Grundlagen für die Elektronik Teil 7: Scheinwiderstand, Scheinleistung und Blindstromkompensation

Aus einigen Zuschriften unserer Leser konnten wir entnehmen, daß sie unseren letzten Beitrag als sehr theoretisch empfunden haben. Wir sind jedoch der Meinung, Ihnen gerade auf dem großen Gebiet der Wechselstromtechnik eine ausreichende Grundlage bieten zu müssen. Es sei hier noch einmal darauf hingewiesen, daß wir bestrebt sind, Ihnen den Stoff möglichst anschaulich näherzubringen.

8.1. Scheinwiderstand, Spannungsdreieck und Widerstandsdreieck

In Teil 6 haben wir ausschließlich idealisierte Blindwiderstände betrachtet. Den Kondensator als reine Kapazität und die Spule als reine Iduktivität.

In der Praxis gibt es diese Bauteile jedoch nicht so unverfälscht. Dort haben sie immer einen Wirkwiderstand-Anteil. Beim Kondensator ist dieser Anteil in dem Leitungswiderstand der Belege und bei der Spule im Leitungswiderstand der Windungen enthalten. Die Wirkung von Spulen und Kondensatoren tritt also nach außen hin nicht so rein in Erscheinung, wie es unter Punkt 7.2.2. und 7.2.3. idealisiert beschrieben wurde. Das äußere Erscheinungsbild des Wechselstromes bei einem Blindwiderstand wird vielmehr ein Gemisch aus Wirk- und Blindanteil sein. Man spricht dann von einem Scheinwiderstand (Formelzeichen „Z"). Der Kehrwert des Scheinwiderstandes wird als Scheinleitwert „Y" bezeichnet.

Scheinwiderstand	Z in Ohm (Ω)
Scheinleitwert	Y in Siemens (S)

$$Y = \frac{1}{Z}[S] \qquad Z = \frac{1}{Y}[\Omega]$$

Schalten wir einen idealen Blindwiderstand und einen Wirkwiderstand in Reihe, so können wir mit dem bereits Gelernten feststellen, daß die Spannung am Wirkwiderstand zu der Spannung am Blindwiderstand eine Phasenverschiebung von 90° hat. Die Zeiger der Wirkspannung und der Blindspannung stehen demnach senkrecht aufeinander. Aus der geometrischen Addition der Zeiger ergibt sich die Gesamtspannung, wie es in Bild 1 dargestellt ist.

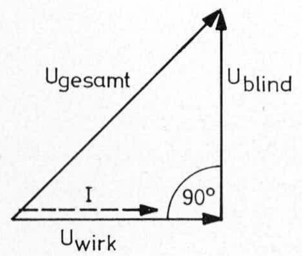

Bild 1: Zeichnerische Bildung der Gesamtspannung aus den Teilspannungen

Der Lehrsatz des Pythagoras wird allen noch geläufig sein, so daß die rechnerische Ermittlung der Gesamtspannung für jeden naheliegend ist.

$$U_{gesamt}^2 = U_{wirk}^2 + U_{blind}^2$$

$$U_{gesamt} = \sqrt{U_{wirk}^2 + U_{blind}^2}$$

Für die Berechnung des Wirkwiderstandes bei einer Reihenschaltung gilt bekanntlich:

$$R = \frac{U_{wirk}}{I}[\Omega]$$

und für den Blindwiderstand:

$$X = \frac{U_{blind}}{I}[\Omega]$$

Wie wir sehen, tritt in beiden Widerstandsgleichungen derselbe Strom I auf. Deshalb sind auch die zu den Teilspannungen gehörigen Widerstände diesen proportional, woraus sich für das Widerstandsdreieck eine Gleichheit mit dem Spannungsdreieck ergibt. Der Zusammenhang zwischen Wirk-, Blind- und Scheinwiderstand ist wie folgt darzustellen:

