3. Transformatoren

3.1 Allgemeines

Transformatoren dienen zur Spannungsumformung von Wechselspannungen. Die wesentliche Anwendung des Transformators finden wir in der Energietechnik. Um die Leistung $U \cdot I$ (Scheinleistung) mit geringen Verlusten $I^2 \cdot R$ über größere Entfernungen zu übertragen, muß I möglichst klein, entsprechend U möglichst groß sein.

Spannungsebenen:

- Energieerzeugung mit Synchrongeneratoren mit Spannungen um 20 kV
- Energieübertragung in Hochspannungsnetzen mit Spannungen zwischen 100 kV und 800 kV
- Energieverteilung in Mittel- und Niederspannungsnetz zwischen 100 kV und 30 kV
- Energieeinspeisung für Stromrichterantriebe 0,4...30 kV

An den Schnittstellen der Spannungsebenen besorgen Transformatoren die Spannungsumformung, Bild 3.1. Der Wirkungsgrad beträgt bis zu 99 % und steigt mit der Transformatorgröße. Die Wirkungsweise des Transformators beruht auf dem Induktionsgesetz. (2. Maxwell´sche Gleichung) (zählweise vgl. Bild 2.2)

$$u_q = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt}\int \vec{B}\,d\vec{A} = \oint \vec{E}\,d\vec{s} \qquad \textbf{(3.(1)}$$

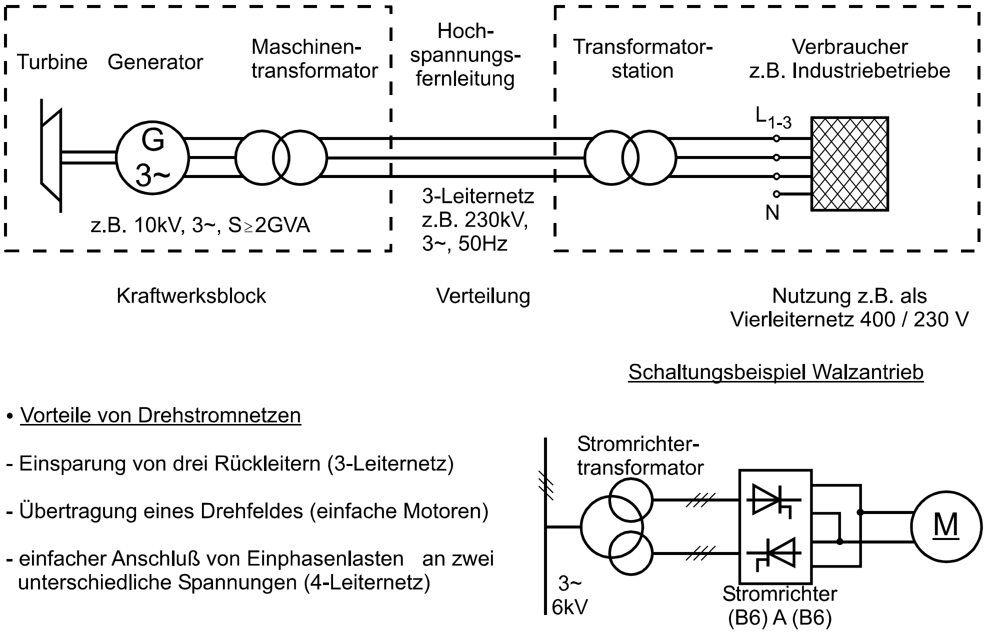


Bild 3.1: Erzeugung, Verteilung und Anwendung elektrischer Energie z.B. Walzantrieb

3.1.1 Grundmodell des Transformators

Die Anordnung in Bild 3.2 ist das Grundmodell des Transformators.

