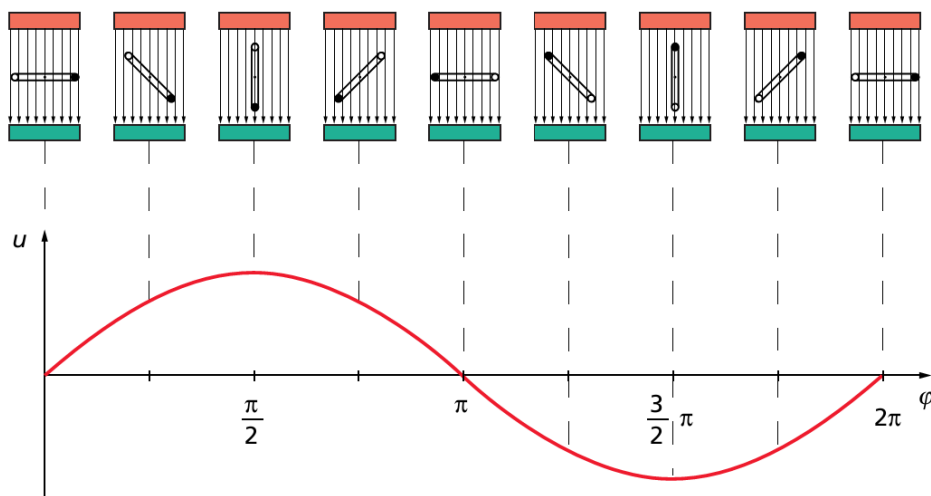
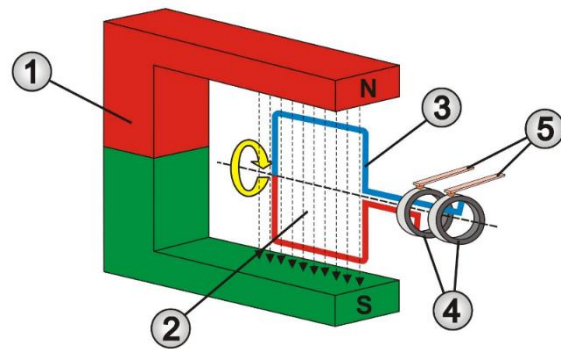


# Elektrische Maschinen

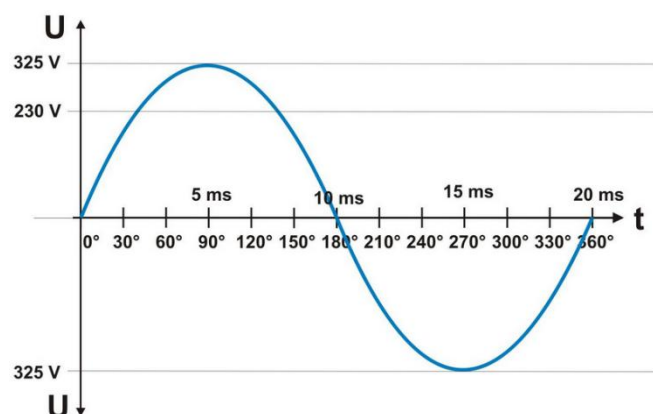
## 1. Generatoren

Bei einer Drehbewegung wird kinetische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Dabei wird das Induktionsgesetz genutzt. Es werden Wechselstrom- und Gleichstromgeneratoren unterschieden. Außerdem können sie als Innenpol- oder Außenpolmaschinen aufgebaut sein. In ihrer prinzipiellen Wirkungsweise stimmen Generatoren unabhängig von ihrem technischen Aufbau überein.

Beim **Außenpolgenerator** dreht sich die Induktionsspule ③ (Rotor) im Magnetfeld ② zwischen den feststehenden Polen eines Dauermagneten ① (Stator). Es wird eine **Wechselspannung** erzeugt, die mit Kontakten ⑤ an Schleifringen ④ abgegriffen werden muss. Nachteile ergeben sich durch Energieverluste und Materialverschleiß an den Schleifkontakten.