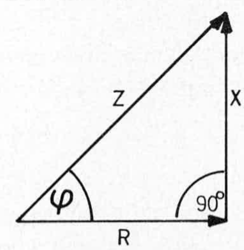

Bild 2: Wirk-, Blind- und Scheinwiderstand als Widerstandsdreieck

Die Berechnung des Scheinwiderstandes geschieht wie bei der Gesamtspannung und zwar:

$$Z^2 = R^2 + X^2 \qquad Z = \sqrt{R^2 + X^2}[\Omega]$$

8.2. Das Stromdreieck

Bei einer Parallelschaltung aus einem Wirkwiderstand und einem Blindwiderstand teilt sich der Gesamtstrom,

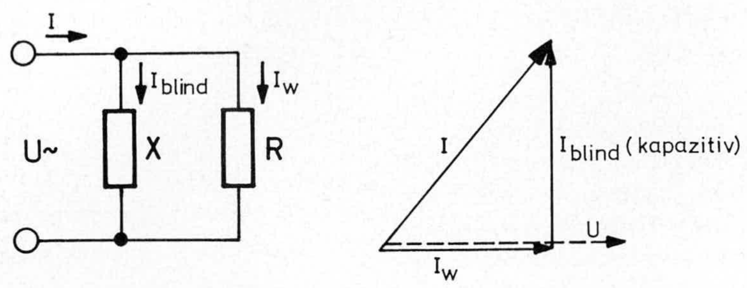

Bild 3: Stromdreieck „U" als Bezugsgröße

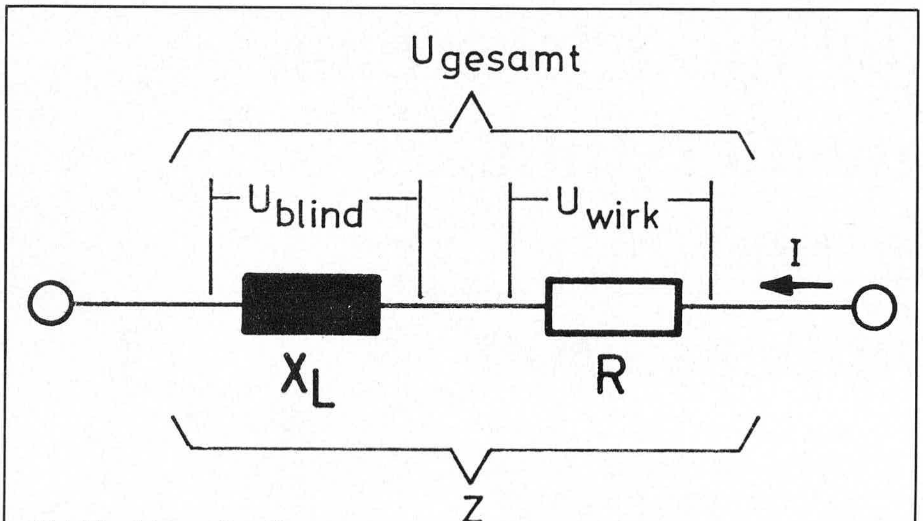

Bild 4: Reihenschaltung aus X_L und R

der bei der Reihenschaltung unter 8.1. Bezugsgröße war, nun in zwei Teilströme auf. Der Zusammenhang zwischen dem Gesamtstrom und den zwei Teilströmen kann durch das Stromdreieck verdeutlicht werden. Phasengleich mit der Bezugsspannung U ist der Teilstrom I_w, der durch den Wirkwiderstand fließt. Der Blindstrom muß mit einer Phasenverschiebung von 90° (+90° = kapazitiv, -90° = induktiv) gezeichnet werden. Der Gesamtstrom ergibt sich aus der geometrischen Addition von I_w und I_{blind}.

