

Transformatoren

Transformatoren¹ formen elektrische Leistung auf andere Spannungen und Ströme um. In der Energieübertragung wird die elektrische Leistung mittels Transformatoren auf hohe Spannungen und entsprechend kleine Ströme transformiert, um die Leitungsverluste in wirtschaftlich vertretbaren Grenzen zu halten. In der Elektronik wird die Netzspannung auf kleine, für den Benutzer ungefährliche und für die Elektronik verträgliche Werte heruntertransformiert. Ausserdem wird mittels des Transformators eine galvanische Trennung zwischen berührbaren Teilen und der Netzspannung erreicht.

Schaltzeichen:

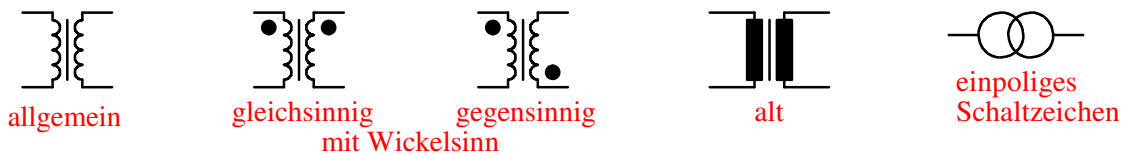


Abb.2.1: Schaltzeichen nach EN 60617

Auf dem **Typenschild** eines einphasigen Transformators sind die primärseitige **Bemessungsspannung (Nennspannung)** U_{1N} die sekundärseitige **Bemessungsspannung (Nennspannung)** U_{2N} bei sekundärseitigem Nennstrom I_{2N} und die **Bemessungsscheinleistung (Typenleistung)** S_N , die auf der Sekundärseite im Dauerbetrieb bei üblicherweise 40° Umgebungstemperatur abgenommen werden darf. Die Nennströme können aus der Scheinleistung berechnet werden.

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}; I_{1N} \approx \frac{S_N}{U_{1N}}$$

Alle Spannungen und Ströme werden als Effektivwerte angegeben.

Der ideale Transformator

Ein Eisenschenkel trägt zwei Spulen, die magnetisch ideal gekoppelt sind, d.h. beide Wicklungen werden von demselben magnetischen Fluss durchsetzt. Die relative Permeabilität des Eisens sei unendlich. Die Spulen seien gleichsinnig gewickelt (Abb.2.2).

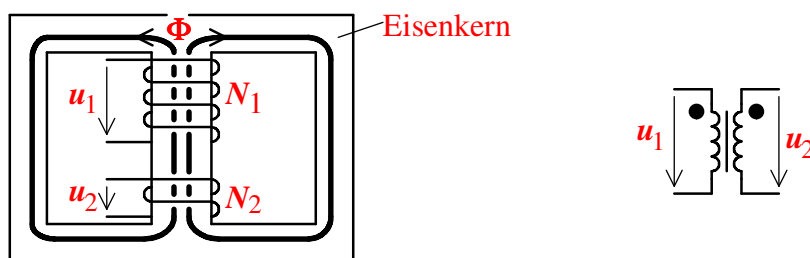


Abb.2.2: Prinzip des Transformators

An der Primärwicklung (Windungszahl N_1) werde die Spannung u_1 gelegt. Diese erzeugt nach dem Induktionsgesetz eine magnetische Flussänderung $\frac{d\Phi}{dt} = \frac{u_1(t)}{N_1}$. Der Fluss Φ , und damit

¹ Transformator: transformer

auch die Flussänderung, durchsetzt die Sekundärwicklung (N_2) und induziert dort die Spannung $u_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \cdot \frac{u_1(t)}{N_1}$.

Für das Verhältnis der Primär- zur Sekundärspannung gilt:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- Die Spannungen an der Primär- und Sekundärwicklung verhalten sich wie ihre Windungszahlen.
- Die Spannungen u_1 und u_2 haben zeitlich den gleichen Verlauf. Bei sinusförmiger Spannung u_1 ist u_2 ebenfalls sinusförmig und hat die gleiche Phasenlage (bei gleichem Wickelsinn, wie in Abb.2.2).

Der ideale Transformator ist verlustlos, d.h. genau die Leistung, die sekundär abgenommen wird, wird primär aufgenommen. Dies gilt ebenso für die Scheinleistung. Dies bedeutet auch, dass der ideale Transformator im Leerlauf ($I_2=0$) keinen primärseitigen Strom aufnimmt und dass die Primärwicklung eine gegen unendlich gehende Induktivität besitzt (siehe Abb 2.3a).

