3.4 Transformatoren

3.4.1 Grundlagen

Transformatoren (Trafos) oder Übertrager sind elektromagnetische Bauelemente mit wenigstens zwei voneinander isolierten Spulen (Wicklungen). Die erste Wicklung (Primärwicklung) wird von außen erregt, die zweite Wicklung (Sekundärwicklung) wirkt als Spannungsquelle und kann einen weiteren, vom ersten galvanisch getrennten Stromkreis betreiben (Abb. 3.74). Beide Wicklungen sind über einen gemeinsamen Magnetfluss Φ gekoppelt. Transformatoren können Wechselstrom oder Impulse übertragen. Sie haben folgende grundsätzliche Anwendungsgebiete:

- das Übertragen von Leistung bei einer festen Frequenz (Beispiel: Netztransformator),
- Widerstandsanpassung,
- Pegelwandlung,
- Phasenumkehr,
- Spannungsübertragung über einen größeren Frequenzbereich,
- Impulsübertragung,
- Wandlung von Messgrößen,
- galvanische Trennung (Potentialtrennung, Isolation).

Die Primärwicklung setzt die im Primärstromkreis gegebene elektrische Energie in magnetische um. Der Primärstrom I_1 bewirkt eine magnetische Durchflutung $\Theta = I_1 \cdot w_1$ (vgl. (3.20)).

Die Selbstinduktionsspannung U_1 der Primärwicklung muss der Quellspannung U_0 gleich sein (Induktionsgesetz; vgl. (3.3) und (3.4)) :

$$U_0(t) = -L \cdot \frac{dI}{dt} = -w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Die Induktivität L_1 der Primärwicklung muss so groß sein, dass diese Gleichung auch an der unteren Grenzfrequenz f_U erfüllt ist (im Folgenden wird mit sinusförmigen Verläufen weitergerechnet):

$$I(t) = I_{1S} \cdot \sin \omega t\,; \quad \Phi(t) = \Phi_{1S} \cdot \sin \omega t$$

$$\omega = 2\pi\, f_U$$

$$U_0(t) = -2\pi\, f_U \cdot L_1 \cdot I_{1S} \cdot \cos \omega t =$$

$$= -2\pi\, f_U \cdot w_1 \cdot \Phi_{1S} \cdot \cos \omega t$$

I_{1S} = Spitzenwert des Primärstroms, Φ_{1S} = Spitzenwert des magnetischen Flusses.

Die untere Grenzfrequenz f_U bezieht sich auf eine Spannung $U_U = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_0$. Der Übergang auf Effektivwerte ergibt näherungsweise[65]:

$$U_0 \approx 4{,}44 \cdot f_U \cdot L_1 \cdot I_{1S} = 4{,}44 \cdot f_U \cdot w_1 \cdot \Phi_{1S} \qquad (3.105)$$

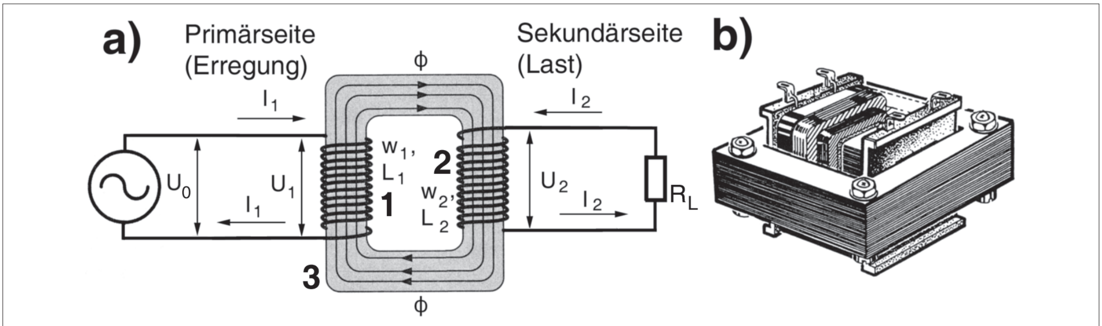


Abb. 3.74: *Der Transformator. a) grundsätzlicher Aufbau, b) Ausführungsbeispiel. 1 – Primärwicklung mit Windungszahl w_1 und Induktivität L_1; 2 - Sekundärwicklung mit Windungszahl w_2 und Induktivität L_2; 3 - Kern; Φ - magnetischer Fluss.*

65 Mit $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 2\pi \approx 4{,}44$

Hieraus ergibt sich die Primärinduktivität zu:

$$L_1 = \frac{U_0}{4{,}44 \cdot f_U \cdot I} \qquad (3.106)$$

Mit $\Phi_{1S} = B \cdot A_K$ (A_K = Kernquerschnitt) ergibt sich die Primärwindungszahl zu:

$$w_1 = \frac{U_0}{4{,}44 \cdot f_U \cdot B \cdot A_K} \qquad (3.107)$$

Die maximale Flussdichte:

$$B_{max} = \frac{U_0}{4{,}44 \cdot f_U \cdot w_1 \cdot A_K} \qquad (3.108)$$

Der Kern ist ein Magnetkreis mit einem magnetischen Widerstand R_m. Die Durchflutung Θ bewirkt einen magnetischen Fluss

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m}$$

(Hopkinsonsches Gesetz; vgl. (3.19)).