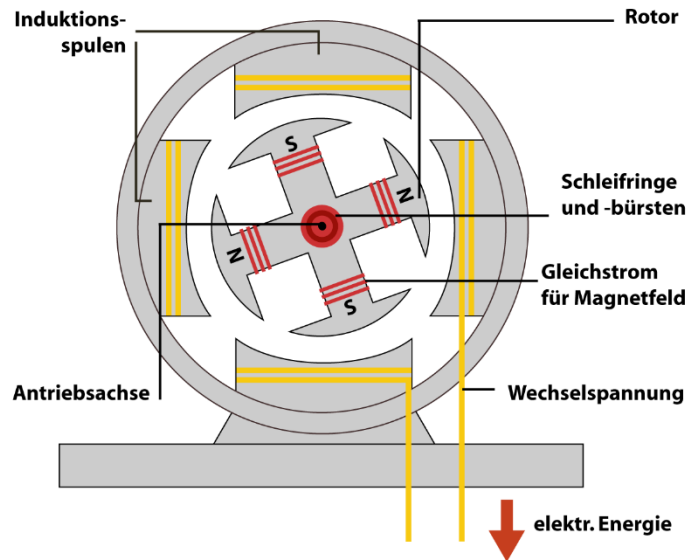
In Europa wurde im Jahr 1987 die Netzspannung auf einheitlich 230 V mit einer Frequenz von 50 Hz festgelegt. Eine Effektivspannung von 230 V bedeutet, dass ein elektrischer Verbraucher bei Gleichspannung eine vergleichbare Leistung besitzt.



Internetquelle: <https://www.netzfrequenzmessung.de/index.htm>

Beim **Innenpolgenerator** rotiert innerhalb von feststehenden Induktionsspulen (Stator) ein durch Dauer- oder Elektromagnete hervorgerufenen Magnetfeld (Rotor). Durch diese Anordnung ist eine höhere Leistung realisierbar.

Der Fahrraddynamo ist als kleine Innenpolmaschine mit Dauermagneten zur Erzeugung des rotierenden Magnetfeldes ausgestattet.



Bei gleichförmiger Rotation eines homogenen Magnetfeldes um eine Spule oder einer Spule in einem homogenen Magnetfeld entsteht eine **sinusförmige Wechselspannung**.

Die induzierte Spannung für eine Leiterschleife der Fläche  $A$  beträgt:

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(A \cdot B)}{\Delta t}$$

Im homogenen Magnetfeld ist die magnetische Flussdichte konstant:

$$U_i = -B \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t}$$

Die wirksame Fläche der Leiterschleife verändert sich mit der Zeit:

$$A_W = A \cdot \cos \varphi = A \cdot \cos \omega t \quad \text{mit } \omega = \frac{\varphi}{t} = \text{konstant}$$

$\omega \dots$  Winkelgeschwindigkeit

$$U_i = -B \cdot A \cdot \frac{\Delta(\cos \omega t)}{\Delta t}$$

Das Differenzieren ergibt die Induktionsspannung in der Leiterschleife:

$$U_i = B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

Für eine Spule mit der Windungszahl  $N$  gilt:

$$U_i = N \cdot B \cdot A \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

A

## 2. Transformatoren

### Physikalische Grundlagen – Betrachtung einer Spule im Wechselstromkreis:

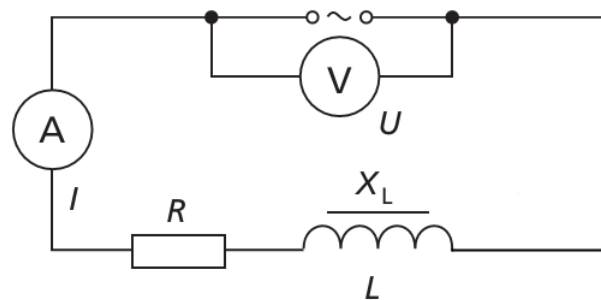
Auf Grund der Selbstinduktion wirkt eine Spule als **induktiver Widerstand**. Die Selbstinduktionsspannung ruft nach dem Lenzschen Gesetz einen Induktionsstrom hervor, der seiner Ursache entgegen gerichtet ist. Es wird kurzzeitig elektrische Energie in Energie des Magnetfeldes umgewandelt und umgekehrt. Im Unterschied zum ohmschen Widerstand bleibt die Energie im Stromkreis insgesamt erhalten. Somit wird der induktive Widerstand auch als **Blindwiderstand  $X_L$**  der Spule bezeichnet.