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = S_2 = U_2 \cdot I_2$$

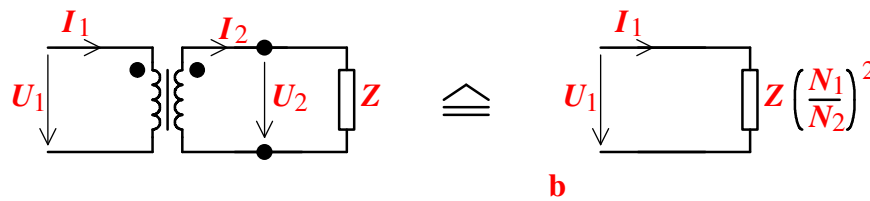


Abb.2.3: **a** Zur Leistungsbilanz am idealen Transformator; **b** Transformation der Last Z auf die Primärseite

Dies führt zu:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- Die Ströme auf der Primär- und Sekundärseite verhalten sich umgekehrt zu den Windungszahlen.
- Die Ströme auf der Primär- und Sekundärseite verhalten sich umgekehrt proportional zu den Spannungen.

Die sekundär angeschlossene Last Z bestimmt den Sekundärstrom $I_2 = \frac{U_2}{Z}$. Mit $I_2 = I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2}$

und $U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1}$ folgt $I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{U_2}{Z} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \cdot \frac{U_1}{Z}$.

und

$$\frac{U_1}{I_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot Z$$

- Die Last Z auf der Sekundärseite erscheint im Quadrat der Windungszahlen auf der Primärseite (Abb 2.3b).

Der reale Transformator

Der reale Transformator wird im Betrieb warm, d.h. er hat Verluste. Ausserdem sind die Wicklungen nicht ideal gekoppelt und die primäre Induktivität nicht unendlich gross. Diese Abweichungen gegenüber dem idealen Transformator berücksichtigt man in einem Ersatzschaltbild mittels zusätzlicher Schaltungselementen.

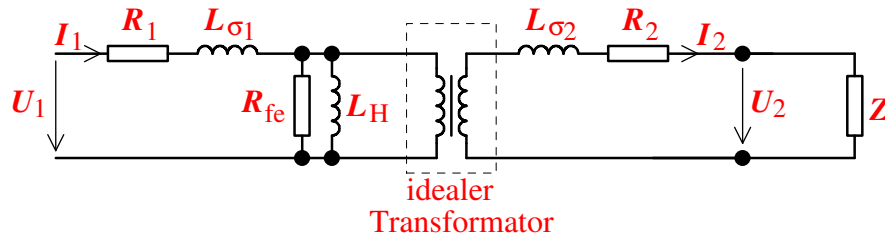


Abb.2.4: Ersatzschaltbild des realen Transformators

- Der reale Transformator nimmt auch im Leerlauf ($I_2=0$) einen geringen Strom auf, den sogenannten Magnetisierungsstrom. Er wird mittels L_H berücksichtigt. (idealer Transformator: $L_H \rightarrow \infty$).
- Die Hysterese- und Wirbelstromverluste werden durch R_{fe} berücksichtigt. R_{fe} ist sehr hochohmig (idealer Transformator: $R_{fe} \rightarrow \infty$).
- Die Stromwärmeverluste in den Kupferwicklungen werden durch die Widerstände R_1 und R_2 berücksichtigt. R_1 und R_2 sind sehr niederohmig (idealer Transformator: R_1 und R_2 gleich Null).
- Der magnetische Fluss durchsetzt nicht vollständig beide Wicklungen. Der Streufluss wird durch die Streuinduktivitäten L_{σ_1} und L_{σ_2} berücksichtigt (idealer Transformator: L_{σ_1} und L_{σ_2} gleich Null).

Man vereinfacht dieses Ersatzschaltbild des realen Transformators weiter, indem man den idealen Transformator weglässt und alle sekundären Elemente mit den Quadrat des Windungszahlenverhältnisses umrechnet (Abb.2.5).

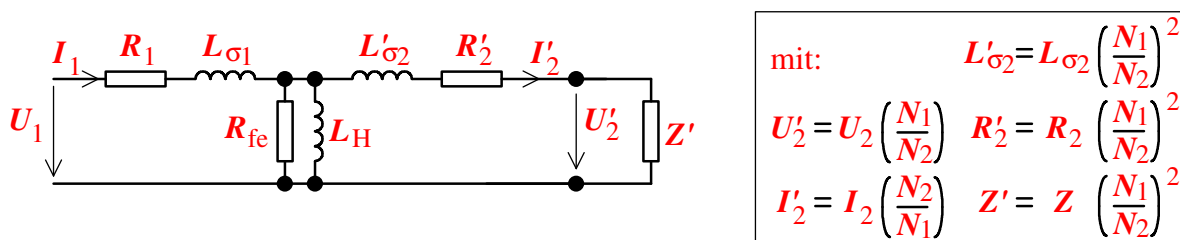


Abb.2.5: vereinfachtes Ersatzschaltbild des realen Transformators ohne galvanische Trennung