Dieser induziert in der Sekundärwicklung eine Spannung

$$U_2 = -w_2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

(Induktionsgesetz; vgl. (3.3)).

Der ideale (verlustlose) Transformator
Beim verlustlosen Transformator sind – weil nichts verlorengeht – Eingangs- und Ausgangsleistung gleich:

$$P_1 = P_2\text{; also } U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \qquad (3.109)$$

Die Spannungen verhalten sich wie die Windungszahlen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = \ddot{U}_U \text{ (Spannungsübersetzung)}$$

(3.110)

Die Stromstärken verhalten sich umgekehrt zu den Windungszahlen:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \ddot{u}_I \text{ (Stromübersetzung)}$$

(3.111)

Das Übersetzungsverhältnis
Typischerweise wird die Spannungsübersetzung als Übersetzungsverhältnis ü bezeichnet.

$$\ddot{u} = \ddot{u}_U = \frac{1}{\ddot{u}_1} = \frac{w_1}{w_2} \qquad (3.112)$$

Die Widerstände verhalten sich wie die Quadrate der Windungszahlen. Als Widerstände R_1, R_2 betrachten wir hier jeweils das Verhältnis von Spannung und Strom auf der Primär- und auf der Sekundärseite ($R_1 = U_1 : I_1$; $R_2 = U_2 : I_2$). Es gilt:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\frac{U_1}{I_1}}{\frac{U_2}{I_2}} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} \cdot \frac{w_1}{w_2} = \frac{w_1^2}{w_2^2} = \ddot{u}^2$$

(3.113)

Induktivitäten
Beim einfachen Transformator mit zwei Wicklungen sind drei Induktivitätskennwerte zu unterscheiden:

- die Induktivität L_1 der Primärwickung,
- die Induktivität L_2 der Sekundärwicklung,
- die Gegeninduktivität M (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Die Induktivitäten verhalten sich wie die Quadrate der Windungszahlen:

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = \ddot{u}^2 \qquad (3.114)$$

Erregungsstrom (Magnetisierungsstrom)
Damit sich der Magnetfluss im Kern überhaupt ändert, muss eine bestimmte magnetische Feldstärke einwirken. Der hierfür erforderliche Mindeststrom (in Aw) heißt Erregungs- oder Magnetisierungsstrom (Exciting Current I_{EX})[66]. Ist der durch die Primärwicklung fließende Strom kleiner als der Magnetisierungsstrom, so passiert auf der Sekundärseite praktisch nichts.

66 Bei gegebener (Koerzitiv-) Feldstärke kann er aus (3.22) errechnet werden.

Der Transformator im sekundärseitigen Leerlauf

An die Sekundärwicklung ist keine Last angeschlossen (Abb. 3.75). Da auf der Sekundärseite kein Strom fließt, kann die Sekundärwicklung auch keinen magnetischen Fluss hervorrufen. Die primärseitige Spannungsquelle sieht somit die Primärwicklung als einzige Induktivität L_1. Somit ergibt sich – als Folge der Selbstinduktion – die typische Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung (der Strom I_0 eilt der Spannung U_1 um 90° nach). In der Sekundärwicklung induziert der dem Strom I_1 proportionale magnetische Fluss eine Leerlaufspannung U_{02}. Die Stromänderung ist dann am größten, wenn der Strom durch Null geht, und sie ist gleich Null, wenn der Strom seinen Höchstwert hat. An den Nulldurchgängen des Stromverlaufs hat also die induzierte Spannung ihre Maxima, an den Höchstwerten hat sie den Wert Null. Das entspricht einer Phasenverschiebung von 90°. Gegenüber der Primärspannung U_1 hat die sekundärseitige Leerlaufspannung U_{02} somit eine Phasenverschiebung von 180° (90° Primärstrom gegen Primärspannung + 90° Sekundärspannung gegen Primärstrom)[67]. Der ideale Transformator ist im Leerlauf ein reiner induktiver Blindwiderstand, hat also keine Verlustleistung. In der Praxis treten nur Kernverluste und Verluste der Primärwicklung auf.

