$X = X_L - X_C$	$U_b = U_{bL} - U_{bC}$	$Q = Q_C - Q_L$
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	$U = \sqrt{U_w^2 + U_b^2}$	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

<u>Winkel:</u>

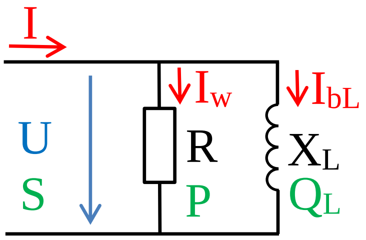
$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U_w}{U} = \frac{P}{S}$	$\sin\varphi = \frac{U_B}{U} = \frac{X}{Z} = \frac{Q}{S}$	$\tan\varphi = \frac{X}{R} = \frac{U_b}{U_w} = \frac{Q}{P}$

4.2. Parallelschaltung von Wirk- und Blindwiderständen

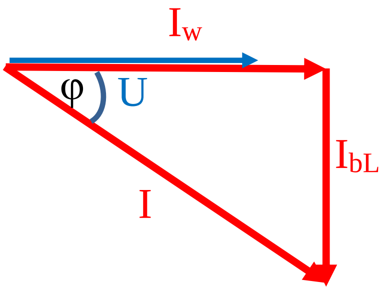
Buch Seite 158 und 159

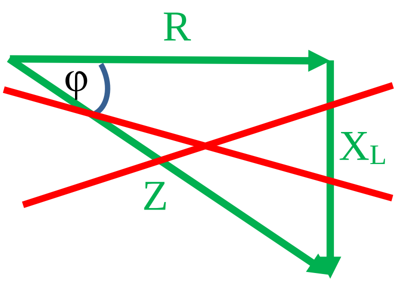
4.2.1. Parallelschaltung von R und X_L

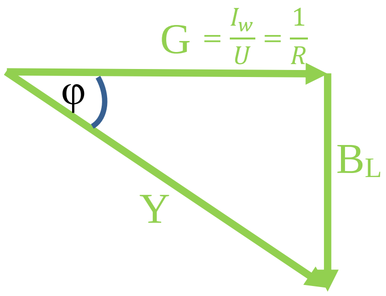
Die gemeinsame Größe für beide Widerstände ist bei der Parallelschaltung die Spannung. I_R ist mit U phasengleich, I_L ist 90° nacheilend, Resultierende ist I. Der Winkel zwischen U und I ist der Phasenverschiebungswinkel φ.



Dividiert man die Teilströme durch die Spannung, so erhält man das **Leitwertdreieck**, multipliziert man sie, so erhält man das Leistungsdreieck.







Schüler zeichnen das Leistungsdreieck

Leitwertdreieck	Stromdreieck	Leistungsdreieck
$G = \frac{1}{R} = \frac{I_w}{U}$	$I_R = \frac{U}{R}$	$P = U \cdot I_R$
$B_L = \frac{1}{X_L} = \frac{I_L}{U}$	$I_L = \frac{U}{X_L}$	$Q_L = U \cdot I_L$
$Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{U}$	$I = \frac{U}{Z}$	$S = U \cdot I$
$Y = \sqrt{G^2 + B_L^2}$	$I = \sqrt{I_w^2 + I_{bL}^2}$	$S = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$
$\cos\varphi = \frac{G}{Y} = \frac{I_w}{I} = \frac{P}{S}$	$\sin\varphi = \frac{B_L}{Y} = \frac{I_{bL}}{I} = \frac{Q_L}{S}$	$\tan\varphi = \frac{B_L}{G} = \frac{I_{bL}}{I_w} = \frac{Q_L}{P}$

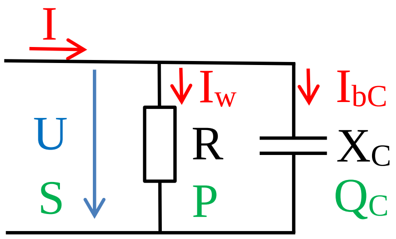
Analog dazu ist die Parallelschaltung von R und X_C

Legende:

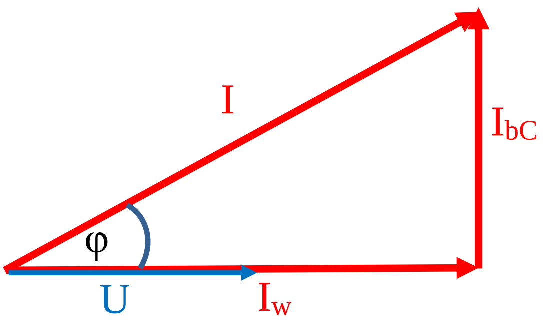
I_R .... Strom über den ohm. Wid. in A
I_L................ Strom ü. d. ind. Blindwid. in A
I............. resultierender Strom in A
P............ Wirkleistung in W
S............ Scheinleistung in VA

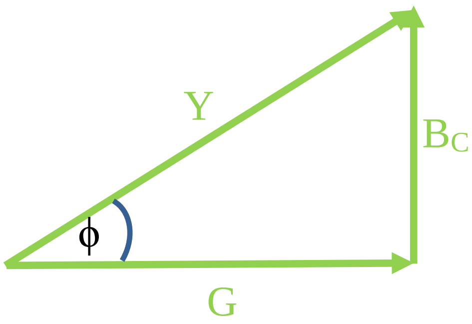
G............ohm. Leitwert in S (Siemens)
B_L ....ind. Blindleitwert in S
Y............Scheinleitwert in S
Q_L ....ind. Blindleistung in var

4.2.2. Parallelschaltung von R und X_C



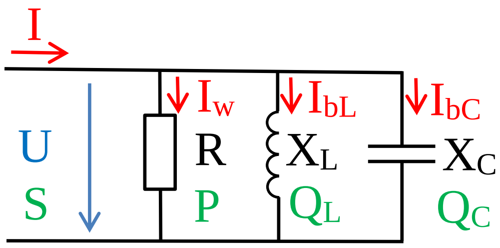
Die gemeinsame Größe für beide Widerstände ist bei der Parallelschaltung die Spannung. I_R ist mit U phasengleich, I_c ist 90° voreilend, die Resultierende ist I. Der Winkel zwischen U und I ist der Phasenverschiebungswinkel φ.





Parallelschaltungschaltung aus R und X_c ist analog zu Parallelschaltung aus R und X_L.
Schüler entwickeln die Schaltung, das Leistungsdreieck und die Formeln.

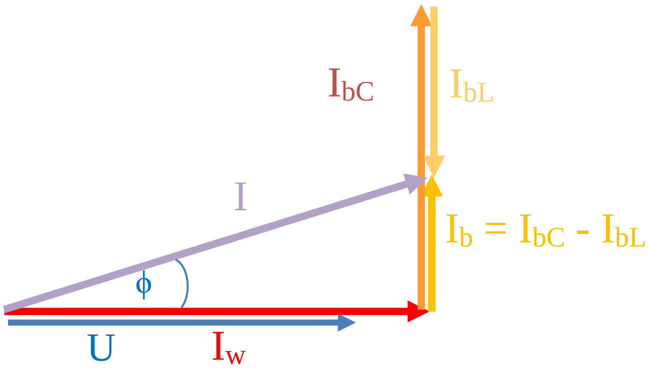
4.2.3. Parallelschaltung von R, X_L und X_C



I_R ist mit U phasengleich, I_L ist U um 90° nacheilend, I_C ist um 90° voreilend.

Die zahlenmäßige Differenz der beiden Blindströme I_C und I_L ist zu ermitteln und mit diesem verbleibenden Blindstrom I_B ist im Stromdreieck zu rechnen. Sonst gelten die Formeln wie besprochen.

Annahme: $X_C < X_L$:



Leitwerte:	Ströme:	Leistungen:
$B = B_C - B_L$	$I_B = I_C - I_L$	$Q = Q_C - Q_L$
$Y = \sqrt{G^2 + B^2}$	$I = \sqrt{I_w^2 + I_b^2}$	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Winkel:

$\cos\varphi = \frac{G}{Y} = \frac{I_w}{I} = \frac{P}{S}$	$\sin\varphi = \frac{B}{Y} = \frac{I_b}{I} = \frac{Q}{S}$	$\tan\varphi = \frac{B}{G} = \frac{I_b}{I_w} = \frac{Q}{P}$

4.3. Verlustleistung (vertieft):

4.3.1. Verlustleistung bei Spulen:

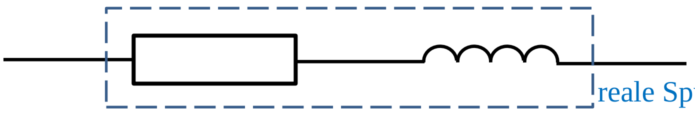
Siehe Seite 162

Bei realen Spulen treten Verluste auf, welche in Wärme umgesetzt werden.

Die Differenz zwischen aufgenommener und abgegebener elektrischen Leistung nennt man die **Verlustleistung**.

Wicklungsverluste (Kupferverluste), durch den Leiterwiderstand treten bei Gleich- und Wechselstrom auf ($P_{cu} = I^2 . R$).
Eisenverluste, durch die Ummagnetisierung und den Induktionsströmen (Wirbelströme im Spulenkern), treten nur bei Wechselstrom auf (können nur rechnerisch ermittelt wrden).

Alle Verluste werden in Wärme umgesetzt und werden daher als **zusätzlicher Wirkwiderstand R in Reihe** zur Spule in der Ersatzschaltung für reale Spulen eingezeichnet.



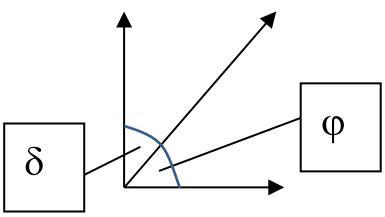
4.3.2. Verlustleistung bei Kondensatoren

Bei realen Kondensatoren enstehen Verluste, welche ebenfalls in Wärme umgesetzt werden.

Dielektrische Verluste entstehen bei Wechselstrom durch das Ändern der Molekuardipole im Dieelektrikum.
Strömwärmeverluste treten bei Wechselstrom und Gleichstrom dadurch auf, dass die Metallfolien als elektrischer Leiter einen Wirkwiderstand haben.