Messung der Leerlaufverluste P_0 :

Die Leerlaufverluste entstehen immer, wenn der Transformator an das Versorgungsnetz angeschlossen ist, gleichgültig wie er sekundärseitig belastet wird. Sie werden mit primärseitiger Nennspannung und sekundärseitigem Leerlauf gemessen (Abb.2.6). Die Kupferverluste in der Primärwicklung sind im Leerlauf vernachlässigbar klein.

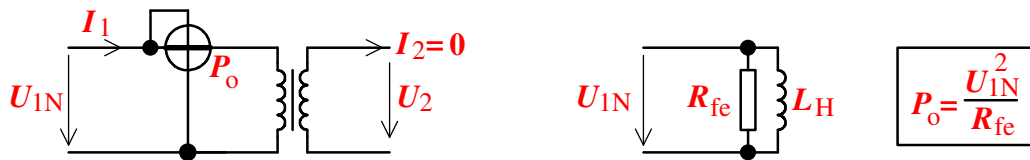


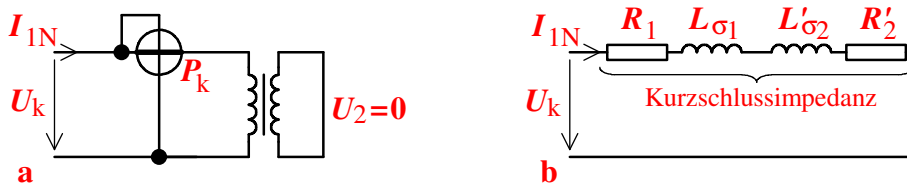
Abb.2.6: Messung der Leerlaufverluste

Mittels der Leerlaufmessung können R_{fe} und L_H bestimmt werden:

$$R_{fe} = \frac{U_{IN}^2}{P_0} \quad \text{und} \quad \omega L_H = \frac{U_{IN}^2}{Q_0} = \frac{U_{IN}^2}{\sqrt{(U_{IN} \cdot I_1)^2 - P_0^2}}$$

Messung der Stromwärmeverluste:

Die Stromwärmeverluste in den Wicklungen werden im sogenannten **Kurzschlussversuch** bestimmt. Der Transformator wird sekundärseitig kurzgeschlossen und die Primärspannung so eingestellt, dass primärseitig der Nennstrom fließt (Abb.2.7). Die gemessenen Verluste sind näherungsweise die Stromwärmeverluste im Nennbetrieb. Die Eisenverluste sind in diesem Betriebsfall wegen der kleinen Primärspannung vernachlässigbar.

Abb.2.7: **a** Messung der Stromwärmeverluste mittels Kurzschlussversuch; **b** Ersatzschaltbild

Die Stromwärmeverluste betragen für den Bemessungsstrom:

$$P_k = I_{IN}^2 (R_1 + R'_2)$$

Mittels der Kurzschlußmessung können die Wicklungswiderstände ($R_1 + R'_2$) und die Streureaktanzen $\omega(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2})$ bestimmt werden:

$$R_1 + R'_2 = \frac{P_k}{I_{IN}^2} \quad \text{und} \quad \omega(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2}) = \frac{\sqrt{(U_k \cdot I_{IN})^2 - P_k^2}}{I_{IN}^2}$$

Die im Kurzschlussversuch primär anliegende Spannung nennt man **Kurzschlussspannung**. Sie wird üblicherweise in % der primären Nennspannung angegeben und dann mit klein $u_k(\%)$ bezeichnet.

$$u_k(\%) = \frac{U_k}{U_{IN}} \cdot 100\%$$

Die Kurzschlussspannung ist ein Maß für die sekundärseitige Spannungs Konstanz bei verschiedenen Belastungsfällen. Die Sekundärspannung wird im Leerlauf maximal um die

Kurzschlussspannung $u_k(\%)$ gegenüber dem Nennlastfall größer (worst case Schätzung, ohne die Phasenlagen zu berücksichtigen).

