

## Der Transformator

Fließt elektrischer Strom durch eine Spule, so erzeugt sie ein Magnetfeld. Mit einem sinusförmigen Erregerstrom ändert sich proportional der magnetische Fluss  $\Phi$ . Durchsetzt dieses Erregerfeld eine zweite Spule, die Induktionsspule, kann an ihren Anschlüssen eine Induktionsspannung gemessen werden. Dazu ist keine elektrisch leitende Verbindung zwischen der primären Erreger- oder Feldspule und der sekundären Induktionsspule notwendig. Die klassische Anordnung mit der galvanischen Trennung zwischen der Primär- und Sekundärspule, die auf einem gemeinsamen Eisenkern nur über das Magnetfeld verkoppelt sind, wird Transformator genannt.

Die Primärspule wandelt die zugeführte elektrische Energie in magnetische Energie um. Der geschlossene ferromagnetische Eisenkern konzentriert die Magnetfeldlinien. Das Magnetfeld durchsetzt die Sekundärspule und erzeugt in ihr durch Induktion wieder elektrische Energie. Besteht zwischen beiden Spulen eine feste magnetische Kopplung, dann ist der Wirkungsgrad der Energieübertragung besonders hoch. Um im Kern die Wirbelstromverluste zu minimieren, ist der Eisenkern lamelliert und besteht aus gegeneinander isolierten, gepackten Blechen oder aus Ferritwerkstoff.

Beim Trafo erfolgt die Energieübertragung durch elektromagnetische Induktion.  
Der Magnetkern sollte magnetisch gut aber elektrisch schlecht leitend sein.  
Eine dauerhafte Energieübertragung findet nur durch Wechselfelder statt.  
Ein Trafo kann Gleichspannung oder Gleichstrom nicht übertragen.

Transformatoren werden in der Energietechnik zur Spannungs- und Stromwandlung eingesetzt. Sie trennen Stromkreise galvanisch voneinander, wobei die Energieübertragung fast vollständig erhalten bleibt. In der Nachrichtentechnik werden sie meistens als Übertrager bezeichnet. Sie werden zur Anpassung unterschiedlicher Ein- und Ausgangsimpedanzen der Schaltkreise verwendet. Mit mechanisch oder elektrisch veränderbarem Kopplungsfaktor sind sie Bestandteil spezieller Bandfilterschaltungen.

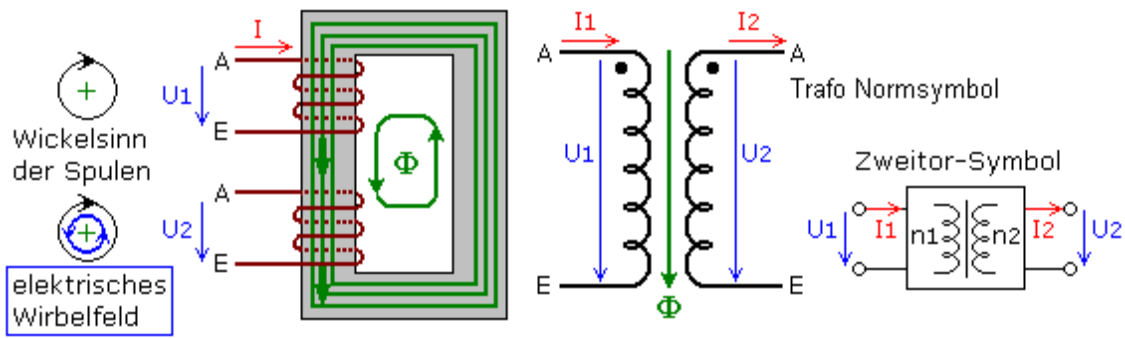
### Der ideale Transformator

Die grundlegenden Eigenschaften sollen am idealen Trafo erläutert werden. Er arbeitet verlustlos. Der Wirkwiderstand der Drahtwicklungen wird ebenso wie der magnetische Widerstand des Kernmaterials vernachlässigt. Der magnetische Fluss bleibt vollständig im Kernmaterial und streut nicht. Der magnetische Kopplungsfaktor hat den Wert 1 bei 100%-tiger Energieübertragung. Ein Magnetisierungs- oder Leerlaufstrom wird nicht berücksichtigt. Die Spulen verhalten sich rein induktiv. Es gibt keine Drahtwiderstände und keine Wicklungskapazitäten. Das geblechte Kernpaket ist frei von Kopplungskapazitäten.

Zwei gleichsinnig gewickelte Spulen befinden sich auf einem Schenkel eines ferromagnetischen geschlossenen UI-Kerns. An die Primär- oder Feldspule wird eine sinusförmige Erregerspannung angelegt. Während der positiven Halbwelle soll der Strom in technischer Richtung von A nach E durch die Spule fließen. Mit der Rechten-Faust-Regel bestimmt, liegt ihr magnetischer Nordpol unten und die Magnetfeldlinien im Kern zeigen in diese Richtung. Der Regel nach umfasst die rechte Hand die Spule, sodass die Fingerspitzen in die technische Stromrichtung zeigen. Der abgespreizte Daumen weist zum magnetischen Nordpol.