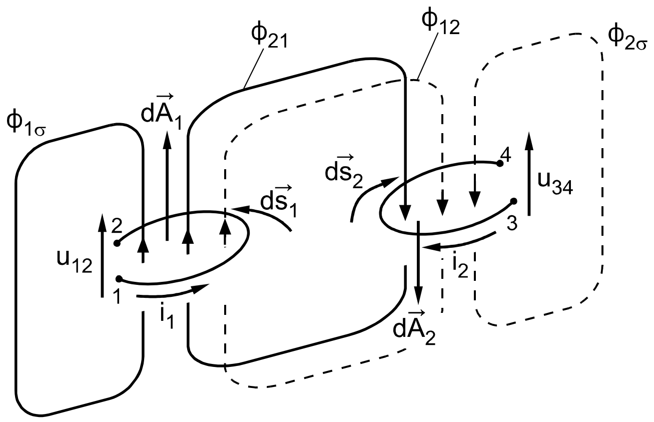


Bild 3.2: Zwei magnetisch gekoppelte, stromdurchflossene Windungen

Der Strom i_1 in Spule 1 ($N_1 = N_2 = 1$) erzeugt einen magnetischen Fluß Φ_{11} (mit der Windung der Spule 1 verkettet); der Strom i_2 erzeugt einen magnetischen Fluß Φ_{22}.

Die Anteile von Φ_{11}:

- Φ_{21} ist mit den Windungen der Spule 2 verkettet (primärer Hauptfluß Φ_{1h})
- $\Phi_{1\sigma} = \Phi_{11} - \Phi_{21}$ ist der Differenzfluß (bzw. Streufluß)

Für die Flüsse in den einzelnen Spulen gilt:
Spule 1 ($N_1 = 1$)

$\Phi_{1\sigma}$, Φ_{21} durch i_1 erzeugt; $\Phi_{11} = \Phi_{1\sigma} + \Phi_{21}$
Φ_{12} durch i_2 erzeugt; Gesamtfluß $\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12}$

Spule 2 ($N_2 = 1$)

$\Phi_{2\sigma}$, Φ_{12} durch i_2 erzeugt; $\Phi_{22} = \Phi_{2\sigma} + \Phi_{12}$
Φ_{21} durch i_1 erzeugt; Gesamtfluß $\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21}$

Für die Spannungen gilt ($N_1 \neq N_2 \neq 1$):

$$u_{12} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 \cdot \frac{d\Phi_{11}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\Phi_{12}}{dt} = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M_{12} \cdot \frac{di_2}{dt} \qquad \textbf{3.(2)}$$

$$u_{34} = N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} = N_2 \cdot \frac{d\Phi_{22}}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\Phi_{21}}{dt} = L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M_{21} \cdot \frac{di_1}{dt} \qquad \textbf{3.(3)}$$

Aufgrund einer Energiebetrachtung ergibt sich der wichtige Zusammenhang (hier ohne Ableitung):

$$M_{12} = M_{21} = M \qquad \textbf{3.(4)}$$

3.1.2 Das elektrische Ersatzschaltbild

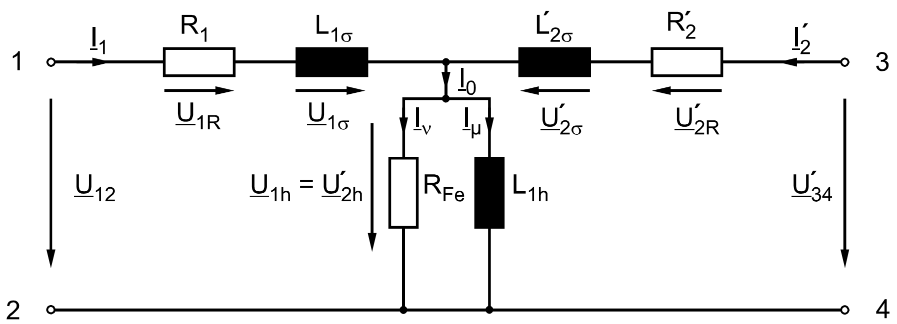


Bild 3.3: Auf die Primärseite bezogenes, einphasiges ESB des Transformators

Bild 3.3 zeigt das vollständige elektrische Ersatzschaltbild des Transformators.
Im Ersatzschaltbild können die Eisenverluste durch einen ohmschen Widerstand R_{fe} parallel zu L_{1h} nachgebildet werden.
Damit das ESB die Realität richtig wiedergibt, muß der Sekundärstrom auf die Primärseite bezogen (auf die Primärseite umgerechnet) werden. Auf die Primärseite bezogene Größen werden durch einen Strich gekennzeichnet.

