

Induktionsgesetz:

$$U_{\text{ind}} = - \frac{d\Phi}{dt} = - A \frac{dB}{dt}$$

Gilt hier für konstante Fläche A und veränderliches Magnetfeld B

7.1.6 Der Transformator

Der Transformator ist ein wichtiges Bauteil der Wechselstromtechnik. Seine Verwendung reicht vom Umspanner in der Starkstromtechnik über den Netztransformator in elektrischen Geräten bis hin zum Übertrager in elektrischen Schaltungen, wo er nur noch Zentimetergröße besitzt. Transformatoren haben zwei Spulen, die auf einen geschlossenen Eisenkern aufgebracht sind. An eine Spule – die Primärspule – wird eine Wechselspannung angelegt, die an der anderen Spule – der Sekundärspule – als transformierte Spannung abgegriffen werden kann. Der Transformator ist einfach zu verstehen, solange er sich im *Leerlauf* befindet, d. h. solange in der Sekundärspule kein Strom fließt und damit keine Leistung entnommen wird. *Belastet* man den Transformator, indem man z. B. sekundärseitig eine Lampe anschließt, sind die Zusammenhänge komplex. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Übertragungseigenschaften eines belasteten Transformators nicht auf einfache Weise berechnen lassen, weil die Induktivitäten der Spulen eine komplizierte Abhängigkeit von den Stromstärken besitzen (\rightarrow 7.1.3).

Versuch 1 – Transformator im Leerlauf: Mit verschiedenen Experimentierspulen wird ein Transformator aufgebaut und die angelegte Primärspannung U_1 sowie die sekundärseitige Spannung U_2 gemessen. Es zeigt sich, dass das Spannungsverhältnis $U_2 : U_1$ nahezu gleich dem Verhältnis der Windungszahlen $n_2 : n_1$ ist.

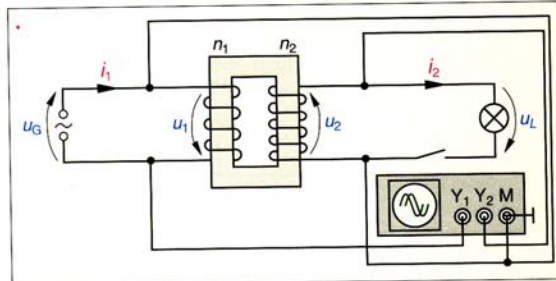
Transformatorgesetz: Im Leerlauf ist das Verhältnis von Sekundär- und Primärspannung gleich dem Verhältnis der Windungszahlen von Sekundär- und Primärspule:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

$n_2 : n_1$ heißt **Übersetzungsverhältnis**.

Das Transformatorgesetz folgt aus dem Induktionsgesetz (\rightarrow 6.3.1): Ein in der Primärspule fließender Wechselstrom ruft im Eisenkern einen zeitlich veränderlichen magnetischen Fluss $\Phi(t)$ hervor, der beide Spulen in gleicher Weise durchsetzt. In jeder Windung – sowohl bei der Primär- wie der Sekundärspule – wird nach dem Induktionsgesetz die Wechselspannung $u = -d\Phi/dt$ induziert. Für die Primärspannung folgt damit $u_1 = n_1 u$ und für die Sekundärspannung $u_2 = n_2 u$. Daraus ergibt sich das Transformatorgesetz:

$$u = - \frac{d\Phi}{dt} = \frac{u_1}{n_1} = \frac{u_2}{n_2} \quad \text{oder} \quad \frac{u_2}{u_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$$



270.1 Beim Transformator sind die Richtungen von Strömen und Spannungen so festgelegt, dass im primärseitigen Kreis $u_1 > 0$ ist (der Trafo nimmt Energie auf) und im sekundärseitigen Kreis $u_2 < 0$ ist (der Trafo gibt Energie ab). Beide Spulen haben gleichen Wicklungssinn. Mit dem Oszilloskop kann die Phasendifferenz zwischen Primär- und Sekundärspannung gemessen werden.