Alle Verluste werden in Wärme umgesetzt und werden daher **als zusätzlicher Wirkwiderstand R parallel** zum Kondensator in der Ersatzschaltung für reale Kondensatoren eingezeichnet.

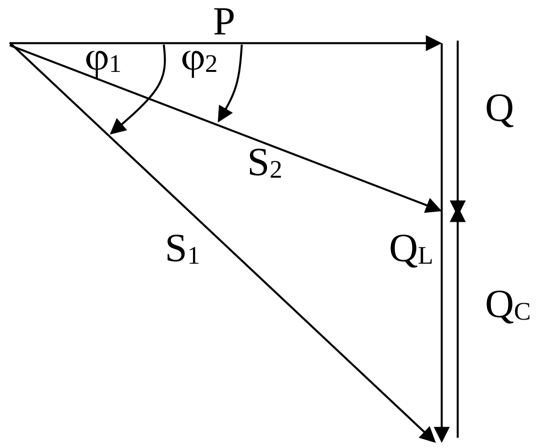
Infolge der Verluste ist der Phasenverschiebungswinkel nicht genau 90° sondern stets kleiner. Die Differenz 90° - φ bezeichnet man als **Verlustwinkel δ (Delta)**. Der Tangens des Verlustwinkel wird **Verlustfaktor d** genannt und der Kehrwert ist der **Gütefaktor Q**.



5. WECHSELSTROMKOMPENSATION

Buch Seite 156

Die induktive Blindleistung und die kapazitive Blindleistung sind um 180° phasenverschoben, dh. der Kondensator liefert immer dann Blindenergie in das Netz, wenn die Induktivität der Drossel Blindenergie aufnimmt. Bleibt die Wirkleistung gleich, so sinken die Scheinleistung und die Stromstärke.
Man nennt das Ausgleichen der induktiven durch die kapazitive Blindleistung **KOMPENSATION** . Buch Seite 156 / 161 Bild 2



$$Q_L = P \cdot \tan\varphi_1$$
$$Q = P \cdot \tan\varphi_2$$

$$Q_C = Q_L - Q$$

$$\mathbf{Q_c = P \cdot (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2)}$$

Durch die Kompensation wird das Netz der EVU`s entlastet. Buch Seite 156
Man ist erstrebt eine Kompensation von cosφ 0,9 – 0,95 zu erreichen.
Den Fachmann interessiert nur wie groß der Kondenssator gewählt werden muss.

<u>Man unterscheidet:</u>

- **Einzelkompensation**: jeder Motor hat seinen eigenen Kompensationskondensator
- **Gruppenkompensation**: mehrere Verbraucher werden von einem Kondensator kompensiert.
- **Zentralkompensation**: eine zentrale Kondensatorbatterie kompensiert einen ganzen Betrieb. Der cosφ wird automatisch geregelt.

Geräte die den cosφ des Netzes verbessern heißen Phasenschieber.
Kompensation auf cosφ = 1 bringt Probleme wegen der Spannungs- und Stromüberhöhung (Schwingkreis).

6. SCHWINGKREISE VERTIEFT

Siehe auch Buch S 163

Schwingkreise sind Reihen- oder Parallelschaltungen von einer Spule und eines Kondensators. Man verwendet Schwingkreise zum Herausheben oder Unterdrücken einer bestimmten Frequenz aus einem Frequenzgemisch z. B.: die Frequenz eines Senders oder Empfängers.

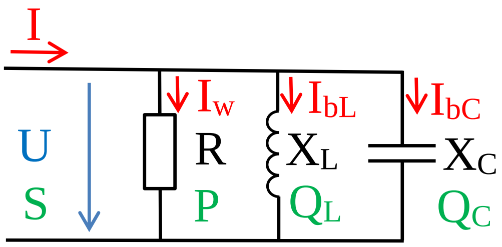
Resonanz: Resonanz heißt, dass X_L des Schwingkreises gleich groß ist wie X_C.

$X_C = X_L$	$\Rightarrow$	$\frac{1}{2\cdot\pi\cdot f\cdot C} = 2\cdot\pi\cdot f\cdot L$
$1 = 2\cdot 2\cdot\pi\cdot\pi\cdot f\cdot f\cdot L\cdot C$	$\Rightarrow$	$1 = 2^2\cdot\pi^2\cdot f^2\cdot L\cdot C$
$f^2 = \frac{1}{2^2\cdot\pi^2\cdot L\cdot C}$	$\Rightarrow$	$f = \sqrt{\frac{1}{2^2\cdot\pi^2\cdot L\cdot C}}$

$$\boxed{f_{res} = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot\sqrt{L\cdot C}}}$$

6.1. Stromresonanz (Parallelschwingkreis)

Buch Seite 224



Gegeben:
$U = 220\ V$
$R = 10\ \Omega$
$L = 50\ mH$
$C = 203\ \mu F$

Gesucht:
$X_L = ?$
$X_C = ?$
$I_R = ?$
$I_L = ?$
$I_C = ?$
$I = ?$
$\cos\varphi = ?$
$\varphi = ?$
$Z = ?$

6.1.1. $X_L < X_C$

f = 25 Hz

$$X_L = \omega \times L$$
$$X_L = 2\times\pi\times 25Hz\times 50\times 10^{-3}\,H$$
$$\underline{\underline{X_L = 7{,}85\Omega}}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega\times C}$$
$$X_C = \frac{1}{2\times\pi\times 25Hz\times 203\times 10^{-6}\,F}$$
$$\underline{\underline{X_C = 31{,}4\Omega}}$$

$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220\,V}{10\,\Omega}$$
$$\underline{\underline{I_R = 22\,A}}$$

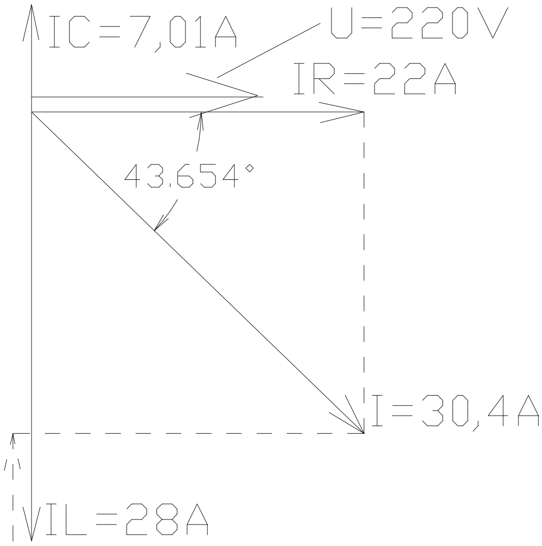
$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{220\,V}{7{,}85\,\Omega}$$
$$\underline{\underline{I_L = 28\,A}}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220\,V}{31{,}4\,\Omega}$$
$$\underline{\underline{I_C = 7{,}01\,A}}$$

$$I_B = I_L - I_C$$
$$I_B = 28\,A - 7{,}01\,A$$
$$\underline{I_B = 21\,A}$$
$$I = \sqrt{I_R^2 + I_B^2}$$
$$I = \sqrt{22\,A^2 + 21\,A^2}$$
$$\underline{\underline{I = 30{,}4\,A}}$$

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{22\,A}{30{,}4\,A}$$
$$\underline{\underline{\cos\varphi = 0{,}724 \Rightarrow \varphi = 43{,}6°}}$$

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220\,V}{30{,}4\,A}$$
$$\underline{\underline{Z = 7{,}24\,\Omega}}$$



6.1.2. $X_L = X_C$

f = 50 Hz

$$X_L = \omega \times L$$
$$X_L = 2 \times \pi \times 50\,Hz \times 50 \times 10^{-3}\,H$$
$$\underline{\underline{X_L = 15{,}7\,\Omega}}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \times C}$$
$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times 50\,Hz \times 203 \times 10^{-6}\,F}$$
$$\underline{\underline{X_C = 15{,}7\,\Omega}}$$

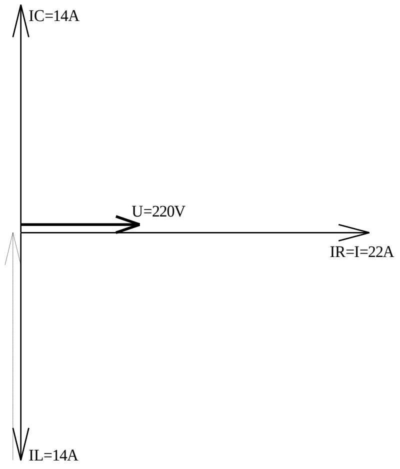
$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220\,V}{10\,\Omega}$$
$$\underline{\underline{I_R = 22\,A}}$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{220\,V}{15{,}7\,\Omega}$$
$$\underline{\underline{I_L = 14\,A}}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220\,V}{15{,}7\,\Omega}$$
$$\underline{\underline{I_C = 14\,A}}$$

$$I_B = I_L - I_C$$
$$I_B = 14\,A - 14\,A$$
$$\underline{I_B = 0\,A}$$
$$I = \sqrt{I_R^2 + I_B^2}$$
$$I = \sqrt{22\,A^2 + 0\,A^2}$$
$$\underline{\underline{I = 22\,A}}$$

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{22\,A}{22\,A}$$
$$\underline{\underline{\cos\varphi = 1 \Rightarrow \varphi = 0°}}$$



$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220\,V}{22\,A}$$
$$\underline{\underline{Z = 10\Omega}}$$

6.1.3. $X_L > X_C$

$\underline{\underline{f = 100\text{ Hz}}}$

$$X_L = \omega \times L$$
$$X_L = 2 \times \pi \times 100\,Hz \times 50 \times 10^{-3}\,H$$
$$\underline{\underline{X_L = 31{,}4\Omega}}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \times C}$$
$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times 100\,Hz \times 203 \times 10^{-6}\,F}$$
$$\underline{\underline{X_C = 7{,}84\Omega}}$$