$$i_2' = \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 = \frac{1}{\ddot{u}} \cdot i_2 \qquad \textbf{(3.(5)}$$

Da natürlich die umgesetzten Leistungen bei Berechnungen nach ESB 3.3 den tatsächlichen Leistungen entsprechen müssen, müssen auch Spannungen und Widerstände der Sekundärseite auf die Primärseite bezogen werden.

$$U_{34}' = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_{34} = \ddot{u} \cdot U_{34} \qquad \textbf{(3.(6)}$$

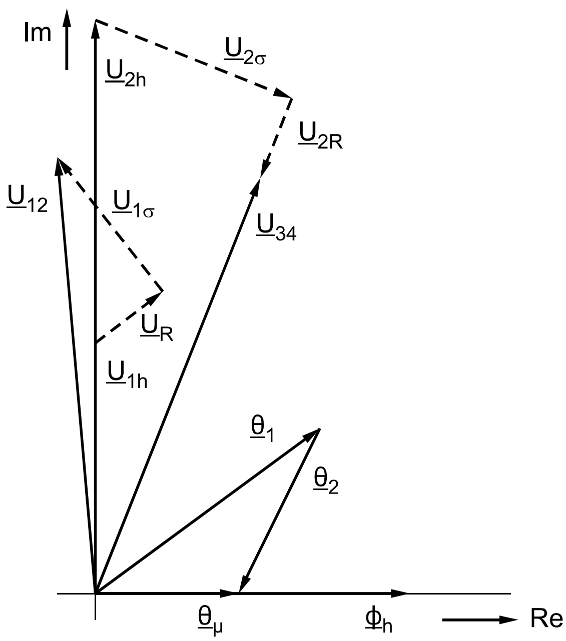
$$R_2' = \ddot{u}^2 \cdot R_2 \quad ; \quad L_{2\sigma}' = \ddot{u}^2 \cdot L_{2\sigma} \qquad \textbf{(3.(7)}$$

Die Spannungsgleichungen des Transformators nach ESB 3.3 lauten:

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{1h} + \underline{U}_{1R} + \underline{U}_{1\sigma} = j\omega L_{1h} \cdot \underline{I}_{\mu} + R_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 \qquad \textbf{(3.(8)}$$

(Sekundärgrößen nicht auf die Primärseite bezogen)

$$\begin{aligned} \underline{U}_{34} &= \underline{U}_{2h} + \underline{U}_{2R} + \underline{U}_{2\sigma} = j\omega N_2 \underline{\Phi}_h + \underline{U}_{2R} + \underline{U}_{2\sigma} \\ &= j\omega \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot L_{1h} \cdot \underline{I}_{\mu} + R_2 \cdot \underline{I}_2 + j\omega L_{2\sigma} \cdot \underline{I}_2 \end{aligned} \qquad \textbf{(3.(9)}$$



$\underline{U}_{1h} = j\omega N_1 \cdot \underline{\Phi}_h$

$\underline{U}_{2h} = j\omega N_2 \cdot \underline{\Phi}_h$

$\underline{U}_{1R} = R_1 \cdot \underline{I}_1 \qquad \underline{U}_{2R} = R_2 \cdot \underline{I}_2$

$\underline{U}_{1\sigma} = j\omega L_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 \qquad \underline{U}_{2\sigma} = j\omega L_{2\sigma} \cdot \underline{I}_2$

$\underline{U}_{12} = \underline{U}_{1h} + \underline{U}_{1R} + \underline{U}_{1\sigma}$

$\underline{U}_{34} = \underline{U}_{2h} + \underline{U}_{2R} + \underline{U}_{2\sigma}$

Bild 3.4: Zeigerdiagramm des belasteten Transformators

Da $\ddot{u}$ meist stark von 1 abweicht, wird das Zeigerdiagramm in Bild 3.4 unhandlich. Damit Primärgrößen und Sekundärgrößen im gleichen Maßstab gezeichnet werden können, kann man alle Sekundärspannungen mit $\ddot{u}$ multiplizieren. Entsprechend werden alle Sekundärströme mit $\frac{1}{\ddot{u}}$ multipliziert. Die Leistung ändert sich durch diese Transformation nicht.