Die Sekundär- oder Induktionsspule wird von diesem sich zeitlich ändernden Magnetfeld in gleicher Richtung durchflossen. An den Spulenden entsteht eine Induktionsspannung. Bestimmt man mit dem Oszilloskop die Phasenlage der Sekundärspannung in Bezug zur Primärspannung, so besteht Phasengleichheit. Die Pfeilrichtung der Induktionsspannung zeigt also ebenfalls von A nach E in Richtung der primär angelegten Erregerspannung. Das widerspricht scheinbar dem Induktionsgesetz, wo nach der Lenzschen Regel ein Minuszeichen zu erwarten

ist.

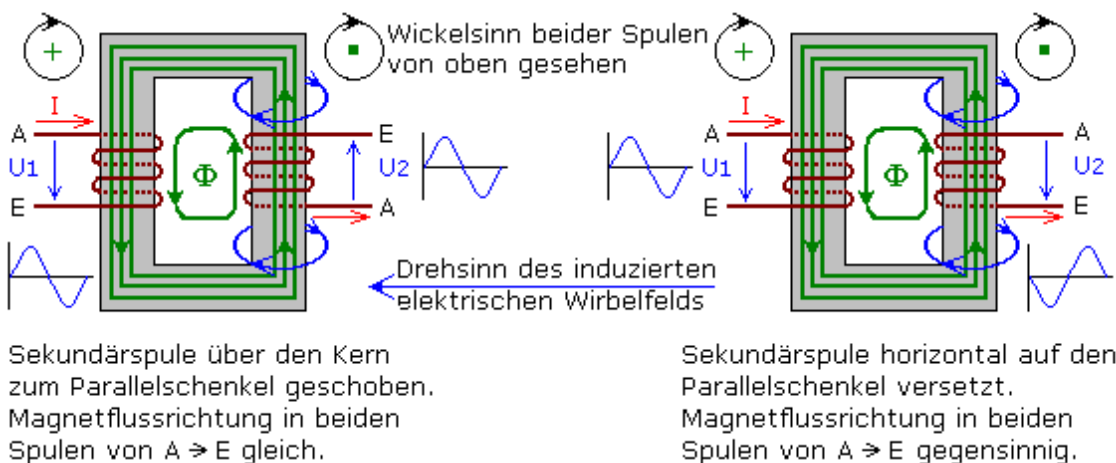


Die Beobachtung steht in Übereinstimmung mit den Darstellungen auf der Induktionsseite. Im Bild oben ist der Wickelsinn der Induktionsspule im Uhrzeigersinn. Die Feldlinien verlaufen in positiver Richtung von oben kommend und generieren in einer geschlossenen Leiterschleife ein nach links drehendes elektrisches Feld. Für die Spule als linksseitig geöffnete Leiterschleife bedeutet das, hinten bei A ist positives und vorne bei E negatives Potenzial. Wird sekundär der Stromkreis geschlossen, so fließt in technischer Richtung Strom bei E in die Induktionsspule hinein und generiert ein Magnetfeld, das dem primären Erregerfeld entgegen gerichtet ist. Die Lenzsche Regel ist somit erfüllt.

Das genormte Schaltsymbol eines Transformators mit zwei magnetisch gekoppelten Spulen geht von zwei übereinander angeordneten Spulen gleichen Wickelsinns aus. Sie befinden sich auf demselben Kernsegment und werden vom magnetischen Fluss in gleicher Richtung durchflutet. Die Spulen werden horizontal in eine Ebene versetzt und die magnetische Flussrichtung steht als senkrechter Pfeil dazwischen. In dieser genormten Darstellung verlaufen alle Bezugspfeile in die gleiche Richtung. Die Pole gleicher Phasenlage werden zur eindeutigen Kennzeichnung mit einem Punkt markiert.

Der Transformator in der symbolischen Darstellung als Zweitor wirkt energietechnisch mit der Primärwicklung als Verbraucher. Der Strompfeil weist am Eingangstor oben hinein. Die Sekundärwicklung wirkt als Generator. Die Stromrichtungspfeil am Ausgangstor oben zeigt nach außen.

Denkt man sich die Sekundärspule über den Kern zum Parallelschenkel verschoben, dann liegen sich A und E der Spulen wie im linken Bildteil diagonal gegenüber. Bestimmt man mit dem Oszilloskop die Phasenlagen in der Messrichtung A nach E, dann besteht Phasengleichheit. Die genormte Darstellung des Trafos geht von versetzten Spulen wie im rechten Bild aus und die Anschlüsse A und E beider Spulen liegen sich direkt gegenüber. In der Messrichtung A nach E wird eine inverse Phasenlage festgestellt. Da sich gleiche Spulenanschlüsse jetzt direkt gegenüber liegen, ist der Magnetfluss in beiden Spulen auf den gleichen Anschluss bezogen gegenläufig.