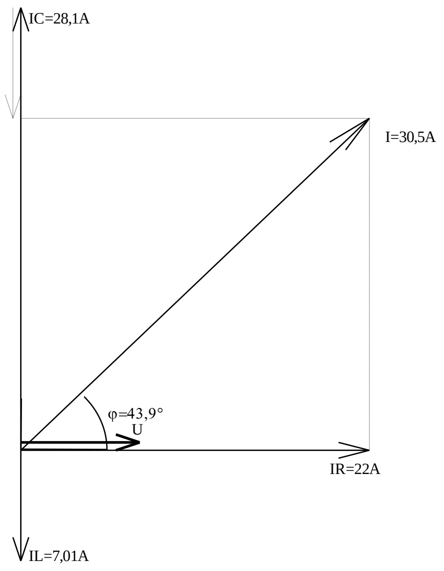
$$I_R = \frac{U}{R} = \frac{220\,V}{10\Omega}$$
$$\underline{\underline{I_R = 22\,A}}$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{220\,V}{31{,}4\Omega}$$
$$\underline{\underline{I_L = 7{,}01\,A}}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{220\,V}{7{,}84\Omega}$$
$$\underline{\underline{I_C = 28{,}1\,A}}$$

$$I_B = |I_L - I_C|$$
$$I_B = |7{,}01\,A - 28{,}1\,A|$$
$$\underline{I_B = 21{,}1\,A}$$
$$I = \sqrt{I_R^2 + I_B^2}$$
$$I = \sqrt{22\,A^2 + 21{,}1\,A^2}$$
$$\underline{\underline{I = 30{,}5\,A}}$$

$$\cos\varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{22\,A}{30{,}5\,A}$$
$$\underline{\underline{\cos\varphi = 0{,}721 \Rightarrow \varphi = 43{,}9°}}$$



$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220\,V}{30{,}5\,A}$$
$$\underline{\underline{Z = 7{,}21\Omega}}$$

6.1.4. Folgerung

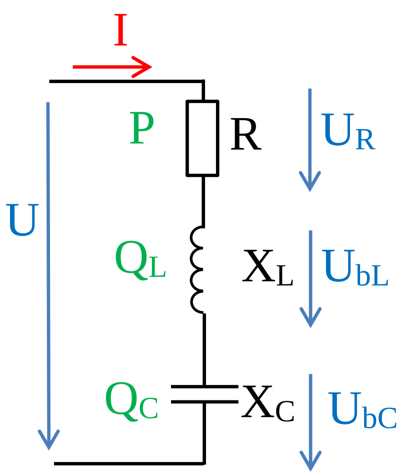
Die Stromresonanz tritt bei einer Parallelschaltung von L und C auf, wenn die Frequenz der Wechselspannung der (Eigen-) Resonanzfrequenz ($X_L = X_C$) des Schwingkreises entspricht.

Der Scheinwiderstand Z ist am größten, der **Strom I in der Zuleitung ist am kleinsten** (Sperrkreis).

Gefahr: Wenn X_C und X_L gegenüber R sehr klein sind, dann fließt im Resonanzfall **zwischen X_C und X_L ein sehr großer Strom**, ohne dass dies an den Zuleitungen bemerkt wird!

6.2. Spannungsresonanz (Reihenschwingkreis)

Buch Seite 224



Gegeben:
U = 220 V
R = 10 Ω
L = 50 mH
C = 203 µF

Gesucht:
X_L = ?
X_C = ?
Z = ?
I = ?
U_R = ?
U_L = ?
U_C = ?
cosφ = ?
φ = ?

6.2.1. $X_L < X_C$

f = 25 Hz

$$X_L = \omega \times L$$
$$X_L = 2 \times \pi \times 25\text{Hz} \times 50 \times 10^{-3}\,\text{H}$$
$$X_L = 7{,}85\,\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \times C}$$
$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times 25\text{Hz} \times 203 \times 10^{-6}\,\text{F}}$$
$$X_C = 31{,}4\,\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$
$$Z = \sqrt{10\Omega^2 + (7{,}85\Omega - 31{,}4\Omega)^2}$$
$$Z = 25{,}6\,\Omega$$

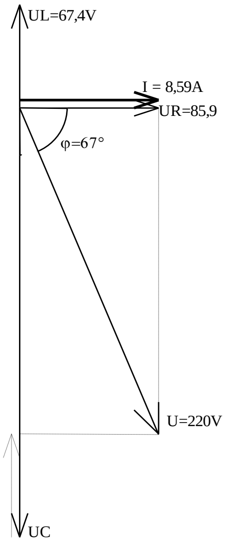
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220\,\text{V}}{25{,}6\,\Omega}$$
$$I = 8{,}59\,\text{A}$$

$$U_R = I \times R$$
$$U_R = 8{,}59\,\text{A} \times 10\,\Omega$$
$$U_R = 85{,}9\,\text{V}$$

$$U_L = I \times X_L$$
$$U_L = 8{,}59\,\text{A} \times 7{,}85\,\Omega$$
$$U_L = 67{,}4\,\text{V}$$

$$U_C = I \times X_C$$
$$U_C = 8{,}59\,\text{A} \times 31{,}4\,\Omega$$
$$U_C = 270\,\text{V}$$

$$\cos\varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{85{,}9\,V}{220\,V}$$
$$\cos\varphi = 0{,}39 \Rightarrow \varphi = 67°$$



6.2.2. $X_L = X_C$

f = 50 Hz

$$X_L = \omega \times L$$
$$X_L = 2 \times \pi \times 50\,Hz \times 50 \times 10^{-3}\,H$$
$$X_L = 15{,}7\,\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \times C}$$
$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times 50\,Hz \times 203 \times 10^{-6}\,F}$$
$$X_C = 15{,}7\,\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$
$$Z = \sqrt{10\Omega^2 + (15{,}7\Omega - 15{,}7\Omega)^2}$$
$$Z = 10\Omega$$

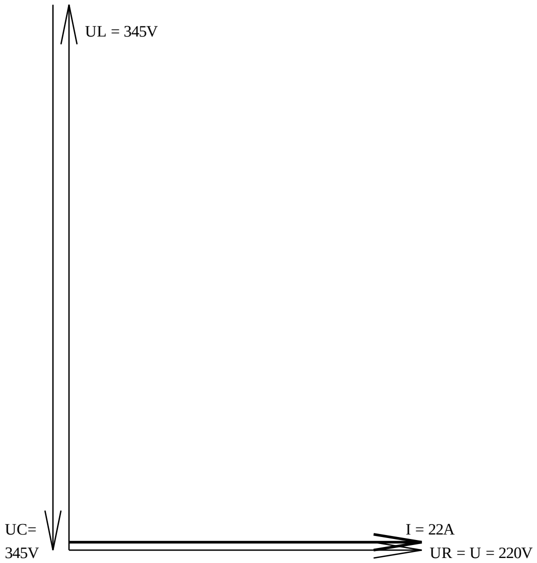
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220V}{10\Omega}$$
$$I = 22A$$

$$U_R = I \times R$$
$$U_R = 22A \times 10\Omega$$
$$U_R = 220V$$

$$U_L = I \times X_L$$
$$U_L = 22A \times 15{,}7\Omega$$
$$U_L = 345V$$

$$U_C = I \times X_L$$
$$U_C = 22A \times 15{,}7\Omega$$
$$U_C = 345V$$

$$\cos\varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{220\,V}{220\,V}$$
$$\cos\varphi = 1 \Rightarrow \varphi = 0°$$



6.2.3. $X_L > X_C$

f = 100 Hz

$$X_L = \omega \times L$$
$$X_L = 2 \times \pi \times 100\,\text{Hz} \times 50 \times 10^{-3}\,\text{H}$$
$$X_L = 31{,}4\Omega$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \times C}$$
$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times 100\,\text{Hz} \times 203 \times 10^{-6}\,\text{F}}$$
$$X_C = 7{,}84\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$
$$Z = \sqrt{10\Omega^2 + (31{,}4\Omega - 7{,}84\Omega)^2}$$
$$Z = 25{,}6\Omega$$

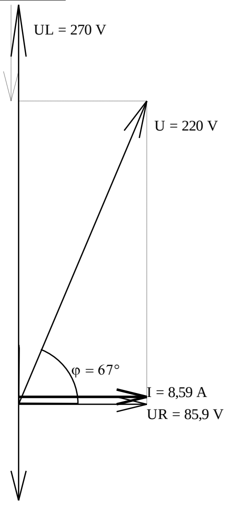
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220\,\text{V}}{25{,}6\Omega}$$
$$I = 8{,}59\,\text{A}$$

$$U_R = I \times R$$
$$U_R = 8{,}59\,\text{A} \times 10\Omega$$
$$U_R = 85{,}9\,\text{V}$$

$$U_L = I \times X_L$$
$$U_L = 8{,}59\,\text{A} \times 31{,}4\Omega$$
$$U_L = 270\,\text{V}$$

$$U_C = I \times X_C$$
$$U_C = 8{,}59\,\text{A} \times 7{,}84\Omega$$
$$U_C = 67{,}3\,\text{V}$$

$$\cos\varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{85{,}9\,\text{V}}{220\,\text{V}}$$
$$\cos\varphi = 0{,}39 \Rightarrow \varphi = 67°$$



6.2.4. Folgerung

Die Spannungsresonanz tritt bei einer Serienschaltung von L und C auf, wenn die Frequenz der Wechselspannungsquelle der (Eigen-) Resonanzfrequenz des Schwingkreises entspricht.

Scheinwiderstand Z ist am kleinsten, **Strom I in der Zuleitung ist am größten** (Saugkreis).

Gefahr:

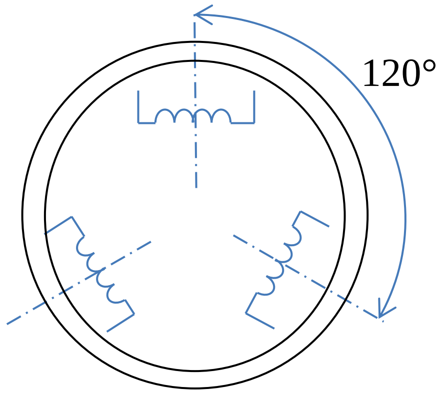
Wenn X_C und X_L gegenüber R sehr groß sind, dann fällt im Resonanzfall **über X_C und X_L eine sehr große Spannung ab**, obwohl nur eine vergleichsweise kleine Spannung angelegt ist.