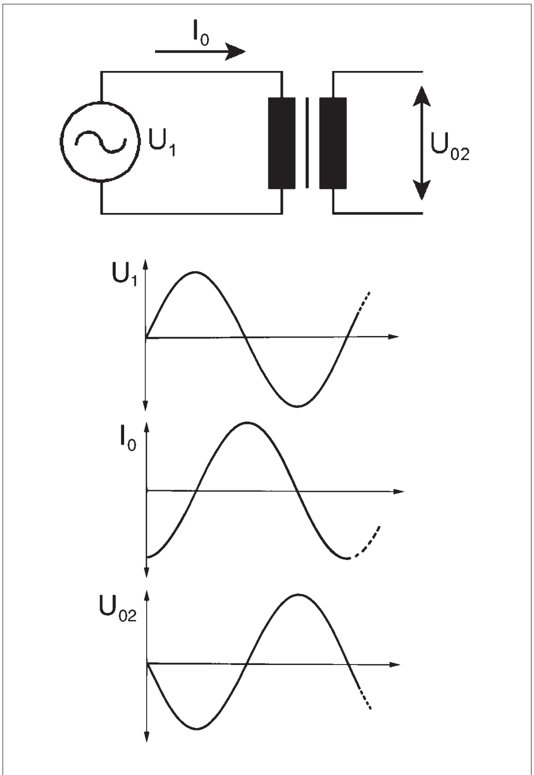


Abb. 3.75: *Der Transformator im Leerlauf.*

Der Transformator bei sekundärseitiger Belastung

Infolge der Belastung fließt auf der Sekundärseite ein Strom I_2 (Abb. 3.76). Dieser baut über die Sekundärwicklung seinerseits ein Magnetfeld auf, das dem der Primärwicklung entgegengerichtet ist (Durchflutung Θ_2). Der die Primärwicklung durchdringende magnetische Fluss wird somit geringer. Infolgedessen verringert sich die Selbstinduktionsspannung, so dass ein stärkerer Primärstrom fließen kann. Hierdurch steigt aber auch die Durchflutung Θ_1 der Primärwicklung und damit der magnetische Fluss – und zwar so lange, bis die Gegenwirkung der Sekundärwicklung (Gegeninduktion) aufgehoben ist. Der Primärstrom kann nur soweit ansteigen, bis sich aufgrund der resultierenden Durchflutung $\Theta_1 + \Theta_2$ ein magnetischer Fluss ergibt, bei dem die Selbstinduktionsspannung der Primärwicklung der Quellspannung U_1 entspricht (elektrisches Gleichgewicht)[68]. Somit bestimmt der Sekundärstrom praktisch den Primärstrom – mit anderen Worten: der Primärstrom I_1 folgt in Verlauf und Phasenlage dem Sekundärstrom I_2 nach.

Die Phasenverschiebung zwischen Primärspannung U_1 und Primärstrom I_1 wird von der Last R_L im Sekundärkreis bestimmt (ohmsche Last: 0°, kapazitive Last: -90°, induktive Last: + 90° usw.).

Ein idealer Transformator reicht also das elektrische Verhalten der sekundärseitigen Last gleichsam zum Primärkreis durch (Abb. 3.77). Er wirkt lediglich im Sinne der Übersetzung und – abhängig vom Wicklungssinn – der Phasendrehung (Phasenverschiebung 0° oder 180°). Hat er ein Übersetzungsverhältnis ü = 1 und sind die

67 Die Erläuterungen beziehen sich darauf, dass beide Wicklungen den gleichen Wicklungssinn haben. Bei anderem Wicklungssinn haben Primär- und Sekundärspannung die gleiche Phasenlage (Näheres s. S. 224).

68 Auch im Leerlauffall gilt Selbstinduktionsspannung = Quellspannung (vgl. S. 220). Folglich muss die resultierende Durchflutung der Primärwicklung gleich der Durchflutung im Leerlauf sein: $\Theta_1 + \Theta_2 = \Theta_0$ ($I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1$). Der Primärstrom steigt soweit, bis das von ihm erzeugte Magnetfeld in der Primärwicklung die Wirkung des von der Sekundärwicklung eingekoppelten Magnetfeldes aufhebt.

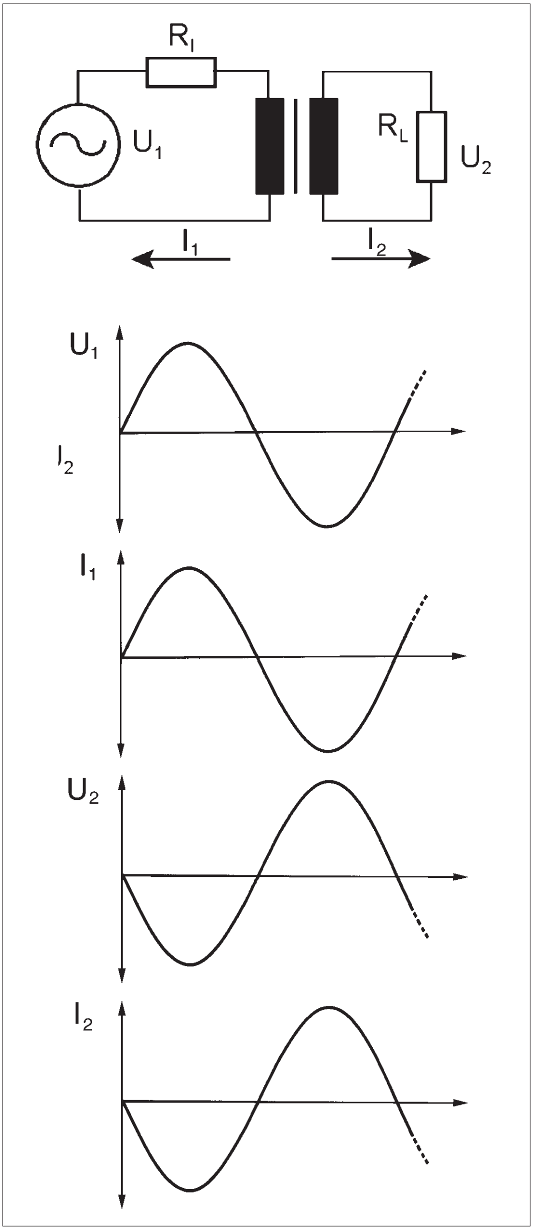


Abb. 3.76: Der belastete Transformator. R_i = Innenwiderstand der Spannungsquelle, R_L = Lastwiderstand.