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad \text{mit } f \dots \text{Frequenz des Wechselstromes}$$

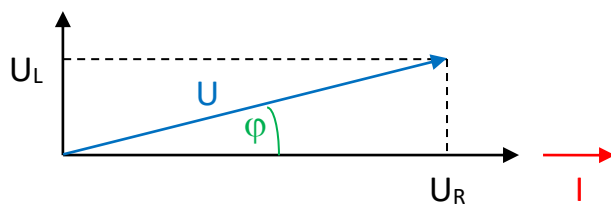
$$X_L = \omega \cdot L \quad \omega \dots \text{Kreisfrequenz}$$

$$L \dots \text{Induktivität der Spule}$$

Eine reale Spule wird als Reihenschaltung von ohmschen und induktiven Widerstand beschrieben. Die Stromstärke besitzt bei allen Bauteilen den gleichen Betrag. In einem Zeigerdiagramm kann die vektorielle Addition



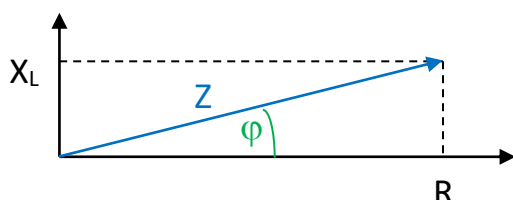
der Teilspannungen unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung dargestellt werden. Somit gilt für die Gesamtspannung  $U$ :



Die Spannung  $U_L$  eilt der Stromstärke  $I$  um  $+\frac{\pi}{2}$  voraus.

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$$

Der Wechselstromwiderstand einer Spule wird auch als **Scheinwiderstand  $Z$**  bezeichnet. Er ist vom (ohmschen) Wirkwiderstand  $R$  zu unterscheiden. Der Scheinwiderstand  $Z$  ergibt sich bei der Reihenschaltung als Gesamtwiderstand aus dem (ohmschen) Wirkwiderstand  $R$  und dem (induktiven) Blindwiderstand  $X_L$ .



$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}$$

**Begriffe:** Scheinwiderstand  $Z$  (Gesamtwiderstand) → Impedanz  
 Blindwiderstand  $X_L$  (induktiver Widerstand) → Reaktanz  
 Wirkwiderstand  $R$  (ohmscher Widerstand) → Resistanz

Die **Phasenverschiebung**  $\varphi$  ergibt sich aus dem Zeigerdiagramm der Widerstände.

$$\tan \varphi = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega \cdot L}{R}$$

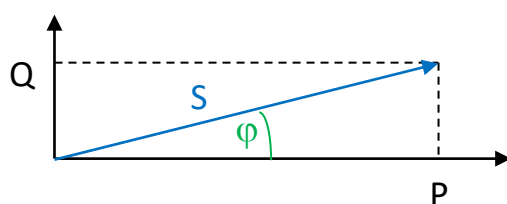
Bei der **Leistung im Wechselstromkreis** ist analog zu den Widerständen zwischen Wirk-, Blind- und Scheinleistung zu unterscheiden.

Die **Wirkleistung**  $P$  ist die im Wechselstromkreis am (ohmschen) Wirkwiderstand  $R$  der Spule nach außen abgegebene Leistung.

Die **Blindleistung**  $Q$  ist die im (induktiven) Blindwiderstand  $X_L$  der Spule kurzzeitig zum Aufbau des magnetischen Feldes erforderliche Leistung, die beim Abbau des Feldes wieder an den Stromkreis abgegeben wird. Der zeitliche Mittelwert ist null.

Die **Scheinleistung**  $S$  ergibt sich als geometrische Summe aus Wirk- und Blindleistung.

Die Leistungen können analog den Widerständen unter Berücksichtigung der Phasenverschiebung in einem Zeigerdiagramm dargestellt werden.



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

$$S = U \cdot I$$

$$S = 1 \text{ VA}$$

Wirkleistung  $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

$$P = 1 \text{ W}$$

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

$$Q = 1 \text{ var (reactif)}$$

Im Wechselstromkreis werden zur Berechnung die effektiven (wirksamen) Werte für Spannung und Stromstärke verwendet.