Um Berechnungen nach ESB 3.3 durchführen zu können müssen auch die Spannungsgleichungen auf die Primärseite bezogen werden. Hier ist $\underline{U}_{1h} = \underline{U}'_{2h} = ü \cdot \underline{U}_{2h}$.

Damit lauten die Spannungsgleichungen des Einphasentransformators:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{12} &= R_1 \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{1\sigma} \cdot \underline{I}_1 + j\omega L_{1h} \cdot \underline{I}_\mu \\ &= \underline{U}_{1R} + \underline{U}_{1\sigma} + \underline{U}_{1h} \end{aligned} \qquad \textbf{3.(10)}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}'_{34} &= R'_2 \cdot \underline{I}'_2 + j\omega L'_{2\sigma} \cdot \underline{I}'_2 + j\omega L_{1h} \cdot \underline{I}_\mu \\ &= \underline{U}'_{2R} + \underline{U}'_{2\sigma} + \underline{U}_{1h} \end{aligned} \qquad \textbf{3.(11)}$$

Bemerkungen zu Ersatzschaltbildern

Das Ersatzschaltbild ist eine Schaltung, die denselben Gleichungen gehorcht wie das Originalgebilde, das durch die Ersatzschaltung dargestellt wird, ohne daß im einzelnen die gleichen physikalischen Vorgänge zugrundegelegt werden. Insbesondere sind die Ortskoordinaten der magnetischen und elektrischen Felder eliminiert.
Ein Ersatzschaltbild kann auch Vereinfachungen gegenüber dem Originalgebilde enthalten - muß es aber nicht!

Die Ersatzschaltung des Transformators ist ein typisches Beispiel.

1. Unterschiedliche physikalische Vorgänge:

   - L_σ: Konzentrierte Induktivität zur Darstellung der unvollkommenen magnetischen Kopplung

   - R_{fe}: Ohmscher Widerstand zur Darstellung von Hysterese- und Wirbelstromverlusten im Eisenkern

2. Vereinfachungen:

   - nichtlinearer Zusammenhang von θ_0 und Φ_h wird nicht berücksichtigt

   - Frequenz- und Induktionsabhängigkeit der Eisenverluste sind nicht berücksichtigt

   - galvanische Trennung von Primär- und Sekundärkreis wird aufgehoben

Solche Vereinfachungen schränken meist die Allgemeingültigkeit einer Ersatzschaltung ein.

Hier: Gültigkeit nur für feste Werte für Frequenz und Induktion (Spannung). Klemmen 2 und 4 auf gleichem Potential!

Wichtig: Eine Ersatzschaltung ist eine analoge Abbildung der physikalischen Vorgänge des Originals. Deshalb sind im allgemeinen unterschiedliche Ersatzschaltungen gleichen Inhalts möglich.
So gibt es auch unterschiedliche Ersatzschaltungen zur Darstellung der Transformatorgleichungen. Die beiden wichtigsten sind das energietechnische (Wirkungsgrad → 1, s. Bild 3.5) und das nachrichtentechnische (Informationsverlust → 0, es werden alle Frequenzen übertragen, s. Bild 3.6) Ersatzschaltbild.