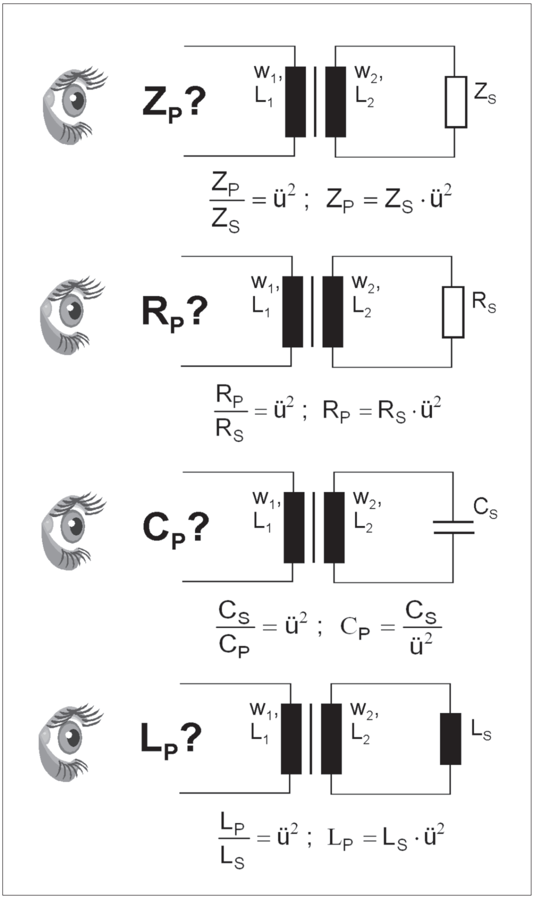


Abb. 3.77: Wie erscheint die Last im Sekundärkreis an den Anschlüssen der Primärwicklung?

Wicklungen entsprechend angeschlossen, so trennt er beide Kreise voneinander, wirkt aber ansonsten so, als sei er nicht vorhanden.

Leistungsübertragung

Eine ohmsche Last R_L im Sekundärkreis setzt eine bestimmte Verlustleistung um, die der Transformator übertragen muss. Auf der Primärseite muss folgende Leistung aufgebracht werden:

$$P_1 = U_1^2 \cdot \frac{ü^2 \cdot R_L}{R_i + ü^2 \cdot R_L^2)} \tag{3.115}$$

Ausgangsspannung

Die am Lastwiderstand R_L abfallende Spannung U_2 ergibt sich folgendermaßen:

$$U_2 = \frac{1}{ü} \cdot U_1 \cdot \frac{ü^2 \cdot R_L}{R_i + ü^2 \cdot R_L} \tag{3.116}$$

Widerstandsanpassung
Auf der Primärseite eines Transformators wird ein Widerstand wirksam, der $ü^2$ mal so groß ist wie der Lastwiderstand R_L (vgl. Abb. 3.77). Durch einen entsprechend ausgelegten Transformator kann man somit eine Wechselspannungsquelle an einen beliebigen Eingangswiderstand des Lastkreises anpassen. Für beliebige allgemeine Widerstände (Impedanzen) Z_1, Z_2 gilt:

$$ü = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \qquad (3.117)$$

Leistungsanpassung
Hierzu muss das Übersetzungsverhältnis so gewählt werden, dass der Widerstand auf der Primärseite dem Innenwiderstand der Spannungsquelle gleich ist.

Phasenlage und Wicklungssinn
Je nachdem, in welchem Drehsinn die Wicklungen angelegt sind und an welchen Enden man den Transformator mit Spannungsquelle und Last verbindet, stimmen die primär- und sekundärseitigen Spannungs- und Stromverläufe in ihrer Phasenlage überein oder es ergibt sich eine Phasenverschiebung von 180° (Phasenumkehr). Es ist im Grunde eine Konventionssache.

Zur Veranschaulichung zeigt Abb. 3.78 einen Transformator mit Stabkern. Beide Wicklungen wurden untereinander in gleicher Weise angelegt (z. B. wurde jeweils am oberen Ende begonnen und – von oben gesehen – im Uhrzeigersinn gewickelt). Der Anfang jeder Wicklung wird – vorläufig – mit einem **x** bezeichnet.

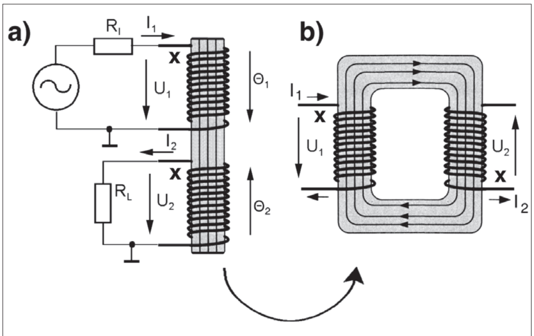


Abb. 3.78: *Wicklungssinn und Phasenlage.*
a) Transformator mit Stabkern. Beide Wicklungen haben den gleichen Wicklungssinn.
b) Durch Umbiegen des Stabs ergibt sich die übliche Darstellung des Transformators.