Im Kurzschlussfall bestimmt die Kurzschlussimpedanz (Abb. 2.7) den Dauerkurzschlussstrom. Der Dauerkurzschlussstrom beträgt:

$$I_{1kN} = I_{1N} \cdot \frac{100\%}{u_k}; \quad I_{2kN} = I_{2N} \cdot \frac{100\%}{u_k}$$

Betriebsverluste

Die Betriebsverluste setzen sich aus den Leerlaufverlusten und den Stromwärmeverlusten in den Wicklungen (Wicklungsverluste) zusammen. Die Leerlaufverluste sind immer vorhanden, solange die Primärwicklung am Netz liegt. Die Stromwärmeverluste sind von der Belastung abhängig und sind proportional zur Ausgangsscheinleistung bzw. proportional zu Quadrat des Ausgangsstromes:

$$P_v = P_0 + P_k \cdot \frac{S_2}{S_N} = P_0 + P_k \cdot \left(\frac{I_2}{I_{2N}} \right)^2$$

Parallelschalten von Transformatoren

Beim Parallelschalten von Transformatoren muss sichergestellt werden, dass sich die Gesamtleistung entsprechend der Bemessungsscheinleistungen S_N (Typenleistung) auf die parallelgeschalteten Transformatoren verteilt. Die Verteilung der Leistung hängt von den Kurzschlussimpedanzen $(R_1 + R'_2) + j\omega(L_{\sigma 1} + L'_{\sigma 2})$ ab. Damit sich die Scheinleistungen entsprechend den Bemessungsscheinleistungen auf die Transformatoren verteilen, müssen sich die Kurzschlussimpedanzen in Real- und Imaginärteil umgekehrt verhalten, wie die Bemessungsscheinleistungen S_N (siehe Abb. 2.8).

$$\frac{R_{11} + R'_{21}}{R_{12} + R'_{22}} = \frac{S_{2N}}{S_{1N}}, \quad \text{und} \quad \frac{L_{\sigma 11} + L'_{\sigma 21}}{L_{\sigma 12} + L'_{\sigma 22}} = \frac{S_{2N}}{S_{1N}}$$

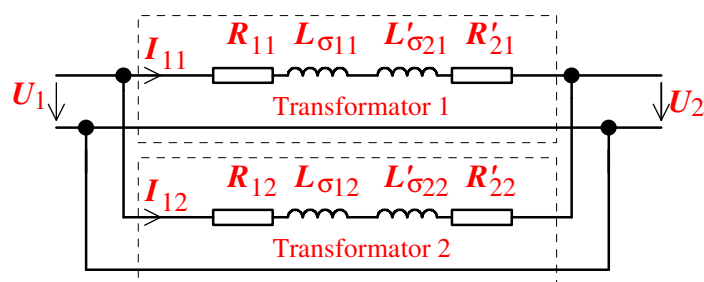


Abb.2.8: Parallelschaltung von Transformatoren

Spartransformatoren

Spartransformatoren² sind angezapfte Drosselspulen (Abb. 2.9). Sie bieten keine galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärseite. Primär- und Sekundärwicklung dienen sowohl als Primär- als auch als Sekundärwicklung. Als transformatorische Leistung wird

² Spartransformator: auto transformer

lediglich der Teil $(U_2 - U_1) \cdot I_2$ (Abb.2.9a) bzw. $(U_1 - U_2) \cdot I_1$ (Abb.2.9b) übertragen. Dies führt zum Teil zu erheblichen Einsparungen in der Baugröße sowie in den Herstellungskosten.

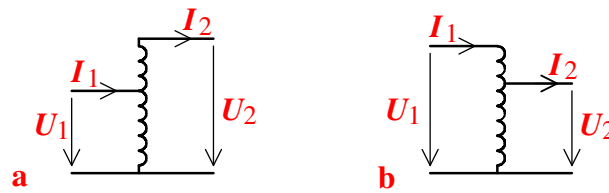


Abb.2.9: Spartransformatoren

Trenntransformatoren

Trenntransformatoren³ haben ein Übersetzungsverhältnis von 1:1 und sorgen für eine galvanische Trennung zwischen Primär- und Sekundärseite. Die Sekundärseite ist üblicherweise direkt als Netzanschlussdose ausgeführt, jedoch *ohne* Schutzleiteranschlussspangen. Die Sekundärseite hat *keinen* Schutzleiteranschluss! Die Sekundärseite hat *keinen* Potentialbezug zur Erde.

Die galvanische Trennung zwischen Primär- (Netz-) und Sekundärseite hat zur Folge, dass auf der Sekundärseite der Erdbezug beliebig gewählt werden kann. Dies ist für Messzwecke sehr hilfreich. So kann beispielsweise auf der Sekundärseite bzw. in einer angeschlossenen elektrischen Schaltung mit einem Oszillographen mit geerdeter Masse gemessen werden (Abb 2.10).