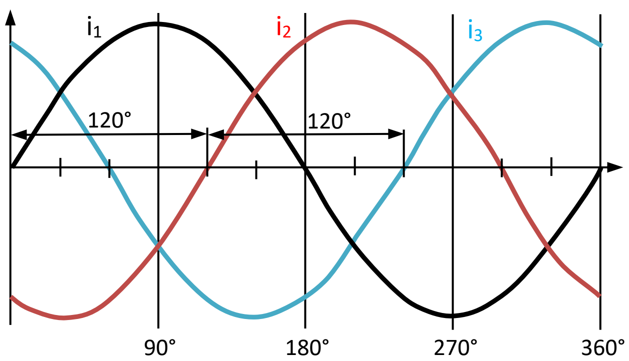
Weiters ist bei einer Leuchtstofflampe (Serienkompensation) eine Kompensation auf cos φ = 1 nicht möglich, da sonst die volle Netzspannung an der Lampe anliegt, die aber nur für ca. 110 V ausgelegt ist. Aus diesem Grund ist eine kompensierte Leuchtstofflampe stets so überkompensiert, dass sie jenen schlechten cosφ, den sie zuvor in induktiver Richtung hatte, dann in kapazitiver Richtung hat. Nur dadurch ist gewährleistet, dass die Leuchtstofflampe die richtige Betriebsspannung erhält!

7. DREHSTROMENTSTEHUNG

7.1. Erzeugung des Dreiphasenwechselstromes (Drehstrom)

Buch Seite 176





Dreht man einen Magneten (Stab- oder Elektromagnet) zwischen drei um 120° räumlich versetzten, gleichen Spulen, so werden in ihnen Spannungen induziert.

Werden die um 120° phasenverschobenen Spannungen in ein Liniendiagramm eigetragen; so erhält man die drei Sinuslinien für den Drehstrom.

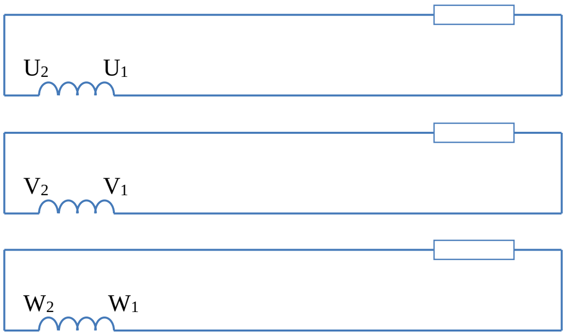
Drehstrom, sind drei um 120° verschobene Wechselströme !

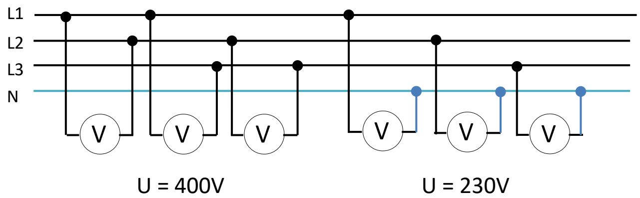
Die drei Spulen eines solchen Generators nennt man die **Stränge** und die darin induzierte Spannung nennt man **Strangspannungen** (Dreiphasen-Wechselspannung).

Die Anfänge der Stränge nennt man U1, V1 und W1, die Enden nennt man U2, V2 und W2.

Addiert man zu einem beliebigen Augenblick die Spannungen (vorzeichenrichtig), **so ist die Summe immer Null**.

7.2. Verkettung





Würde man an jede Spule einen Verbraucher anschließen, so erhält man drei voneinander isolierte Stromkreise. Es wären dann sechs Leitungen zu verlegen, die miteinander nicht vertauscht werden dürfen.

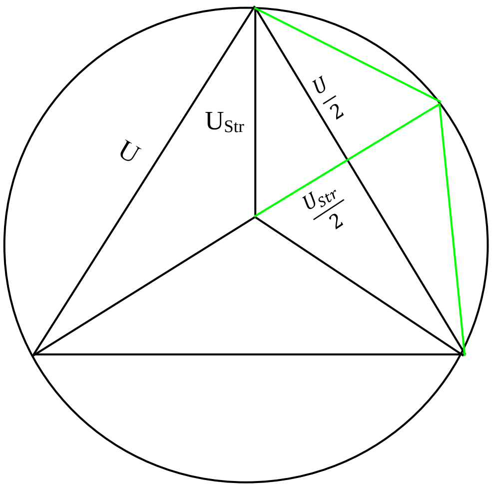
Dies ist unpraktisch und daher nicht üblich.

<u>Vorteile der Verkettung:</u>

- Weniger Leitungen
- Mehr Spannungen
- Erzeugung eines Drehfeldes

7.2.1. Verkettungsfaktor

Buch Seite 179



cos 60° . U_{Str} = 0,5 . U_{Str} (oder Gleichschenkeliges Dreieck)

$$U_{Str}^2 = \left(\frac{U}{2}\right)^2 + \left(\frac{U_{Str}}{2}\right)^2$$

…….

…….

$$U_{Str}\sqrt{3} = U$$

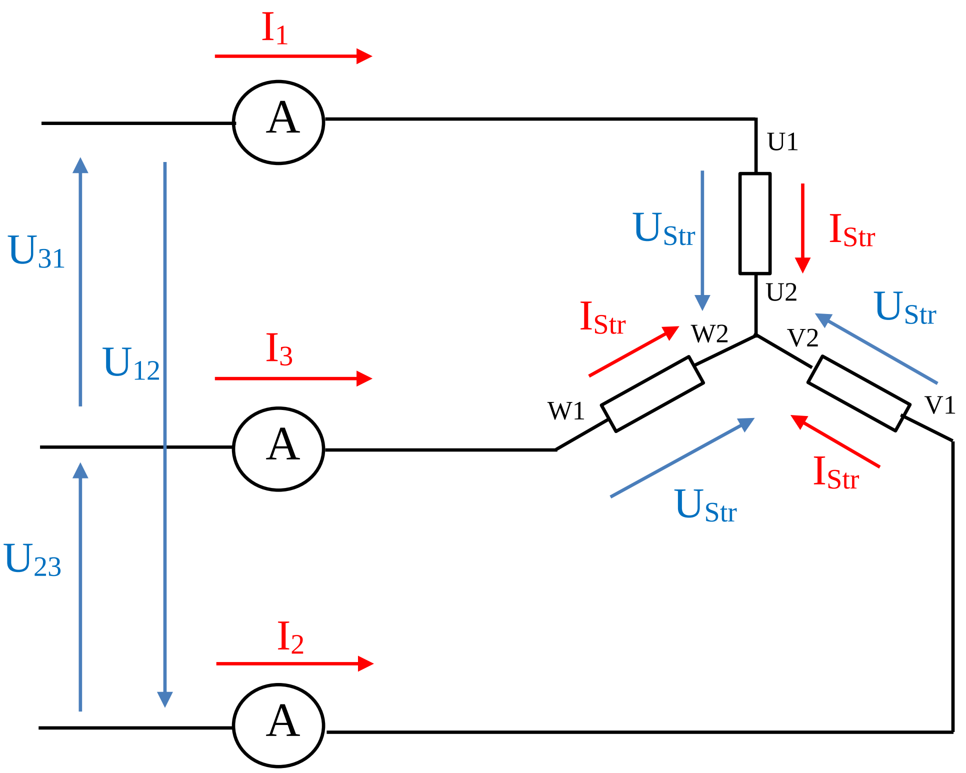
Der Verkettungsfaktor entsteht auf Grund der Phasenverschiebung von 120°.

Mit 400 V Außenleiterspannung entseht eine Strangspannung U_{Str} = 230,94V.

8. Stern- und Dreieckschaltung

8.1. Sternschaltung

Buch Seite 178



Man erhält eine Sternschaltung, indem man die Enden der drei Spulen miteinander verbindet. Die Anfänge der Spulen sind dann an den Außenleitern angeschlossen, der Verbindungspunkt der Enden ist der Anschluss für den Neutralleiter.

Gehen von einem Spannungserzeuger vier Leitungen weg, so spricht man von einem Vierleiternetz (wie unser Netz 230 V / 400 V).

Werden an jeden Außenleiter **gleich große Verbraucher** zum Neutralleiter angeschlossen, so fließt über den **Neutralleiter kein Strom**. Sind die Verbraucher an den drei Außenleitern unterschiedlich groß fließt über den Neutralleiter ein Ausgleichsstrom.

Daher kann bei symmetrischen Stromverbrauchern (Motore, Glühöfen, Warmwasserspeicher usw.) auf den Neutralleiter verzichtet werden, ohne dass sich die Ströme (Leistungen) verändern.

Bei der Sternschaltung sind die Strangströme gleich groß wie die Außenleiterströme!