Um zutreffende Aussagen zu erhalten, muss man den Primär- und den Sekundärkreis auf etwas Gemeinsames beziehen (hier: auf einen Massepegel). Die Sekundärspannung U_2 ist die vom Primärstrom I_1 hervorgerufene Induktionsspannung in der Sekundärwicklung. Wie anhand von Abb. 3.77 gezeigt, beträgt die Phasenverschiebung gegenüber der Primärspannung 180° (Phasenumkehr). Der Sekundärkreis wird über den Lastwiderstand R_L geschlossen. Infolge der rein ohmschen Belastung hat der Sekundärstrom I_2 die gleiche Phasenlage wie die Sekundärspannung U_2, also – im Vergleich zum Primärstrom – die jeweils umgekehrte Richtung. Fließt der Primärstrom zum **x** hinein, so fließt der Sekundärstrom aus dem **x** heraus. Die vom Sekundärstrom I_2 hervorgerufene magnetische Durchflutung Θ_2 wirkt der vom Primärstrom I_1 bewirkten Durchflutung Θ_1 entgegen. Die Phasenlagen der Ströme und Spannungen entsprechen Abb. 3.76.

Wird der Wicklungssinn einer der beiden Wicklungen geändert oder werden die entsprechenden Anschlüsse vertauscht, so drehen sich die Richtungen des Sekundärstroms und der sekundärseitigen Durchflutung um. Bei ohmscher Belastung im Sekundärkreis haben dann alle Ströme und Spannungen die gleiche Phasenlage (Abb. 3.79).

Die oberen Schaltbilder in Abb. 3.79 beziehen sich auf den eigentlichen Wicklungssinn gemäß Abb. 3.78. Beide Wicklungen haben den gleichen Drehsinn, und das **x** bezeichnet jeweils den Anfang. Die übliche Bezeichnung mit Punkten (zweite Reihe in Abb. 3.79) bezieht sich hingegen auf die Polung oder Phasenlage der Spannungen. Die Punkte sind so angebracht, dass bei gleichartiger Verbindung mit dem Bezugspotential (z. B. Masse) die Spannungen an den primär- und sekundärseitigen Anschüssen die gleiche Polung oder Phasenlage haben (vgl. Abb. 3.79b).

Die Phasenkennzeichnung in der Praxis
Hinsichtlich der Phasenlage sind drei Einsatzfälle zu unterscheiden.

a) Sie ist gleichgültig. Beispiel: Netztrafo.
b) Sie ist nur von Bedeutung, um mehrere Primär- oder Sekundärwicklungen richtig untereinander zu verbinden (Reihen- oder Parallelschaltung; vgl. S. 232 ff); die Phasenlage zwischen Primär- und Sekundärseite ist gleichgültig. Beispiel: Netztrafo mit mehreren Wicklungen.
c) Es kommt wirklich darauf an. Beispiel: Impulstransformator.