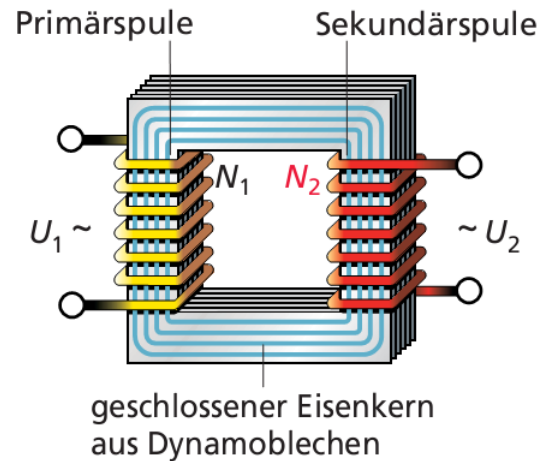
Effektivspannung  $U_{eff} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \hat{U}$  mit  $\hat{U}$  ... Scheitelspannung

Effektivstromstärke  $I_{eff} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot \hat{I}$  mit  $\hat{I}$  ... Scheitelstromstärke

## Transformatoren

Transformatoren (Umformer) verändern die Werte von Wechselspannung bzw. Wechselstromstärke.

Es werden folgende Arten unterschieden:



unbelasteter Transformator	belasteter Transformator
Im Sekundärstromkreis fließt kein Strom: $I_2 = 0$ .	Im Sekundärstromkreis fließt ein Strom: $I_2 > 0$ .
idealer Transformator	realer Transformator
Die dem Primärkreis zugeführte Energie ist gleich der im Sekundärkreis nutzbaren Energie. Es treten keine energetischen Verluste auf.	Die dem Primärkreis zugeführte Energie ist größer als die im Sekundärkreis nutzbaren Energie. Ein Teil der durch den Transformator übertragenen Energie wird in Wärme umgewandelt.

### Energetische Verluste des realen Transformators:

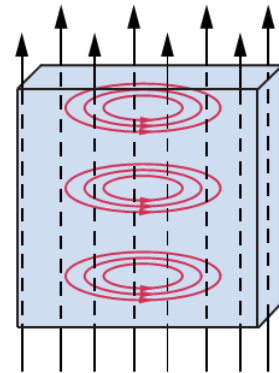
Die **Kupferverluste** werden hauptsächlich durch den ohmschen Widerstand der Spulen hervorgerufen. Die **Eisenverluste** ergeben sich als Summe aus Hysterese- und Wirbelstromverlusten im Kern.

### Experiment:

Es wird die Frequenz von Schallwellen gemessen, die von einem Trafokern abgestrahlt werden.

**Hystereseverluste** entstehen durch die ständige Umpolung der Elementarmagnete in ferromagnetischen Werkstoffen, die sich in einem wechselnden Magnetfeld befinden. Das Kernmaterial ändert bei jeder Magnetisierung seine Länge. Das gilt für die positive und negative Halbwelle des sinusförmigen Wechselstroms. Somit schwingt der Trafokern mechanisch mit einer Frequenz von 100 Hz.

Ändert sich das Magnetfeld, das von einem massiven Metallkörper umfasst wird, so treten durch Induktion innerhalb des Körpers Ringströme auf, die zu **Wirbelstromverlusten** im Trafokern führen. Diese werden durch Aufteilung in dünne Dynamobleche verringert. Eine isolierende Beschichtung der Bleche verhindert, dass sich Wirbelströme über mehrere Bleche räumlich ausbreiten können.



### Betrachtung eines unbelasteten idealen Transformators (Leerlauf):

In der Primärspule wird eine **Primärspannung** induziert, die nach dem Lenzschen Gesetz als induktiver Widerstand der Spannung der Spannungsquelle entgegenwirkt.

$$U_1 = -N_1 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{mit } \Delta\Phi \dots \text{Änderung des magnetischen Flusses}$$

Die Sekundärspule wird vom gleichen sich ändernden Magnetfeld durchsetzt. Somit wird nach dem Induktionsgesetz dort eine **Sekundärspannung** induziert.

$$U_2 = -N_2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Es ergibt sich folgende Lösung des Gleichungssystems.

$$U_2 = -N_2 \cdot \left( -\frac{U_1}{N_1} \right)$$

$$\boxed{\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}}$$

mit  $U_1, U_2 \dots$  Primär- bzw. Sekundärspannung

$N_1, N_2 \dots$  Windungszahlen

### Betrachtung eines belasteten idealen Transformators:

Es fließt ein Sekundärstrom. Im Idealfall ist die vom Sekundärkreis abgegebene Wirkleistung genauso groß wie die vom Primärkreis aufgenommene Wirkleistung.

$$P_1 = P_2$$

$$U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

Bei starker Belastung (Kurzschluss) ist die Phasenverschiebung gleich.