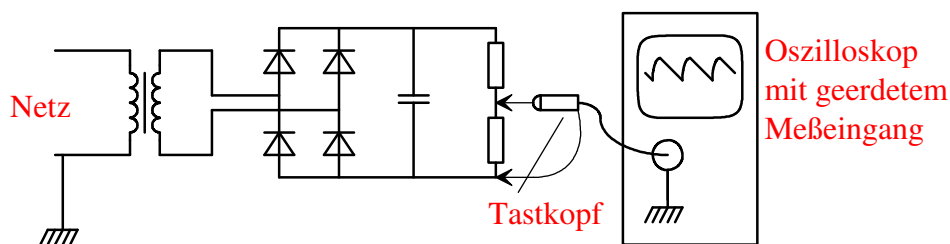


Abb. 2.10: Beispiel für die Anwendung eines Trenntransformators. Der Minuspol der Gleichspannung ist über das Oszilloskop geerdet.

Drehstromtransformatoren

Drehstromtransformatoren⁴ transformieren dreiphasige Spannungssysteme. Sie haben im einfachsten Fall drei Primär und drei Sekundärwicklungen, die jeweils in Stern- oder Dreieck geschaltet sein können. Daneben gibt es sogenannte Zick-Zack-Wicklungen, bei denen die Primär- und/oder die Sekundärwicklung auf mehrere Schenkel verteilt sind. Primär- und Sekundärseite werden bei Drehstromtransformatoren als Ober- und Unterspannungsseite bezeichnet.

³ Trenntransformator: isolating transformer

⁴ Drehstromtransformator: three-phase transformer

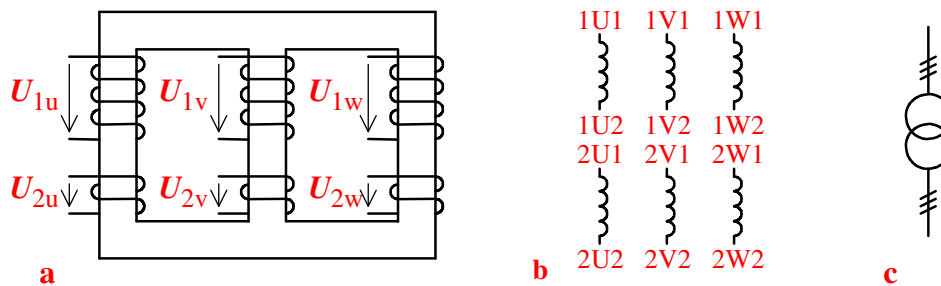


Abb.2.11: Drehstromtransformator

a Wicklungsanordnung; b Schaltzeichen mit Klemmenbezeichnungen; c einpoliges Schaltzeichen

Das Typenschild des Drehstromtransformators weist die Typenleistung S_N (Bemessungsscheinleistung), die Bemessungsspannungen der Ober- und Unterspannungsseite und die Schaltgruppe auf. Bei den Spannungsangaben handelt es sich um die Aussenleiterspannungen. Die zugehörigen Bemessungsströme berechnen sich:

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}}, \quad \text{bzw.} \quad I_{1N} \approx \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}}$$

In I_{1N} bleiben die Transformatorverluste in dieser Berechnung unberücksichtigt.

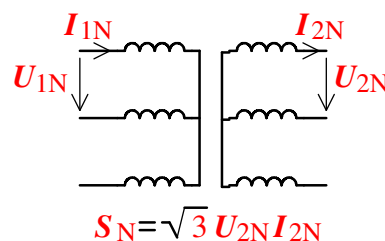


Abb.2.12: Interpretation der Typenschildangaben

Schaltgruppen und Kennzeichnung

Die sogenannte Schaltgruppe⁵ kennzeichnet die Verschaltung von Ober- und Unterspannungsseite. Ausserdem gibt sie die Phasenlage zwischen Ober- und Unterspannungsseite an. Stern-, Dreieck- oder Zick-Zackschaltung werden auf der Oberspannungsseite mit Y, D und Z und auf der Unterspannungsseite mit y, d und z bezeichnet. Ein zugänglicher Sternpunkt wird mit N oder n angegeben. Ein Zahlenwert gibt die Phasenlage der Oberspannung gegenüber der Unterspannung als Vielfache von 30° an. Tabelle 2.1. zeigt besonders übliche Schaltgruppen.

⁵ Schaltgruppe: vector group

Schaltgruppe	Schaltung	Zeigerdarstellung
Yy0		
Yd5		
Dyn5		
Yz5		

Tabelle.2.1: Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren (Beispiele)