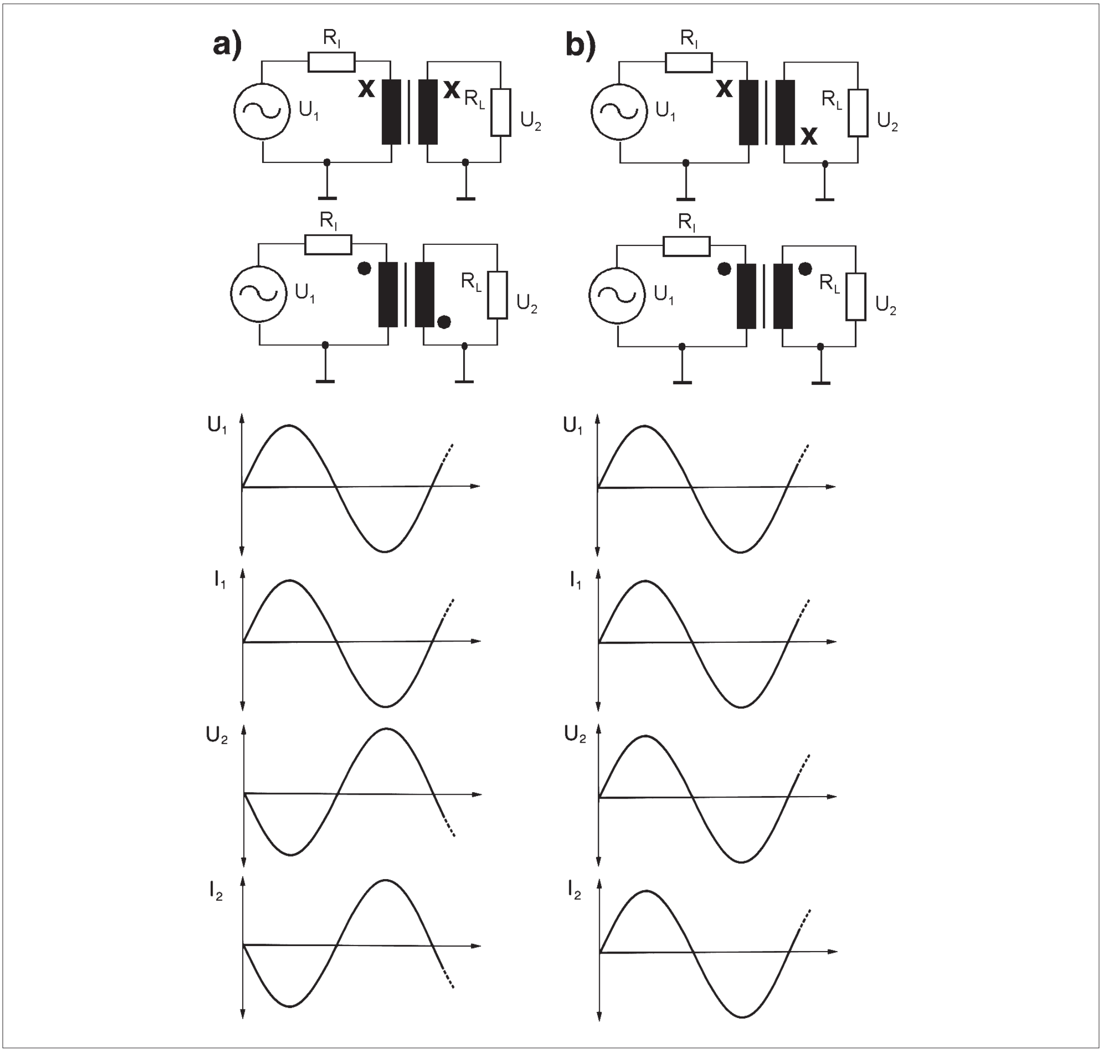


Abb. 3.79: *Phasenlage und Wicklungssinn. a) gleicher Wicklungssinn (gemäß Abb. 3.78) ergibt eine Phasenverschiebung von 180° (Phasenumkehr). b) entgegengesetzter Wicklungssinn. Keine Phasenverschiebung.*

Die Phasenpunkte sind nicht immer angegeben. Manchmal geht die Anschlussbelegung aus dem Datenmaterial hervor. Gelegentlich muss die Phasenlage durch Versuch bestimmt werden (z. B. mittels Funktionsgenerator und Oszilloskop in einem Aufbau ähnlich Abb. 3.79).

Der reale Transformator

Jeder reale Transformator hat Verluste und somit einen Wirkungsgrad < 1. Die Verluste haben mehrere Ursachen:

- Wicklungsverluste (Kupferverluste) der einzelnen Wicklungen,
- Kernverluste (Eisenverluste),
- Streuverluste. Nicht alle magnetischen Feldlinien verbleiben im magnetischen Kreis. Somit wirkt nicht die gesamte magnetische Energie auf die Wicklungen ein.

Richtwert: Reale Transformatoren haben einen Wirkungsgrad zwischen 70 und 98 %.

Für einige Verlustanteile gibt es einfache Zusammenhänge, die empirisch gefunden wurden[69].

a) Hystereseverluste nach Steinmetz:

$$P_{Vh} \approx k_h \cdot B_{\max}^{1,6} \qquad (3.118)$$

b) Wirbelstromverluste:

$$P_e \approx k_e \cdot B_{\max}^{2} \qquad (3.119)$$

(k_h und k_e sind Werkstoffkonstanten (aus dem Datenmaterial), B_{max} ist die maximale Flussdichte).

c) Faustregel:
Die Kernverluste sind näherungsweise dem Quadrat der Primärspannung proportional. Sie können durch einen zur Primärwicklung parallelgeschalteten Verlustwiderstand R_C modelliert werden.

Ersatzschaltungen
Die Abb. 3.80 bis 3.82 zeigen einige Ersatzschaltungen für Transformatoren. Welche davon in Betracht kommt, hängt von Ausführung, Bauform und Betriebsbedingungen ab.
Abb. 3.80 veranschaulicht ein naheliegendes Ersatzschaltbild des realen Transformators, das folgende Einflussgrößen berücksichtigt:

- Jede Wicklung hat einen Wicklungswiderstand (R_1, R_2),
- die magnetischen Flüsse der Wicklungen sind nicht 100%ig miteinander verkoppelt; es verbleiben vielmehr Streuflüsse, die über die Streuinduktivitäten L_{S1}, L_{S2} erfasst werden,
- jede Wicklung hat eine Streukapazität (C_1, C_2),
- da die Wicklungen nahe beieinander angeordnet sind, ergibt sich eine Koppelkapazität C_M.

Das ist allerdings kaum mehr als ein plausibles Modell. Für die rechnerische Behandlung muss der ideale Transformator weggeschafft werden, so dass nur vermaschte Stromkreise übrigbleiben, auf die man die elementaren Gesetze der Elektrotechnik anwenden kann. Ein typischer Ansatz besteht darin, von den Anschlüssen der Primärwicklung aus in den Transformator hineinzusehen und die Kennwerte des Sekundärkreises vermittels des Übersetzungsverhältnisses zu berücksichtigen (Abb. 3.81; vgl. auch Abb. 3.77).

Sind die Kernverluste klein, kann man sie vernachlässigen. Sinngemäß spielen die Kapazitäten praktisch keine Rolle, wenn die Frequenzen nicht allzu hoch sind. Hierdurch ergeben sich vereinfachte Ersatzschaltungen, die in typischen Anwendungsbereichen (Netz, Audio usw.) brauchbar sind (Abb. 3.82).