Tatsächlich ist die Magnetisierung im Eisenkern nicht völlig gleich, sondern bei der felderregenden Primärspule etwas größer als bei der Sekundärspule. Daher wird diese von einem etwas geringeren Fluss als die Primärspule durchsetzt, womit sich erklärt, dass das Spannungsverhältnis $U_2 : U_1$ stets etwas kleiner als das Verhältnis der Windungszahlen $n_2 : n_1$ ist.

Versuch 2 – Der belastete Transformator: Ein Transformator soll nacheinander mit zwei Lampen belastet werden, die beide eine Betriebsspannung von $U = 7 \text{ V}$ haben; die erste hat im Normalbetrieb nur eine Stromstärke von $I = 30 \text{ mA}$, die zweite von $I = 300 \text{ mA}$. Die Primärspule soll die Windungszahl $n_1 = 250$, die Sekundärspule $n_2 = 500$ haben. Die Eingangsspannung wird also mit dem Übersetzungsverhältnis $n_2 : n_1 = 2 : 1$ „hochgespannt“. Im Leerlauf muss an den Eingang des Transformators die Spannung $U_1 = 3,8 \text{ V}$ gelegt werden, um am Ausgang die Spannung $U_2 = 7 \text{ V}$ zu erhalten. Schließt man die $7 \text{ V} | 30 \text{ mA}$ -Lampe an, so leuchtet sie (fast) normal hell, während die $7 \text{ V} | 300 \text{ mA}$ -Lampe nur schwach leuchtet.

Um das Verhalten des Transformators zu verstehen, werden nach Abb. 270.1 die primär- und sekundärseitigen Spannungen und Ströme gemessen. Mit einem Zweistrahloszilloskop wird die Phasendifferenz zwischen der Primärspannung u_1 und der Sekundärspannung u_2 gemessen (Tab. 271.1).

Die Messergebnisse sind maßstabgerecht in den Phasendiagrammen in Abb. 271.2 für Primär- und Sekundärseite dargestellt. Im Leerlauf (Abb. 271.2a) sind die Spannungen u_1 und u_2 in Phase, die Spannung u_1 hat zum Strom i_1 die bekannte Phasendifferenz $\varphi_1 = 90^\circ$. Da der Sekundärstrom null ist, wirkt der Transformator primärseitig nur wie eine Spule. Dieser einfache Sachverhalt ändert sich nun wesentlich, wenn bei Belastung im Sekundärkreis ein Strom i_2 fließt. Da die Sekundärspule die Leistung $P_2 = U_2 I_2$ abgibt, muss die primärseitige Phasendifferenz φ_1 zwischen Strom und Spannung nun kleiner als 90° sein. Da die sekundärseitig abgegebene Leistung eine reine Wirkleistung ist, sind u_2 und i_2 antiparallel. Aus der Gleichheit der primär- und sekundärseitigen Wirkleistungen (\rightarrow 7.1.4) folgt:

Last	U_1 in V	I_1 in mA	U_2 in V	I_2 in mA	Phasendifferenz (u_1, u_2)	Phasendifferenz φ_1
Leerlauf	3,80	61	7,0	0	0°	90°
7V 30mA-Lampe	3,80	104	6,8	28	10°	61°
7V 300mA-Lampe	3,80	384	2,4	168	62°	74°