Die folgende Animation stellt das Funktionsprinzip des idealen Trafos als kontinuierlichen Film oder interaktiv

für aufeinander folgende 90°-Periodenabschnitte erklärt dar.

Stellt der Browser im MS-Windows-Betriebssystem den Flashfilm nicht dar, kann er im Download als trafo.zip gespeichert werden. Nach dem Entpacken steht der Lehrfilm als eigenständig lauffähige, gleichnamige EXE-Datei zur Verfügung.

### Transformatorenhauptgleichung

Auf der Sekundärseite verhält sich die Leerlaufspannung  $U_2$  proportional zur Windungszahl  $N_2$ . Für sinusförmige Spannungen ist ihr Spitzenwert direkt proportional zum Maximalwert des magnetischen Flusses  $\Phi$  und kann durch die magnetische Flussdichte  $B$  und durch die Kernquerschnittsfläche  $A$  ausgedrückt werden. Der Scheitelwert ist weiterhin abhängig von der Kreisfrequenz des Erregerstromes. Durch die Verknüpfung aller Beziehungen erhält man bei sinusförmiger Erregung die Transformatorenhauptgleichung. Das Minuszeichen berücksichtigt die Lenzsche Regel, wird aber allgemein weggelassen.

$$U_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{mit} \quad \Phi = B \cdot A \quad \text{folgt}$$

$$U_2 = -N_2 A \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

$$\text{für die Spitzenwerte gilt} \quad \hat{U} = -\omega A N_2 \hat{B}$$

angewendet auf (1) folgt die Transformatorenhauptgleichung

$$U_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi f A N_2 \hat{B}$$

$$U_2 = -4,443 \cdot f A N_2 \hat{B}$$

Beim idealen Trafo gilt die Transformatorenhauptgleichung uneingeschränkt für beide Spulenwicklungen. Die Leerlaufspannung ist direkt proportional zur Windungszahl. Der magnetische Fluss ist in beiden Wicklungen gleich groß. Das Übersetzungsverhältnis leitet sich wie folgt her.

$$U_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad U_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Übersetzungsverhältnis der Spannungen} \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \hat{U}$$

Beim idealen Trafo ist das Verhältnis der Leerlaufspannungen gleich dem Verhältnis der Windungszahlen der Spulen, an denen die Spannungen gemessen werden.

Der Transformator überträgt elektrische Leistung. Beim Belasten der Sekundärseite fließt dort Strom, der zu einem entsprechenden Primärstrom führt. Der ideale Trafo arbeitet ohne Leistungsverluste, somit wird die sekundär entnommene Leistung von einer gleichgroßen primär aufgenommenen Leistung ausgeglichen. Mit diesem Ansatz kann auch eine Stromübersetzung hergeleitet werden.

$$P_1 = U_1 I_1 \quad \text{und} \quad P_2 = U_2 I_2 \quad \text{mit} \quad P_1 = P_2 \quad \text{folgt} \quad U_1 I_1 = U_2 I_2$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \hat{U} = \frac{I_2}{I_1} \quad \hat{U} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad \text{Übersetzungsverhältnis der Ströme}$$

Beim idealen Trafo verhalten sich die Ströme umgekehrt zu den Windungszahlen der Wicklungen.

Werden beide Übersetzungsgleichungen miteinander multipliziert, folgt nach Umformung das

Übersetzungsverhältnis für die Wechselstromwiderstände oder Impedanzen durch den idealen Transformator.

$$\frac{U_1}{U_2} \frac{I_2}{I_1} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = \dot{U}^2 \quad \text{mit} \quad Z_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad \text{und} \quad \frac{1}{Z_2} = \frac{I_2}{U_2} \quad \text{folgt}$$

$$\dot{U}^2 = \frac{Z_1}{Z_2} \quad \dot{U} = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \quad \text{Übersetzungsverhältnis der Impedanzen}$$

Der ideale Trafo überträgt Impedanzen mit dem Quadrat seiner Windungsverhältnisse.

### Der Transformator bei Belastung

Bei Belastung der Sekundärspannung fließt Strom durch den Lastkreis und die Sekundärspule. Sie generiert jetzt selbst einen Magnetfluss im Trafokern, der dem primärseitigen Magnetfluss  $\Phi$  entgegengerichtet ist und ihn schwächt. Die Primärspule reagiert auf den kleineren Magnetfluss mit einer Verringerung ihrer Selbstinduktionsspannung. Von der Spannungsquelle fließt soviel Strom durch die Primärspule, bis der anfängliche Magnetfluss im Kern wieder hergestellt ist. Das System hält nach Möglichkeit immer den elektromagnetischen Gleichgewichtszustand aufrecht.