Selbstverständlich ist auch hier die Berechnung wie folgt möglich:

$$I^2 = I_w{}^2 + I_{blind}{}^2 \qquad I = \sqrt{I_w{}^2 + I_{blind}{}^2}$$

Mit den nun bekannten Größen für U und I kann auch die Berechnung des Scheinwiderstandes Z erfolgen:

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

Am Ende dieses Abschnittes wollen wir nachstehende, äußerst wichtige, Zusammenhänge festhalten:

1. Die Zeiger der Blindwerte und die der Wirkwerte stehen immer senkrecht aufeinander.

2. Wechselgrößen muß man geometrisch, d. h. unter Berücksichtigung ihrer Phasenlage, addieren.

8.3. Rechenbeispiel

Zu den vorstehenden Punkten wollen wir jetzt ein Beispiel durchrechnen. Es wird vorausgesetzt, daß es sich um einen reinen Blindwiderstand handelt, der mit einem Wirkwiderstand zusammengeschaltet wird. Das bedeutet also, daß wir einen Scheinwiderstand in seine beiden Bestandteile zerlegen.

Vorgegeben sei eine Reihenschaltung aus einer Spule (X_L) und einem Widerstand (R).

U_L = 100 V
U_R = 80 V
f = 50 Hz
I = 0,5 A

gesucht: U_{gesamt} und Z

Würde es sich um Gleichstrom handeln, so könnten wir U_R und U_L einfach addieren und erhielten für U_{gesamt} = 180 Volt.

Gemäß 8.2. müssen wir aber die Phasenverschiebung berücksichtigen, also geometrisch addieren.

Lösung:

$$U_{gesamt}? \quad U = \sqrt{U_L{}^2 + U_w{}^2} = \sqrt{100^2 + 80^2} = \sqrt{16\,400} = \underline{\underline{128{,}06\ \text{Volt}}}$$

$$Z? \quad R = \frac{U_w}{I} = \frac{80}{0{,}5} = \underline{160\ \Omega}$$

$$X_L = \frac{U_L}{I} = \frac{100}{0{,}5} = \underline{200\ \Omega}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L{}^2} = \sqrt{160^2 + 200^2} = \sqrt{65\,600} = \underline{\underline{256{,}12\ \Omega}}$$

Die einfachere Berechnung des Scheinwiderstandes ist:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{128{,}06\ V}{0{,}5\ A} = \underline{256{,}12\ \Omega}$$

8.4. Scheinleistung, Blindleistung und Wirkleistung

Da es sich, wie bereits erwähnt, in der Praxis nie um reine Blindwiderstände, sondern immer um Scheinwiderstände handelt, errechnet man aus dem Produkt U · I auch keine Wirk- oder Blindleistung, sondern Scheinleistung (Formelbuchstabe „S"). Zur Kenntlichmachung erhält die Scheinleistung die Einheit Volt-Ampere „VA".

Auch die uns nun bekannten Schein-, Blind- und Wirkleistungen können als rechtwinkliges Dreieck dargestellt werden. Für z. B. eine Reihenschaltung aus Wirk- und Blindwiderstand (z. B. induktiv) ist das Leistungsdreieck dem Spannungsdreieck ähnlich, da in einer Reihenschaltung nur ein Strom fließt und somit nur die unterschiedlichen Widerstandswerte für die Leistung maßgebend sind.