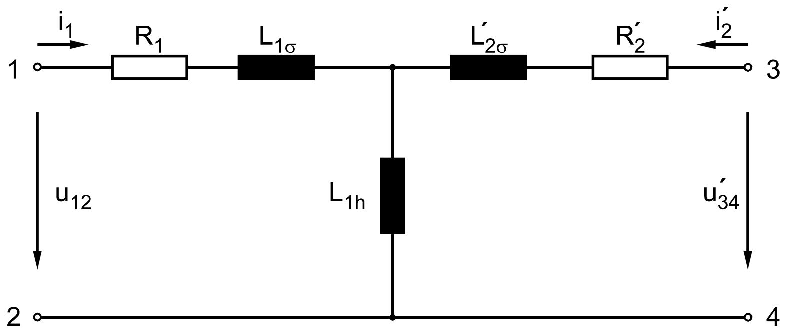


Bild 3.5: Das energietechnische Ersatzschaltbild

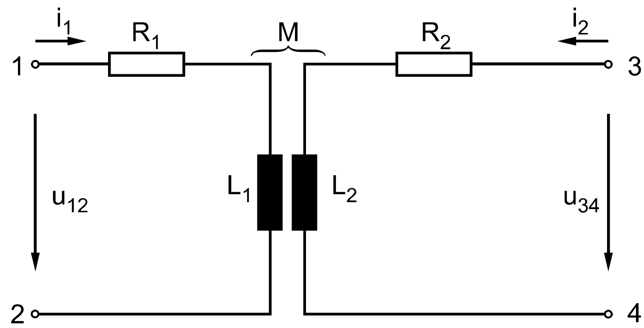


Bild 3.6: Das nachrichtentechnische Ersatzschaltbild

Wirkungsgrad

Im Transformator treten bei Belastung zwei Gruppen von Verlusten auf, die Eisen- und die Wicklungsverluste. Sie werden durch den Leerlauf- und Kurzschlußversuch ermittelt.

Der Wirkungsgrad errechnet sich aus dem Verhältnis der an den Verbraucher abgegebenen Wirkleistung P_{ab} zu der aus dem Netz aufgenommenen Wirkleistung P_{zu}.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \cdot 100\% \qquad oder \qquad \eta = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + V_{ges}} \tag{3.(12)}$$

mit V_{ges} als Gesamtverlusten.

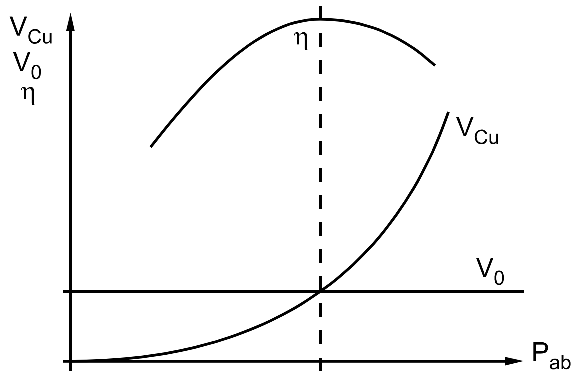


Bild 3.7: Leerlauf und Lastverluste

Die Eisenverluste werden durch den Leerlaufversuch ermittelt. Unter zulässiger Vernachlässigung des Spannungsabfalles an R_1 und $X_{1\sigma}$ liegt im ESB am Eisenverlustwiderstand die Spannung $\underline{U}_{12}$. Die Eisenverluste V_0 sind bei fest vorgegebener Netzspannung und -frequenz konstant.

$$V_0 = \frac{U_{12}^2}{R_{Fe}} \tag{3.(13)}$$

Die Wicklungsverluste V_{Cu} werden, unter zulässiger Vernachlässigung der Eisenverluste, durch den Kurzschlußversuch bestimmt. Beim Kurzschlußversuch wird die Klemmenspannung so eingestellt, daß der Kurzschlußstrom gleich dem Nennstrom ist.

$$P_K = I_K^2 \cdot R_K = I_K^2 \cdot (R_1 + R'_2) \tag{3.(14)}$$

Durch den Kurzschlußversuch können R_1 und R_2' bestimmt werden, aus denen wiederum die Wicklungsverluste V_{Cu} bei einem beliebigen Strom ermittelt werden können.