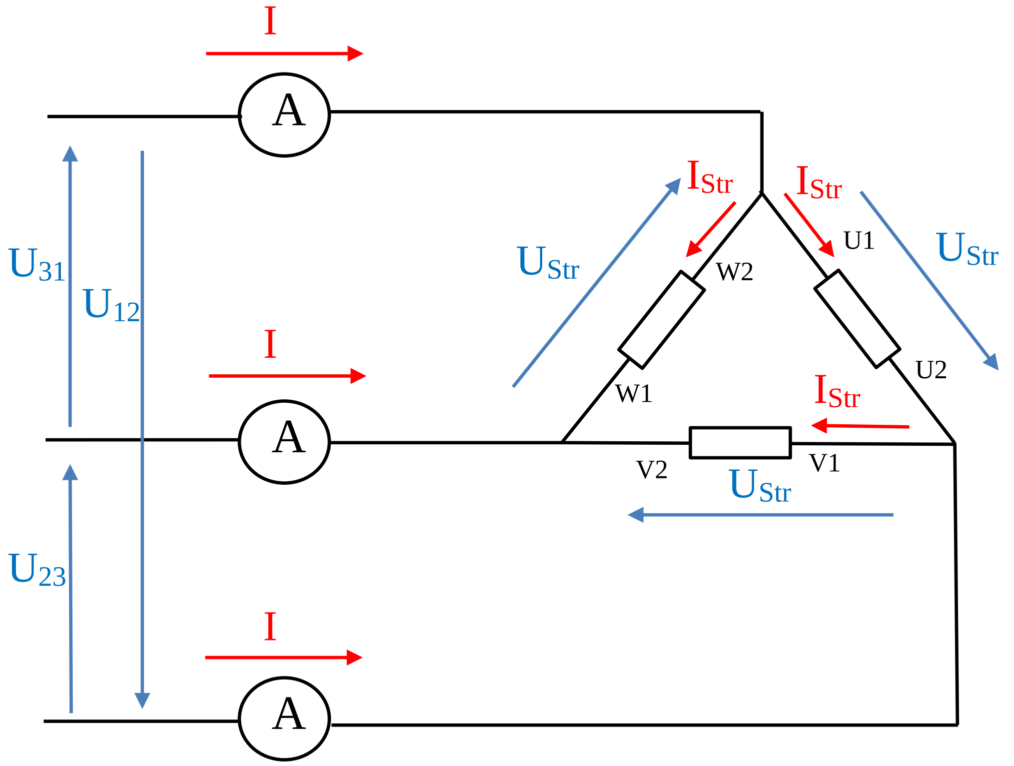
$$I = I_{Str}$$

Bei der Sternschaltung ist die Außenleiterspannung um $\sqrt{3}$ (=1,732) größer als die Strangspannung.

$$U = \sqrt{3} \cdot U_{Str} \qquad U_{Str} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$

8.2. Dreieckschaltung

Buch Seite 180



Man erhält eine Dreieckschaltung, indem man die Enden der einen Spule mit den Anfängen der nächsten Spule verbindet.
In diesem System gibt es keinen Neutralleiter ⇒ Dreileiternetz.

Es tritt hier nur eine Spannung auf.

Bei der Dreieckschaltung ist die Außenleiterspannung gleich der Strangspannung. $\mathbf{U = U_{Str}}$

Man erhält den Außenleiterstrom, wenn man die Strangströme geometrisch subtrahiert:

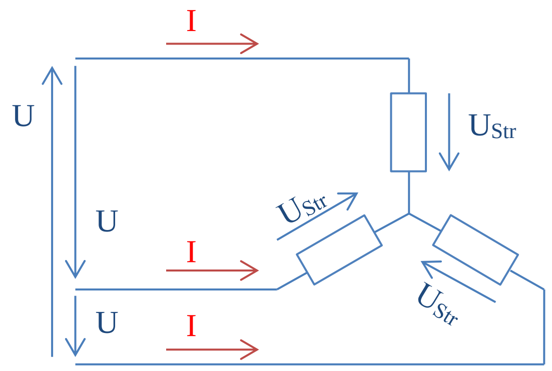
Bei der Dreieckschaltung ist der Außenleiterstrom um $\sqrt{3}$ größer als der Strangstrom. $\boldsymbol{I = \sqrt{3} \cdot I_{Str}} \qquad \boldsymbol{I_{Str} = \frac{I}{\sqrt{3}}}$

9. Drehstromleistung

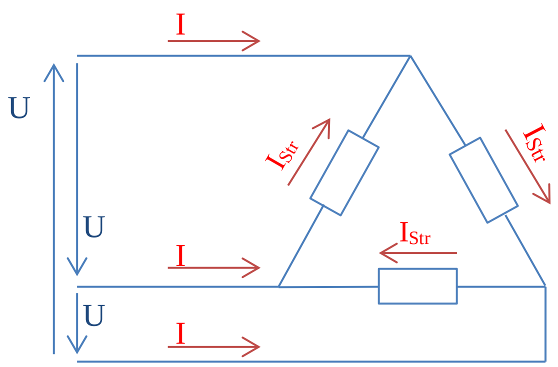
9.1. Gleichmäßige Phasenbelastung

Buch Seite 184 / 185

<table>
<tr><th><u>Sternschaltung</u></th><th><u>Dreieckschaltung</u></th></tr>
<tr><td>



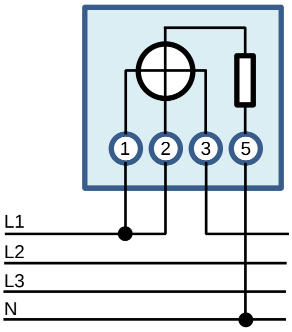
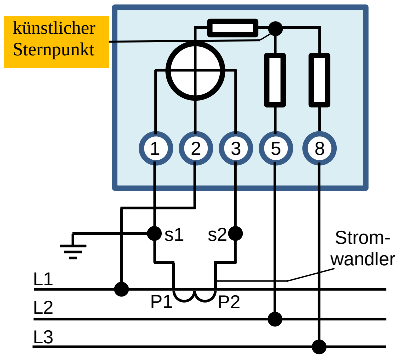
</td><td>



</td></tr>
<tr><td>$$I = I_{Str}$$</td><td>$$U = U_{Str}$$</td></tr>
<tr><td>$$U_{Str} = \frac{U}{\sqrt{3}}$$</td><td>$$I_{Str} = \frac{I}{\sqrt{3}}$$</td></tr>
<tr><td>$$S_{DS} = 3 \times S_{Str}$$</td><td>$$S_{DS} = 3 \times S_{Str}$$</td></tr>
<tr><td>$$S_{Str} = U_{Str} \times I_{(Str)}$$</td><td>$$S_{Str} = U_{(Str)} \times I_{Str}$$</td></tr>
<tr><td>$$S_{DS} = 3 \times U_{Str} \times I$$</td><td>$$S_{DS} = 3 \times U \times I_{Str}$$</td></tr>
<tr><td>$$S_{DS} = 3 \times \frac{U}{\sqrt{3}} \times I$$</td><td>$$S_{DS} = 3 \times U \times \frac{I}{\sqrt{3}}$$</td></tr>
<tr><td>$$S_{DS} = \sqrt{3} \times \sqrt{3} \times \frac{U}{\sqrt{3}} \times I$$</td><td>$$S_{DS} = \sqrt{3} \times \sqrt{3} \times U \times \frac{I}{\sqrt{3}}$$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$$S_{DS} = U \times I \times \sqrt{3}$$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$$P_{DS} = U \times I \times \sqrt{3} \times \cos\varphi$$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$$Q_{DS} = U \times I \times \sqrt{3} \times \sin\varphi$$</td></tr>
</table>

<u>Erkenntnis:</u> Wenn man die Außenleiterspannung und den Außenleiterstrom misst, so ist es für die Berechnung der symmetrischen DS-Leistung egal, ob der Verbraucher in Y oder in Δ geschaltet ist (allerdings ist es nicht das Gleiche, ob man einen Verbraucher in Y oder Δ schaltet!!!).

9.1.1. Leistungsmessung bei gleichmäßiger Phasenbelastung im

Vierleiternetz	Dreileiternetz
	

Ermittelt man mit einem Messgerät in einem Drehstromkreis den Außenleiterstrom und -spannung, so kann man nur die Scheinleistung errechnen. Bei einem rein ohmschen Verbraucher ist die Scheinleistung S gleich der Wirkleistung P (cos φ = 1). Ist jedoch die Phasenverschiebung nicht bekannt, so muss man mittels eines cos φ-Messers den Phasenverschiebungswinkel oder mittels eines Leistungsmessers die Wirkleistung ermitteln.

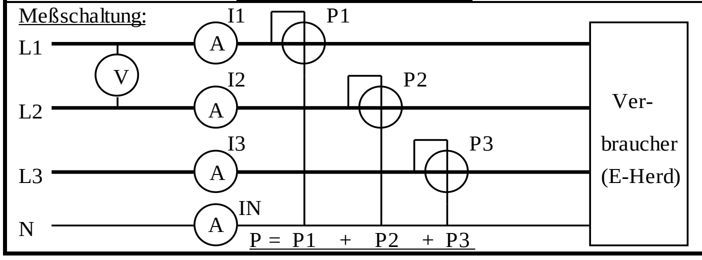
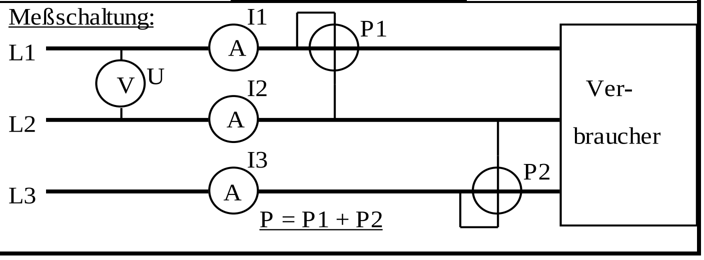
Da im Gegensatz zum Leistungsmessgerät ein cos φ-Messgerät selten zur Verfügung steht, wird der cos φ über I, U und P (Einwattmetermethode) errechnet:

$S_{DS} = U \times I \times \sqrt{3}$	$P_{DS} = 3 \times P_{Str}$	$\cos\varphi = \frac{P_{DS}}{S_{DS}}$

9.2. Ungleiche Phasenbelastung

Beachte: Bei ungleicher Phasenbelastung dürfen die Drehstromformeln für die Leistungsberechnung nicht verwendet werden. Sämtliche Größen müssen jeweils für einen einzelnen Strang errechnet werden. Dies ist sehr einfach, weil es sich dann um ein Wechselstromsystem handelt. Der Neutralleiterstrom (Sternschaltung) bzw. der Außenleiterstrom (Dreieckschaltung) kann zeichnerisch ermittelt werden.