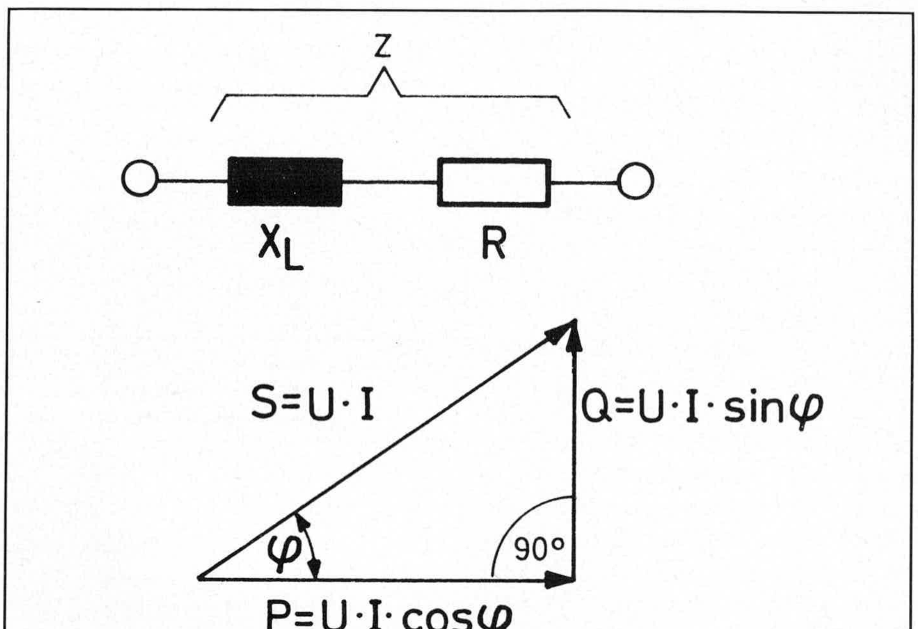

Bild 5: Leistungsdreieck

Scheinleistung S in VA
Blindleistung Q in Var
Wirkleistung P in W

$S^2 = R^2 + Q^2 \qquad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

Mit Hilfe der Winkelfunktionen lassen sich weitere Beziehungen herleiten:

$P = S \cdot \cos\varphi \qquad P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$
$Q = S \cdot \sin\varphi \qquad Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$

Beispiel:

Eine Drosselspule liegt an einer Wechselspannung von 100 Volt. Der gemessene Strom beträgt 0,8 A und das Phasenmeßgerät zeigt einen cos = 0,95 an.

Wie groß sind Wirk-, Blind- und Scheinleistung?

Lösung:

Scheinleistung $S = U \cdot I = 100 \cdot 0{,}8 = \underline{80\ VA}$

Wirkleistung $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = 100 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}95 = \underline{76\ W}$

Die Blindleistung Q wollen wir über das Leistungsdreieck ermitteln, weil uns der Sinuswert nicht bekannt ist.

$S^2 = P^2 + Q^2 \quad Q^2 = S^2 - B^2 \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

$Q = \sqrt{80^2 - 76^2} = \sqrt{642} = \underline{24{,}98\ Var}$

8.4.1. Der Leistungsfaktor

Die Leistung $P = U \cdot I$ bei Gleichstrom an einem Verbraucher unterscheidet sich bei Wechselstrom ($P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$) durch den Faktor $\cos\varphi$.

Diesen Faktor bezeichnet man als Leistungsfaktor. Aus dem Abschnitt 8.4. kennen wir die Beziehung $P = S \cdot \cos\varphi$ womit sich für

$\cos = \frac{P}{S} = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}$ ergibt.

Es handelt sich hierbei also um ein Maß dafür, wieviel von der Gesamtleistungsaufnahme (Scheinleistung) in Wirkleistung umgesetzt wird. Bei einem ohmschen Widerstand beträgt der Leistungsfaktor folglich 1,0.

Welche Auswirkungen ein schlechter Leistungsfaktor haben kann, wollen wir nun einmal näher betrachten:

Angenommen in einer Stadt mit 200 000 Einwohnern sind 10 000 Leuchtstofflampen á 40 Watt in Privathaushalten eingesetzt. Die erforderlichen Vorschaltdrosseln verbrauchen zusätzlich je 8 Watt. Eine komplette Leuchtstofflampe benötigt somit 48 Watt und der Gesamtleistungsfaktor ($\cos\varphi$) beträgt 0,5.