Sind die Wicklungsverluste V_{CuN} bei Nennstrom I_N bekannt, so läßt sich für die Verluste bei einem beliebigen Laststrom I schreiben:

$$V_{ges} = V_0 + V_{CuN} \cdot \left(\frac{I}{I_N}\right)^2 \qquad \textbf{(3.(15)}$$

Führt man noch den Leistungsfaktor $a = \frac{I}{I_N}$ ein, ergibt sich für den Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{ab} + V_{ges}} = a \cdot \frac{P_{SN} \cdot \cos\varphi}{a \cdot P_{SN} \cdot \cos\varphi + V_{CuN} \cdot a^2 + V_0} \qquad \textbf{(3.(16)}$$

P_{SN} = Nennscheinleistung, $\cos\varphi$ = Leistungsfaktor

Der Wirkungsgrad erreicht sein Maximum beim Lastfaktor $a = \sqrt{\frac{P_0}{P_K}}$, also dann, wenn die stromunabhängigen gleich den stromabhängigen Verlusten sind. Je nach Einsatzfall und Verlustbewertung wird die Optimierung für jeden größeren Transformator individuell vorgenommen.

3.1.3 Parallelschaltung von Transformatoren

Verbraucher können über parallelgeschaltete Transformatoren gespeist werden. (Verbraucher kann z.B. auch ein Netz sein.)

Damit durch die Parallelschaltung keine Ausgleichsströme fließen, die die übertragbare Leistung vermindern, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Im Leerlauf gleiche Sekundärspannungen, d.h. gleiches Leerlaufübersetzungsverhältnis

$$\ddot{u}^{(1)} = \ddot{u}^{(2)} \qquad \textbf{(3.(17)}$$

2. Bei Belastung Stromverteilung entsprechend der Nennleistung beider Transformatoren

$$\frac{I_1^{(1)}}{I_{1N}^{(1)}} = \frac{I_1^{(2)}}{I_{1N}^{[2]}} \qquad \textbf{(3.(18)}$$

d.h. sollte z.B. bei Transformatoren gleicher Nennleistung

$$R_K^{(1)} = R_K^{(2)} \qquad \begin{aligned} R_K^{(1)} &= R_1^{(1)} + R'^{(1)}_2 \\ R_K^{(2)} &= R_1^{(2)} + R'^{(2)}_2 \end{aligned} \qquad \textbf{(3.(19)}$$

$$X_K^{(1)} = X_K^{(2)} \qquad \begin{aligned} X_K^{(1)} &= X_{1\sigma}^{(1)} + X'^{(1)}_{2\sigma} \\ X_K^{(2)} &= X_{1\sigma}^{(2)} + R'^{(2)}_2 \end{aligned} \qquad \textbf{(3.(20)}$$

sein.
Abweichungen bis zu 10% sind zulässig.

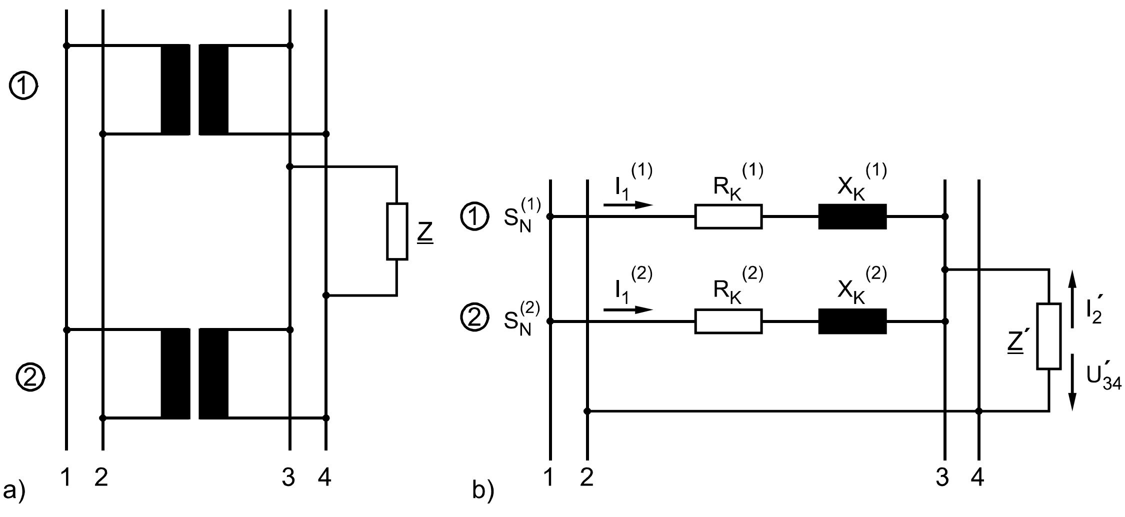


Bild 3.8: Parallelgeschaltete Transformatoren, a) Schaltbild und b) Ersatzschaltbild