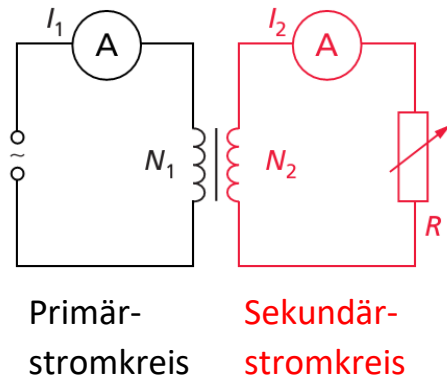
$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad \text{oder} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}} \quad \text{mit } I_1, I_2 \dots \text{Primär- bzw. Sekundärstrom}$$

$$N_1, N_2 \dots \text{Windungszahlen}$$

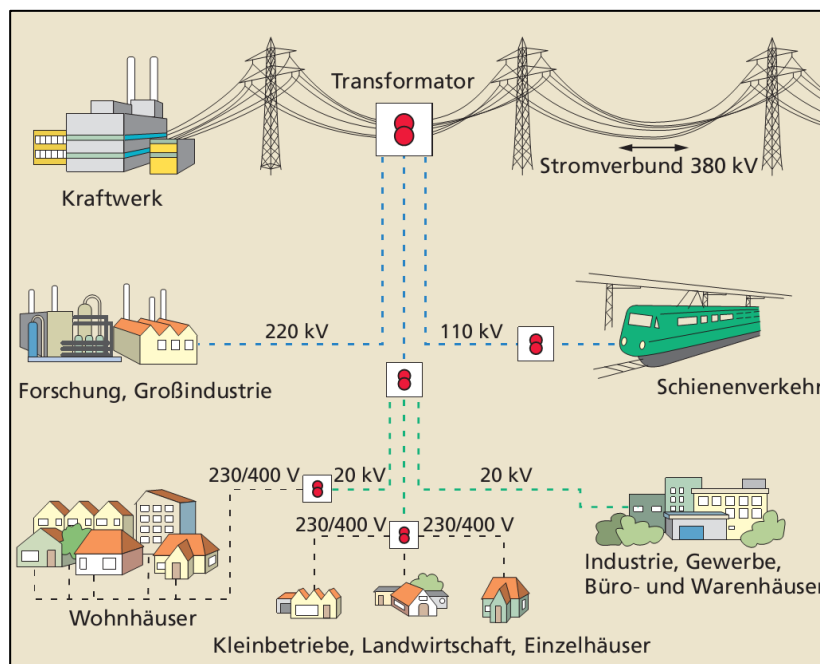
Die **Rückwirkung** beschreibt die Beeinflussung des Primärstromkreises durch den Sekundärstromkreis.

Eine Vergrößerung der Belastung (Verkleinerung des Sekundärwiderstandes) und damit eine Erhöhung der Sekundärstromstärke  $I_2$  führt zu einer Zunahme der Primärstromstärke  $I_1$ .



Ursache ist nach dem lenzschen Gesetz eine Verringerung des Gesamtflusses im Eisenkern des Transformators. Somit nimmt die der Spannungsquelle entgegenwirkende Induktionsspannung in der Primärspule ab. Die Energieaufnahme auf der Primärseite des Transformators passt sich der Belastung auf der Sekundärseite an.

Besondere Bedeutung besitzen Transformatoren in der Energietechnik für den Betrieb von **Stromverbundnetzen**.



**A**

Durch das Transformieren in Hochspannung kann die elektrische Energie effektiv und mit wenig Verlust vom Kraftwerk zu den Verbrauchern übertragen werden.