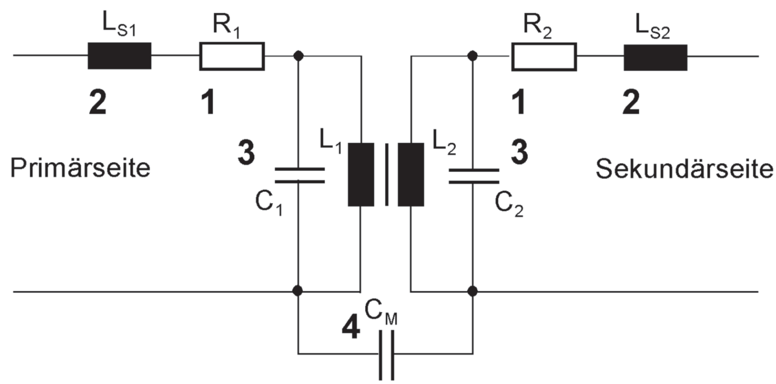
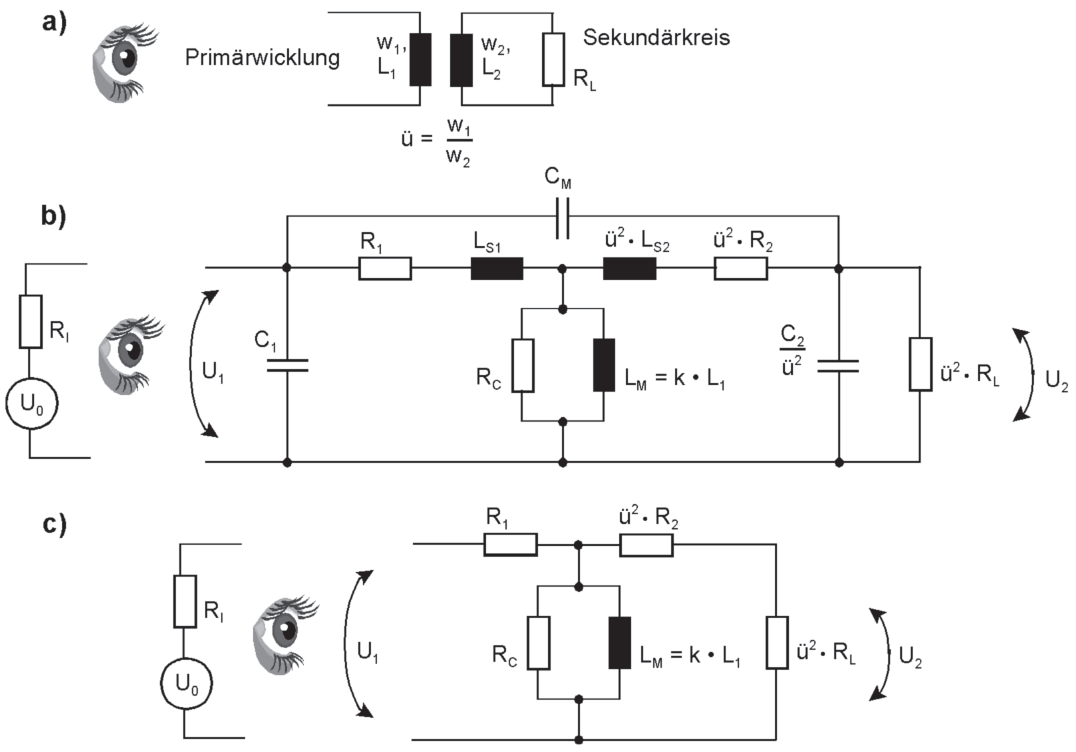


Abb. 3.80: *Der reale Transformator in einem naiven Ersatzschaltbild. 1 - Wicklungswiderstände; 2 - Streuinduktivitäten; 3 - Streukapazitäten; 4 - Koppelkapazität.*

69 a), b), c) nach [3.3]. Grundsätzliches zu den Verlusten vgl. S. 185 f. WelcheVerlustanteile Bedeutung haben und welche vernachlässigt werden können, hängt vom Einsatzfall und von der Bauart des Transformators ab. Zum praktischen Rechnen sei auf die Angaben der Transformatorhersteller verwiesen (Internet).



U_0	Quellspannung
R_I	Innenwiderstand der Spannungsquelle
U_1	Klemmenspannung der Primärwicklung
R_1	Wicklungswiderstand der Primärwicklung
L_{S1}	Streuinduktivität der Primärwicklung
$ü^2 \cdot L_{S2}$	Streuinduktivität der Sekundärwicklung (von Primärseite gesehen)
$ü^2 \cdot R_2$	Wicklungswiderstand der Sekundärwicklung (von Primärseite gesehen)
U_2	Ausgangsspannung
$C_2 / ü^2$	Kapazität der Sekundärwicklung (von Primärseite gesehen)
$ü^2 \cdot R_L$	Lastwiderstand (von Primärseite gesehen)
$L_M = k \cdot L_1$	Koppelinduktivität; k = Koppelfaktor (vgl. (3.50))
R_C	Kernverluste
C_1	Kapazität der Primärwicklung
C_M	Koppelkapazität zwischen den Wicklungen

Abb. 3.81: *Ersatzschaltungen eines Transformators. a) der ideale Transformator; b) eine universelle Ersatzschaltung; c) Vereinfachung für niedrige Frequenzen.*