3.2 Sonderformen von Transformatoren

3.2.1 Spartransformator

Der Spartransformator ist ein induktiver Spannungsteiler, er kann von beiden Seiten betrieben werden, erlaubt also auch Spannungserhöhung und ist daher ein echter Transformator. Der Spartransformator ist ohne Einschränkungen durch die allgemeinen Ersatzschaltungen für Transformatoren darstellbar.
Die wichtigen Unterschiede gegenüber dem Transformator mit getrennten Wicklungen sind am vereinfachten Ersatzschaltbild des induktiven Spannungsteilers erkennbar (Vernachlässigung der Streuung und Wicklungswiderstände).

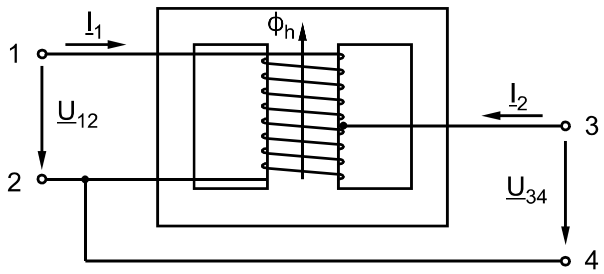


Bild 3.9: Spartransformator

3.2.2 Spannungswandler

Die Aufgabe eines Spannungswandlers ist die Übersetzung hoher Spannungen in kleine, leicht zu handhabende Spannungen für Meßzwecke. Dazu muß die Spannung nach Größe und Phase genau übersetzt werden. Deshalb ist nicht wie sonst üblich die übertragbare Leistung, sondern der Meßfehler entscheidend.
Die Belastung eines Wandlers wird Bürde genannt. Die Bürde ist eine ohmsch-induktive Last, da meist Spulen von Meßgeräten und Relais angeschlosssen sind. (zulässige Werte beachten, sonst Meßfehler)

3.2.3 Stromwandler

Die technische Anwendung des Transformators mit eingeprägtem Strom ist der Stromwandler. Seine Aufgabe ist die Übersetzung von Strömen zu Meß- und Schutzzwecken (vergl. Spannungswandler) sowie die galvanische Trennung von Hauptstromkreis und Meßkreis.
Der Strom muß nach Größe und Phase richtig übersetzt werden; Beurteilungskriterium ist auch hier der Meßfehler.
Da lineare Zusammenhänge gefordert sind, kommt nur eine Betriebsweise in Betracht, die dem sekundärseitigen Kurzschluß nahekommt. Als Bürde sind die Stromspulen von Meßinstrumenten und Relais anzunehmen. (zulässige Werte beachten, sonst Meßfehler)

3.2.4 Übertrager

Während Transformatoren in der Energietechnik hauptsächlich zur Übersetzung von Spannungen und Strömen dienen, werden sie in der Nachrichtentechnik vorzugsweise zur Leistungsanpassung eingesetzt. Sie werden dort Übertrager genannt.
Ein Übertrager ist ein zur Leistungsanpassung eingesetzter Transformator.
Von Anpassung spricht man, wenn ein Verbraucher eine Impedanz hat, die dem konjugiert komplexen Innenwiderstand der Quelle gleich ist. Bei Anpassung nimmt der Verbraucher die maximal mögliche Leistung auf.
Ein komplexer Widerstand $\underline{Z}$ wird durch den Übertrager mit $ü^2 \cdot \underline{Z}$ auf die Primärseite übersetzt. Zur Beschreibung der prinzipiellen Funktionsweise des Übertragers reicht das idealisierte Ersatzschaltbild des Transformators.