9.2.1. Leistungsmessung bei ungleichmäßiger Phasenbelastung in

Vierleiternetz	Dreileiternetz
	

9.2.2. Sternschaltung

Beispiel 1:

geg:
E-Herd, drei Platten
U= 230 V/400 V
Platte 1 = 1500 W
Platte 2 = 850 W
Platte 3 = 1800 W

I_1=
I_2=
I_3=
I_N=

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{1500\ W}{230\ V}$$

$$\underline{\underline{I_1 = 6{,}52\ A}}$$

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{850\ W}{230\ V}$$

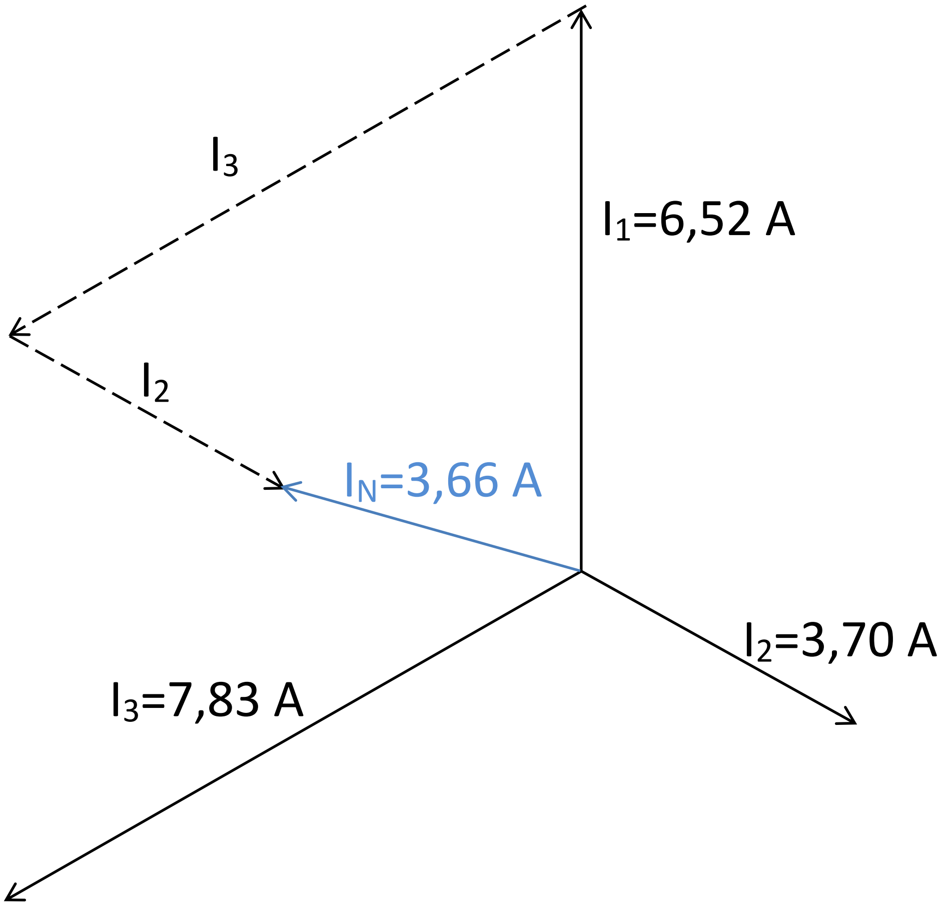
$$\underline{\underline{I_2 = 3{,}70\ A}}$$

$$I_3 = \frac{P_3}{U} = \frac{1800\ W}{230\ V}$$

$$\underline{\underline{I_3 = 7{,}83\ A}}$$

Zeichnerische Ermittlung des Neutralleiterstromes:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$



Berechnung (VERTIEFT):

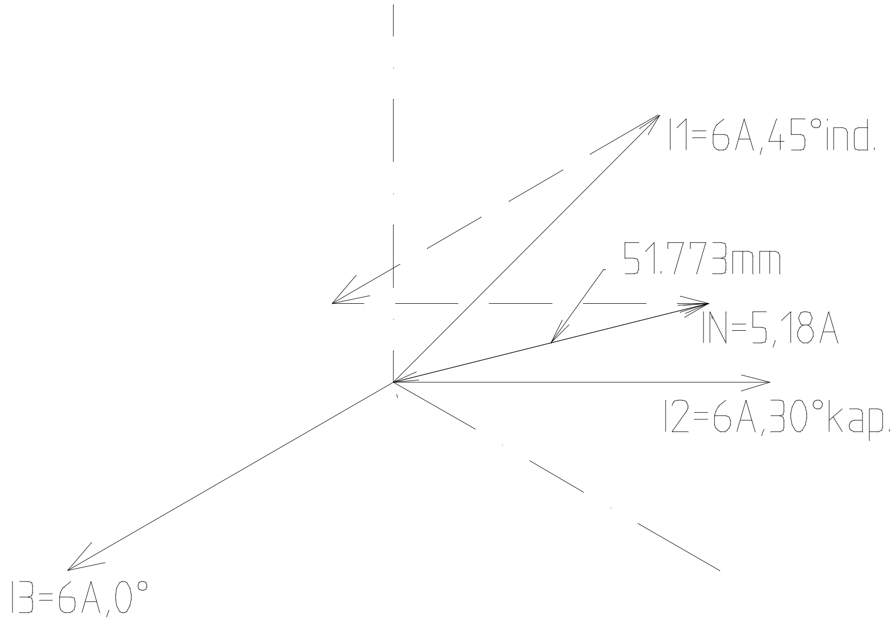
$y = I_N \cdot \cos\varphi = I_3 \cdot \cos 30 - I_2 \cdot \cos 30 = 3{,}58\ A$

$x = I_N \cdot \sin\varphi = I_1 - I_3 \cdot \sin 30 - I_2 \cdot \sin 30 = 0{,}76\ A$

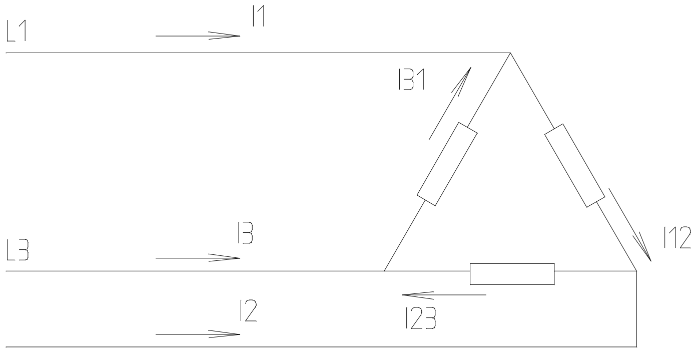
$x^2 + y^2 = {I_N}^2 = 3{,}66\ A$

Beispiel 2:

I_1 = 6 A, cos φ = 0,7071 ind. I_2 = 6 A, cos φ = 0,866 kap. I_3 = 6 A, cos φ = 1 Strommaßstab: 1 cm = 1 A I_N =



9.2.3. Dreieckschaltung



1. Kirchhoff´sches Gesetz: Die Summe der zufließenden Ströme ist gleich die Summe der abfließenden Ströme.

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_{31} = \vec{I}_{12} \Rightarrow \vec{I}_1 = \vec{I}_{12} - \vec{I}_{31}$$
$$\vec{I}_2 + \vec{I}_{12} = \vec{I}_{23} \Rightarrow \vec{I}_2 = \vec{I}_{23} - \vec{I}_{12}$$
$$\vec{I}_3 + \vec{I}_{23} = \vec{I}_{31} \Rightarrow \vec{I}_3 = \vec{I}_{31} - \vec{I}_{23}$$

Zeichnerische Ermittlung der Außenleiterströme (geometrisch)

geg:
$U = 230\ V/400\ V$
$I_{12} = 2\ A$
$I_{23} = 3\ A$
$I_{31} = 4\ A$
ohmsche Belastung

$P_{12}=$
$P_{23}=$
$P_{31}=$
$P_{ges}=$
$I_1=$
$I_2=$
$I_3=$

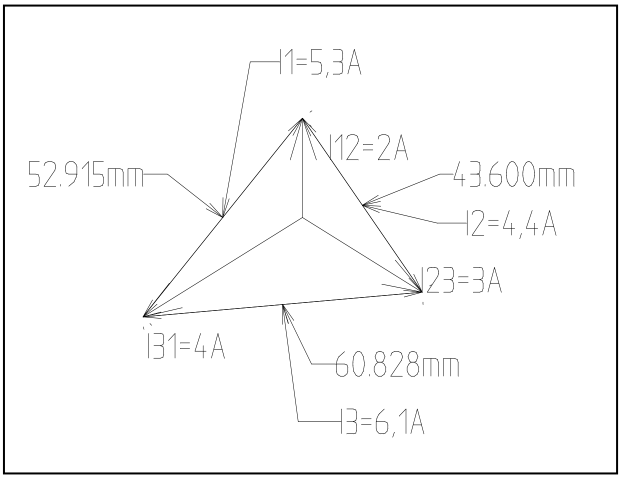
Beispiel 1:

$P_{12} = U \times I_{12} = 400\ V \times 2\ A$
$\underline{P_{12} = 800\ W}$

$P_{23} = U \times I_{23} = 400\ V \times 3\ A$
$\underline{P_{23} = 1200\ W}$

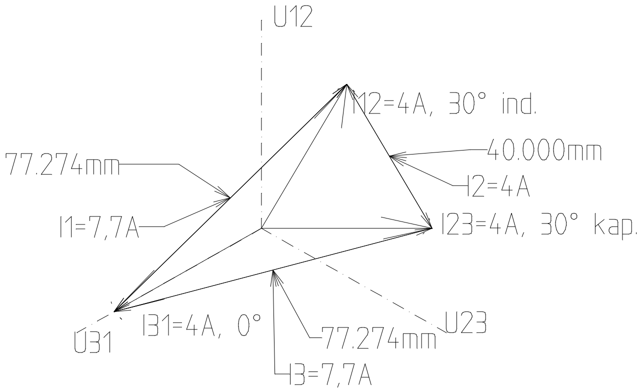
$P_{31} = U \times I_{31} = 400\ V \times 4\ A$
$\underline{P_{31} = 1600\ W}$

$P_{ges} = P_{12} + P_{23} + P_{31}$
$P_{ges} = 800W+1200W+1600W$
$\underline{P_{ges} = 3600\ W}$



Beispiel 2:

$I_{12} = 4\ A$, $\cos\varphi = 0{,}866$ ind.
$I_{23} = 4\ A$, $\cos\varphi = 0{,}866$ kap.
$I_{31} = 4\ A$, $\cos\varphi = 1$
Strommaßstab: 1 cm = 1 A



9.3. Leiterbruch

Buch Seite 192

9.3.1. Außenleiterbruch bei Sternschaltung

9.3.1.1. Mit Neutralleiter

Ist der Neutralleiter angeschlossen, so fallen nur jene Verbraucher aus, die auf diesem Außenleiter angeschlossen sind. Für die Verbraucher der anderen Außenleiter hat dies keine Auswirkung. Z. B. E-Herd: Fällt hier eine Außenleitersicherung, so können die Platten (Backrohr), die an den verbliebenen Außenleitern angeschlossen sind, weiterhin betrieben werden.