Wirkleistungsaufnahme für 10 000 Lampen:
$10\,000 \cdot 48\ \text{Watt} = \underline{480\,000\ \text{Watt}}$

Gesamtstrom:

$I = \frac{P}{U} = \frac{480\,000}{220} = \underline{2182{,}8\ A}$

Für die aufgenommene Scheinleistung ergibt sich:

$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{480\,000}{0{,}5} = \underline{960\,000\ VA}$

$I = \frac{S}{U} = \frac{960\,000}{220} = \underline{4363{,}6\ A}$

Das Energieversorgungsunternehmen (EVU) muß demnach das Doppelte der eigentlich benötigten Energie zur Verfügung stellen und die Leistungsquerschnitte für eine entsprechend höhere Strombelastung auslegen.

8.5. Blindstromkompensation

Eine Reihenschaltung von Leuchtstofflampe und Vorschaltdrossel nimmt neben der Wirkleistung auch induktive Blindleistung auf. Wie bereits in unserem letzten Heft erwähnt, kann man induktive Blindleistung mit einer Kapazität kompensieren. Diese Möglichkeit beruht auf der Phasenverschiebung von 180° zwischen induktiver und kapazitiver Blindleistung.

Um die unnötige Strombelastung durch Blindströme möglichst gering zu halten, fordern die EVU von Großabnehmern eine Blindstromkompensation. Es gibt weiterhin die Möglichkeit, einen Blindverbrauchszähler einzubauen, so daß der Unternehmer auch die Blindarbeit bezahlen muß.

Anhand des Leistungsdreiecks wollen wir uns den Vorgang beim Kompensieren z. B. einer Leuchtstofflampe einmal veranschaulichen.

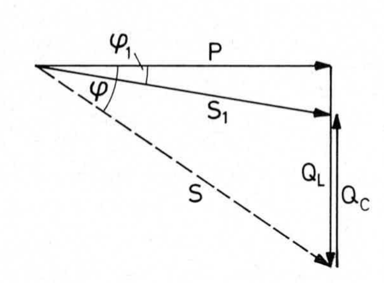

Bild 6: Leistungsdreieck bei Blindstromkompensation (jedoch nicht vollständig)

P = Wirkleistung
Q_L = induktive Blindleistung
Q_C = kapazitive Blindleistung
S = Scheinleistungsaufnahme vor der Kompensation
S_1 = Scheinleistungsaufnahme nach der Kompensation

Beispiel:

Kompensation einer einzelnen Leuchtstofflampe aus 8.4.1.

Lampe	40 Watt	U = 220 Volt
Drossel	8 Watt	f = 50 Hz

Gesamt $\cos\varphi = 0{,}5$

$P = 40 + 8 = 48$ Watt

$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{48}{0{,}5} = 96$ Watt

$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{96^2 - 48^2} = \sqrt{6912} = \underline{83{,}14\ Var}$

$I_{X_{ind}} = \frac{Q}{U} = \frac{83{,}14}{220} = \underline{0{,}378\ A}$

Der induktive Blindstrom beträgt also 0,378 Ampere. Um die Lampe vollständig zu kompensieren ist es erforderlich, einen gleichgroßen kapazitiven Strom fließen zu lassen. (Die Grundlagen für die weitere Berechnung sind bereits in Teil 6 beschrieben worden.)

$X_C = \frac{U}{I_C} = \frac{220}{0{,}378} = \underline{582\ \Omega}$

$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 582}$

$= 5{,}47 \cdot 10^{-6}\ F = \underline{5{,}47\ \mu F}$

Durch das Zuschalten eines Kondensators von 5,47 μF je Lampe wäre somit der gesamte Blindstrom kompensiert.

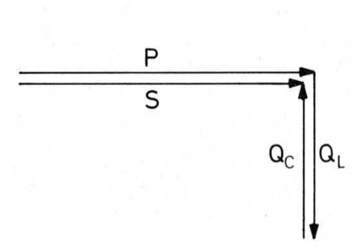

Bild 7: Zeigerdiagramm für eine vollständige Kompensation gemäß Rechenbeispiel

In unserer nächsten Ausgabe werden wir uns unter anderem mit einem weiteren wichtigen Teil der Wechselstromtechnik, nämlich mit den Schwingkreisen beschäftigen.