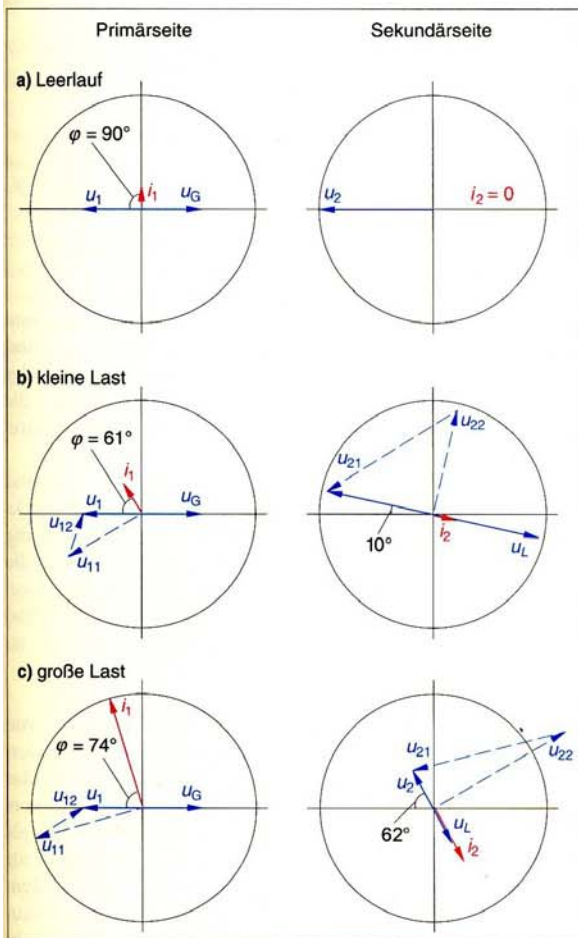
271.1 Messtabelle zum belasteten Transformator

$$U_2 I_2 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad \text{und daraus} \quad \varphi_1 = \arccos \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1}$$

Die so berechneten Phasendifferenzen φ_1 sind ebenfalls in Tab. 271.1 aufgeführt.

Ein wesentlicher Unterschied zum Leerlauf besteht darin, dass nun auch der sekundärseitige Strom i_2 eine Flussänderung im Kern hervorruft und Spannungen induziert. Man muss zwischen vier Spannungen unterscheiden: Der Strom i_1 induziert primärseitig die Spannung u_{11} und sekundärseitig die Spannung u_{21} ; der Strom i_2 induziert primärseitig die Spannung u_{12} und sekundärseitig die Spannung u_{22} . Alle vier Spannungen eilen den sie erzeugenden Strömen um 90° voraus (Abb. 271.2b). Die Spannungen u_1 und u_2 ergeben

sich aus den Zeigeradditionen der primär- bzw. sekundärseitig induzierten Spannungen. Diese Zeigeradditionen sind in den Abbildungen 271.2b) und 2c) ausgeführt. Man erkennt, dass sich die Zeiger u_{21} und u_{22} auf der Sekundärseite mit zunehmender Belastung der antiparallelen Stellung nähern. Die Folge ist, dass die Sekundärspannung $u_2 = u_{21} + u_{22}$ trotz konstanter Primärspannung u_1 zunehmend kleiner wird. Daher wird die 7 V|300 mA-Lampe nur mit einer Spannung betrieben, die kleiner als ihre Betriebsspannung ist. Im Grenzfall des sekundärseitigen Kurzschlusses sind u_{21} und u_{22} antiparallel und dem Betrage nach gleich; u_2 ist dann null. Die Ströme i_1 und i_2 sind jetzt entgegengerichtet: $\varphi(i_1, i_2) \cong 180^\circ$. Bei schwacher Belastung mit dem Leerlauf als Grenzfall geht dagegen die Phasendifferenz gegen 90°: (im Leerlauf) $90^\circ \cong \varphi(i_1, i_2) \cong 180^\circ$ (im Kurzschluss).



271.2 Primär- und sekundärseitige Phasendiagramme des Transformators a) im Leerlauf, b) mit kleiner und c) mit großer Last

Aus der Gleichheit von u_{21} und u_{22} im Kurzschluss lässt sich ähnlich wie im Leerlauf eine einfache Formel für den Transformator herleiten. Da die induzierten Spannungen u_{21} und u_{22} proportional zu den sie erzeugenden Strömen i_1 und i_2 sind und außerdem proportional zu den Windungszahlen n_1 und n_2 der felderzeugenden Spulen, folgt aus $u_{21} = u_{22}$:

$$\frac{u_{21}}{u_{22}} = \frac{n_1 i_1}{n_2 i_2} = 1 \quad \text{oder} \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{i_1}{i_2} = \frac{I_1}{I_2}$$

Wird ein Transformator im Kurzschluss betrieben, ist das Verhältnis der primär- und sekundärseitigen Ströme umgekehrt wie das der zugehörigen Windungszahlen.