Handelt es sich um einen symmetrischen Verbraucher (z. B. Drehstromwarmwasserspeicher mit angeschlossenem Neutralleiter), so gilt bei Bruch eines Außenleiters:

Außenleiterbruch bei Sternschaltung mit angeschlossenem Neutralleiter	$\underline{P_{Rest} = \frac{2}{3} \times P_{DS}}$

9.3.1.2. Ohne Neutralleiter

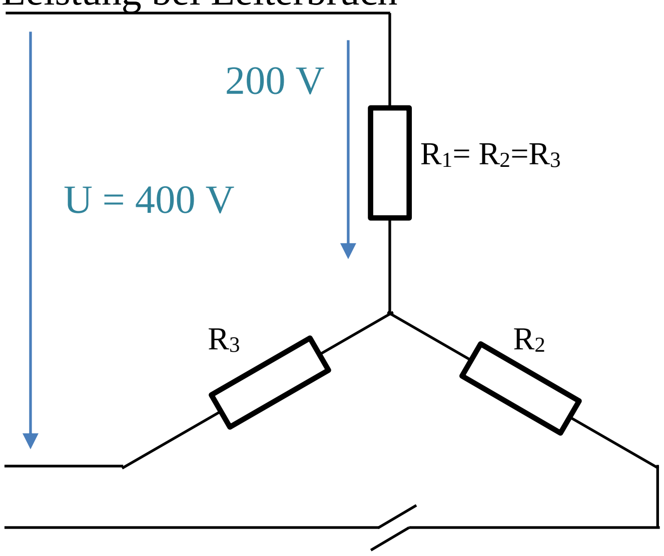
Ist der Neutralleiter nicht angeschlossen (üblich bei symmetrischen Verbrauchern) so handelt es sich um eine Reihenschaltung von zwei Widerständen, die gemeinsam an 400 V (= je 200 V/Wid.) liegen.

geg:

P_{DS} = 6 kW ==> P_{Str} = 2 kW

ges:

Leistung bei Leiterbruch



$$P_{Str} = \frac{U^2}{R_1} \quad \Rightarrow \quad R_1 = \frac{U^2}{P_{Str}}$$

$$R_1 = \frac{\left(\frac{400\ V}{\sqrt{3}}\right)^2}{2000\ W} = 26{,}67\ \Omega$$

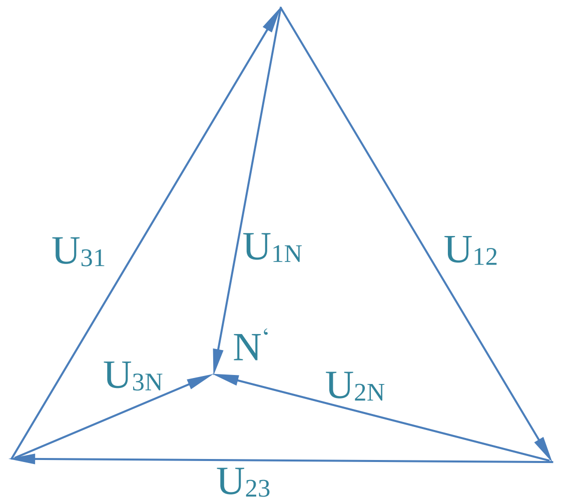
$$P_{Rest} = \frac{U^2}{R_1 + R_2} = \frac{400V^2}{2 \times 26{,}67\Omega}$$

$$\underline{P_{Rest} = 3000\ W}$$

Außenleiterbruch bei Sternschaltung ohne angeschlossenen Neutralleiter	$\underline{P_{Rest} = \frac{1}{2} \times P_{DS}}$

9.3.2. Neutralleiterbruch

Bricht bei einem symmetrischen Drehstromverbraucher der Neutralleiter, so verändert sich nichts, da ja ohnehin kein Strom über den Neutralleiter floss.

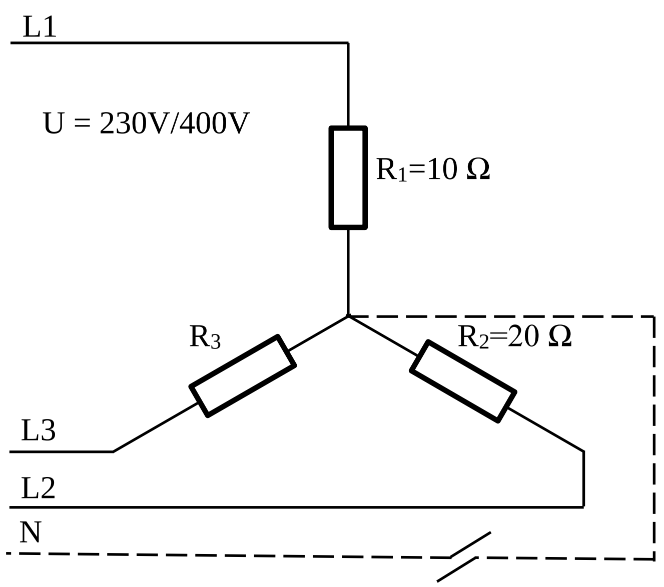


Bricht jedoch bei einem unsymmetrischen Verbraucher (z. B. bei einer Verteilerzuleitung) der Neutralleiter, **so verändern sich die Spannungen** an den Widerständen derart, dass am größten Widerstand die größte Spannung abfällt. Dies ist besonders für Kleinverbraucher (z. B. ein Radio an Außenleiter 1, und eine E-Herdplatte an Außenleiter 2 oder 3) eine Gefahr, weil dann der Kleinverbraucher bis zu 400 V erhalten kann.

Mathematisch lassen sich die Spannungsabfälle an den Widerständen nur mit Komplexrechnung ermitteln (höhere Mathematik - für uns nicht notwendig), es läßt sich jedoch einfach die Gesamtleistung ermitteln:

Beispiel:

Geg:
$R_1 = 10\ \Omega$
$R_2 = 20\ \Omega$
$R_3 = 30\ \Omega$
Ges: P mit und ohne N-Leiter



P mit Neutralleiter:

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1} = \frac{230V^2}{10\ \Omega} = 5290\ W$$

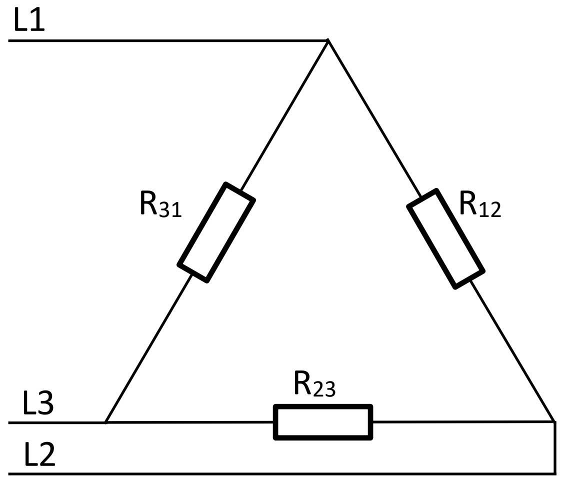
$$P_2 = \frac{U^2}{R_2} = \frac{230V^2}{20\ \Omega} = 2645\ W$$

$$P_3 = \frac{U^2}{R_3} = \frac{230V^2}{30\ \Omega} = 1763{,}33\ W$$

$P_{DS} = P_1 + P_2 + P_3 = 5290\ W + 2645\ W + 1763{,}33\ W$

$P_{DS} = 9698{,}33\ W$

Um nun die Leistung bei gebrochenen N-Leiter zu ermitteln, muss die Sternschaltung- in eine Dreieckschaltung umgerechnet werden:



Formeln: Stern in Dreieck

$$R_{12} = \frac{R_1 \times R_2}{R_3} + R_1 + R_2$$

$$R_{23} = \frac{R_2 \times R_3}{R_1} + R_2 + R_3$$

$$R_{31} = \frac{R_3 \times R_1}{R_2} + R_3 + R_1$$

$$R_{12} = \frac{10\Omega \cdot 20\Omega}{30\Omega} + 10\Omega + 20\Omega = 36{,}67\Omega$$

$$R_{23} = \frac{20\Omega \cdot 30\Omega}{10\Omega} + 20\Omega + 30\Omega = 110\Omega$$

$$R_{31} = \frac{30\Omega \cdot 10\Omega}{20\Omega} + 30\Omega + 10\Omega = 55\Omega$$

$$P_{12} = \frac{U^2}{R_{12}} = \frac{400^2 V}{36{,}67\Omega} = 4363{,}24\ W$$

$$P_{23} = \frac{U^2}{R_{23}} = \frac{400^2 V}{110\Omega} = 1454{,}55\ W$$

$$P_{31} = \frac{U^2}{R_{31}} = \frac{400^2 V}{55\Omega} = 2909{,}1\ W$$

$P_{Rest} = P_{12} + P_{23} + P_{31} = 4363{,}24W + 1454{,}55W + 2909{,}1W$

$P_{Rest} = 8726{,}89\ W$

Formeln: Dreieck in Stern

$$\Sigma R = R_{12} + R_{23} + R_{31}$$

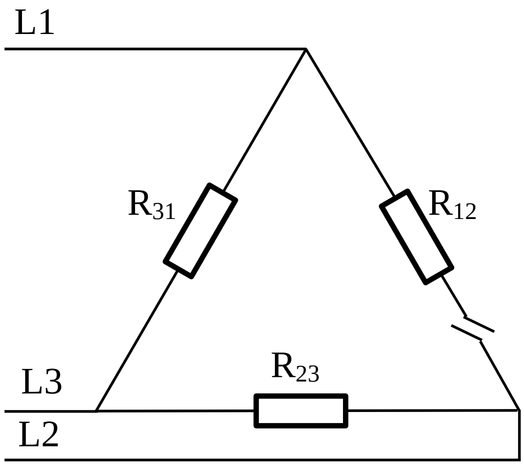
$$R_1 = \frac{R_{12} \times R_{31}}{\Sigma R}$$

$$R_2 = \frac{R_{23} \times R_{12}}{\Sigma R}$$

$$R_3 = \frac{R_{31} \times R_{23}}{\Sigma R}$$

9.3.3. Leiterbruch bei Dreieckschaltung

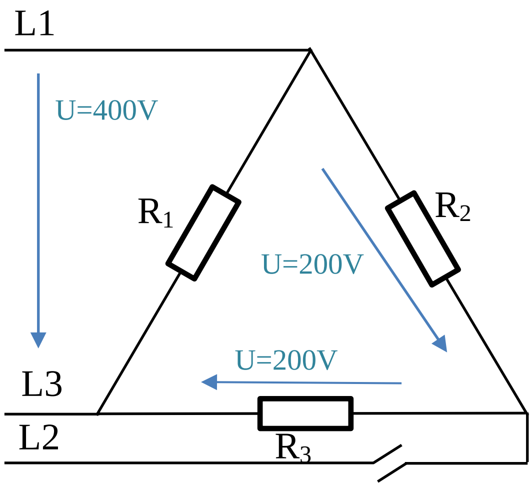
9.3.3.1. Innerer Leiterbruch



Es tritt hier nur der eine Widerstand außer Funktion, die beiden anderen Widerstände bleiben voll spannungsversorgt.