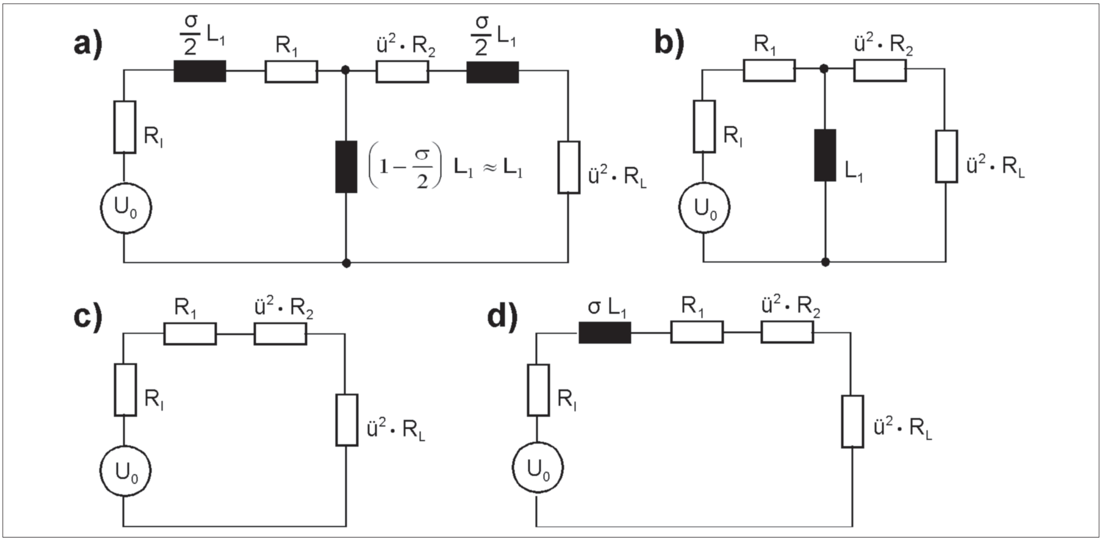


Abb. 3.82: *Vereinfachte Ersatzschaltungen. a) Vollständig; b) für niedrige Frequenzen; c) für mittlere Frequenzen; d) für höhere Frequenzen. Zu den Bezeichnungen s. Abb. 3.81. Die Streuinduktivitäten ergeben sich hier über den Streugrad σ.*
Hinweis: Zu vergleichsweise einfachen Ersatzschaltungen vgl. auch [3.1]. Die Schaltbilder von [3.1] enthalten ideale Transformatoren. Hingegen werden hier die sekundärseitigen Parameter entsprechend dem Übersetzungsverhältnis auf der Primärseite dargestellt.

Die magnetische Feldstärke

Der Kern des Transformators darf nicht in die Sättigung gelangen. Deshalb kann man nur den (nahezu) linearen Teil der Magnetisierungskennlinie ausnutzen (Abb. 3.83).

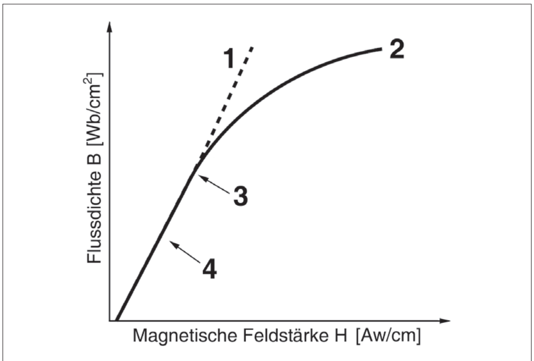


Abb. 3.83: *Zur Ausnutzung der Magnetisierungskennlinie.1 - idealer, 2- realer Verlauf. 3 - bis hierher darf die Kennlinie höchstens ausgenutzt werden, darüber hinaus gelangt der Kern allmählich in die Sättigung. Anwendungsbeispiel: Netztransformator. 4 - wenn es darauf ankommt, Strom- und Spannungsverläufe unverfälscht zu übertragen, sollte man den Kern nicht bis zum letzten ausnutzen (Anwendungsbeispiel: Audio-Transformator).*

Frequenzbereiche

Aus (3.108) ist ersichtlich, dass – bei gegebener Spannung – die Flussdichte im Kern mit zunehmender Frequenz abnimmt. Bei höheren Frequenzen kommt man also – wenn man die zulässige Flussdichte (Magnetisierung) des Kernwerkstoffs ausnutzt – mit einem kleineren Kern aus, um eine bestimmte Leistung zu übertragen. Stellt man (3.108) nach dem Kernquerschnitt um und setzt die Kernquerschnitte A_{K1}, A_{K2} für zwei Frequenzen f_1, f_2 ins Verhältnis, so ergibt sich:

$$\frac{A_{K1}}{A_{K2}} = \frac{f_2}{f_1} \tag{3.120}$$

Zwar verschlechtert sich der Wirkungsgrad (infolge der Hystereseverluste), Gewicht und Abmessungen verringern sich aber beträchtlich (die Abmessungen proportional zur Quadratwurzel des Verhältnisses (3.120)). Historisches Anwendungsbeispiel: die 400-Hz-Versorgung in Rechenzentren und Flugzeug-Bordnetzen (400 Hz ergeben – im Vergleich zur üblichen Netzfrequenz – nach (3.120) eine Kernquerschnittsverringerung im Verhältnis 1:8 und damit etwa ein Drittel der Kerngröße).