Innerer Leiterbruch bei Dreieckschaltung	$P_{Rest} = \frac{2}{3} \times P_{DS}$

9.3.3.2. Äußerer Leiterbruch



Es bleibt hier ein Widerstand voll an Spannung (400 V), die beiden anderen Widerstände bilden eine Reihenschaltung und es liegen jeweils 200 V an (Gruppenschaltung).

Beispiel:
geg.:
$P_{DS} = 6$ kW

ges.:
P_{Rest} nach Außenleiterbruch

$$P_{Str} = \frac{U^2}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{U^2}{P_{Str}} = \frac{400^2 V}{2000\ W} = 80\ \Omega$$

$$R_{23} = R_2 + R_3 = 80\Omega + 80\Omega = 160\ \Omega$$

$$R_{ges} = \frac{R_1 \cdot R_{23}}{R_1 + R_{23}} = \frac{80\Omega \cdot 160\Omega}{80\Omega + 160\Omega} = 53{,}33\ \Omega$$

$$P_{Rest} = \frac{U^2}{R_{ges}} = \frac{400^2 V}{53{,}33\ \Omega}$$

$\underline{P_{Rest} = 3000\ W}$

Außenleiterbruch bei Dreieckschaltung	$P_{Rest} = \frac{1}{2} \times P_{DS}$

9.4. Vergleich Stern-Dreieckverkettung

Beispiel:

Drei Heizwiderstände je 20 Ω können wahlweise in Y bzw. in Δ angeschlossen werden.

Ges: P bei Stern und bei Dreieck.

$$P_{Stern} = 3 \cdot \frac{U_{Str}^2}{R_{ges}} = 3 \cdot \frac{(\frac{400}{\sqrt{3}})^2 V}{20\ \Omega}$$

$P_{Stern} = 8000$ W

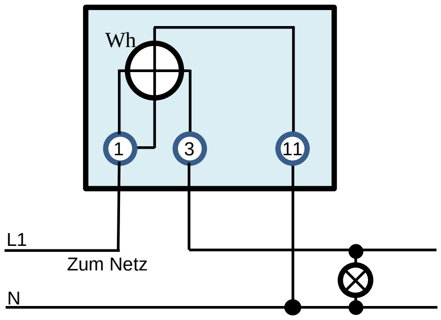
$$P_{Dreieck} = 3 \cdot \frac{U^2}{R_1} = 3 \cdot \frac{400^2 V}{20\ \Omega}$$

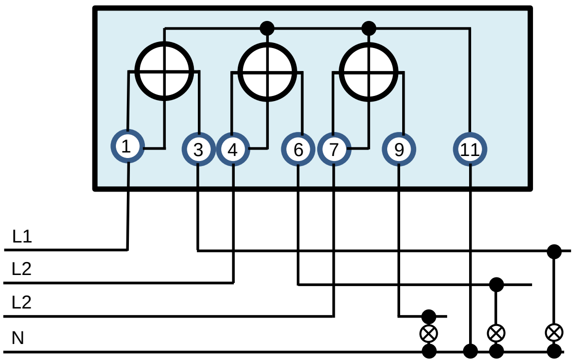
$P_{Dreieck} = 24000$ W

$$P_{Dreieck} = 3 \times P_{Stern}$$

Bei gleicher Netzspannung nimmt ein Verbraucher bei Dreieckschaltung 3 mal soviel Leistung auf als bei Sternschaltung !

9.5. Drehstromarbeit





Die Messung erfolgt mittels eines Energiezählers. Schaltung der Energiezähler werden in 4-stelligen Nummern angegeben (1XXX = Wechselstrom, 3XXX = Dreileiternetz und 4XXX = Vierleiternetz). Sowohl für Wechsel- als auch für die Drehstromleistung gilt:

$$W = P \cdot t$$

Legende:

W .... Arbeit in kWh (Ws)
P............ Leistung in kW (W)
t............. Zeit in h (s)

Zähler zählen immer nur die Wirkleistung (Effektivwerte).

Man kann auch mittels eines Zählers die Leistung messen. Dies kann dann sinnvoll sein, wenn bei Phasenverschiebung das Multiplizieren von Strom und Spannung nur die Scheinleistung ergibt und kein Leistungsmesser zur Verfügung steht.

Vorgangsweise:

Man zählt einige Umdrehungen der Zählerscheibe und misst dazu die Zeit. Weiters benötigt man die Zählerkonstante Z (U/kWh - steht am Zähler).

$$P = \frac{n}{t \cdot C_z}$$

Legende:
P............ Leistung in kW
n............ gezählte Umdrehungen
C_Z.......... Zählerkonstante in $U/_{kWh}$
t............. gemessene Zeit in Stunden h

Beispiel:
Es wurden 10 Umdrehungen in 75 Sekunden gemessen. Die Zählerkonstante ist 150 U/kWh.

n = 10 U
t = 75 s
C_Z = 150 U/kWh

$$t = \frac{75s}{3600} = 0,02083h$$

$$P = \frac{n}{t \times C_z} = \frac{10U}{0,02083h \times 150\, U/_{kWh}}$$

$$\underline{\underline{P = 32,kW}}$$

9.5.1. Elektronische Zähler

https://www.netzooe.at/AMIS-Bedienungsanleitung-03-2019.pdf?ch=1DitW6AD&:hp=3;2;de

Intelligenter Stromzähler: elektronischer Zähler, der zusätzlich zur Verbrauchsmessung weitere Aufgaben erfüllen kann.
Smart Meter: englisch für den intelligenten Stromzähler.
Smart Grid: englisch für das intelligente Netz.

Die digitale Zählertechnologie wird **AMIS** (**A**utomatic **M**etering and **I**nformation **S**ystem = automatisches Mess- und Informationssystem) genannt.
Der Betrieb von AMIS erfolgt im Auftrag der Netz Oberösterreich GmbH durch die Energie AG Oberösterreich Telekom GmbH.


Für den Haushalt gibt es auch den eHZ (elektronischer Haushaltszähler = AMIS mit Opt-Out-Option / die „Intelligenz“ wird hier abgeschaltet).

Zähler werden in drei Betriebsarten eingesetzt:

- Drehstrombezugszähler
- Drehstromlieferzähler (Photovoltaik)
- Zweirichtungszähler

9.5.1.1. Kontrolle der Leistung am elektronischen Zähler:

Am Zähler steht die Impulsrate: 500 Imp/kWh für die LED.

Blinkfrequenz (Hz) = P * Impulsrate / 3600
Blinkperiodendauer (s) = 1 / Blinkfrequenz

Um die Blinkfrequenz bei gegebener Leistung zu kontrollieren geht man folgender Maßen vor:

Beispiel:
Dreileiter-Drehstromsystem
Strom (I) 5,4 A
Spannung (U) 400 V
Leistungsfaktor (cos φ) 0,8
LED-Impulsrate des Zählers 500 Imp/kWh

Berechnung:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

$$P = \sqrt{3} \cdot 400\,V \cdot 5{,}4\,A \cdot 0{,}8 = 2993\,W = 2{,}99\,kW$$

Blinkfrequenz = 2,99 * 500 / 3600 = 0,415 Hz
Blinkperiodendauer = 1 / 0,415 Hz = 2,41 s
Bei richtigem Anschluss muss die Leuchtdiode alle 2,41 s blinken.

9.6. Drehstromkompensation

Wechselstrommotoren beziehen als ohmsch-induktive Verbraucher Blindleistung aus dem Netz. Es fließt daher mehr Strom in der Zuleitung.

Diese induktive Blindleistung kann mit Hilfe von parallel zum Motor geschaltete Kondensatoren kompensiert werden. Die Blindleistung pendelt dann nicht mehr zwischen Generator und Motor sondern zwischen Motor und Kondensator hin und her.

Die Kompensation der Blindleistung hat folgende Vorteile:

- Generatoren, Transformatoren und Übertragungsleitungen werden nicht mehr durch die Blindleistung belastet
- Die Blindströme fließen nicht über die Übertragungsleitungen und verursachen somit dort keine Leistungsverluste.

Daher verlangen die EVU (Energieversorgungsunternehmen) beim Einsatz größerer elektrischer Maschinen vom Stromkunden eine gewisse Blindleistungskompensation.

In der Praxis nimmt man keine vollständige Blindleistungskompensation vor, sondern nur bis zu einem $\cos \varphi = 0{,}9$ bis 0,95. Die Kompensation des verbleibenden Winkels verringert den Netzleitungsstrom praktisch nicht mehr.
Bei Kompensation auf cos =1 würden Resonanzerscheinungen entstehen und würde daher sehr kostenintensiv sein. Bei Sternschaltung der Kondensatoren würden unangenehme Spannungserhöhungen entstehen, daher wird die Sternschaltung kaum verwendet.

Bei Drehstrom wird die Dreieckschaltung der Sternschaltung vorgezogen, weil dadurch für den gleichen Kompensationseffekt eine dreimal kleinere Leistung nötig ist.