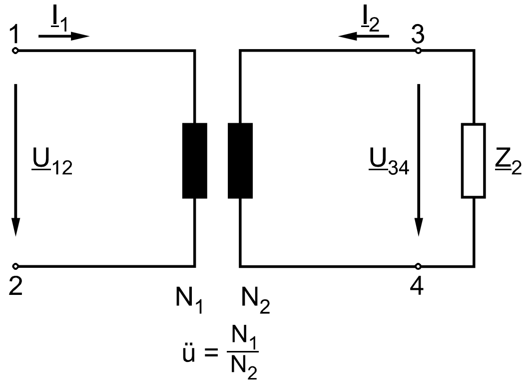


Bild 3.10: Idealisiertes Ersatzschaltbild des Übertragers

3.3 Der Dreiphasentransformator

Ein Dreiphasentransformator kann durch die Zusammenschaltung der Wicklungen von drei gleichen Einphasentransformatoren zu einem Dreiphasensystem realisiert werden. Wenn die Kerne der drei Einphasentransformatoren dabei unverändert bleiben, ergibt sich eine nur elektrisch verkettete Anordnung (Bild 3.11 a; das Wicklungssymbol gilt hier für Primärwicklung, Sekundärwicklung nicht dargestellt, Leerlaufbetrieb).

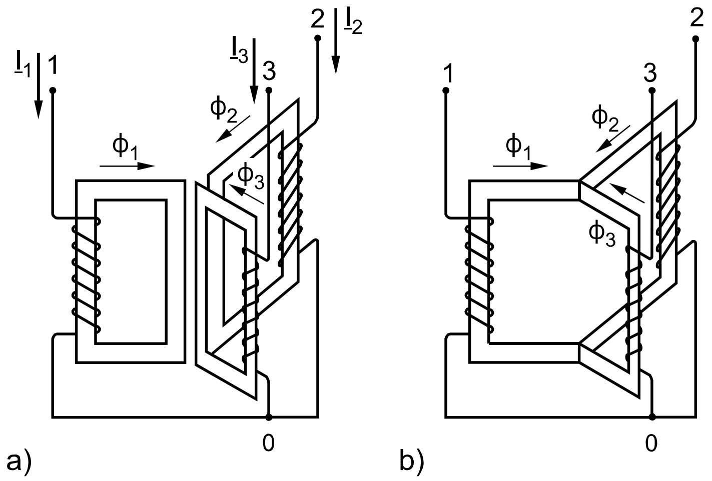


Bild 3.11: Zusammenschaltung von drei Einphasentransformatoren

Im symmetrischen Dreiphasensystem sind die drei Strangspannungen dem Betrage nach gleich. Aufgrund ihrer relativen Phasenlage ist ihre Summe Null.
Die Flüsse sind den Strangspannungen proportional, also ist auch ihre Summe Null. Wegen $\underline{\Phi}_1 + \underline{\Phi}_2 + \underline{\Phi}_3 = 0$ kann der gemeinsame Mittelschenkel entfallen, da dort ohnehin kein Fluß auftritt. Dadurch erhält man eine elektrisch und magnetisch verkettete Anordnung (Bild 3.11, b). Der Aufbau nach Bild 3.11 b heißt "Tempeltransformator". Konstruktiv einfacher ist der "Kerntransformator", bei dem die drei Schenkel in eine Ebene verlegt sind. Da der mittlere Schenkel einen kürzeren magnetischen Weg hat als die beiden äußeren, fließen unterschiedliche Magnetisierungsströme. Dieser Effekt wird zunächst vernachlässigt.

3.3.1 Allgemeine Grundregeln des Drehstromtransformators

Beim elektrisch und magnetisch verketteten Drehstromtransformator werden elektrisches und magnetisches Gleichgewicht erzwungen.

Elektrisches Gleichgewicht bedeutet:

- Die in den einzelnen Wicklungen induzierten Spannungen werden vom speisenden Netz vorgegeben und halten diesem damit das Gleichgewicht.

- Je nach der Schaltung des Transformators wird ein Gleichgewicht der speisenden Ströme erzwungen, z.B. ist in einer Sternschaltung die Summe der Leiterströme = Null (einschließlich eines evtl. vorhandenen Sternpunktleiterstromes).

Magnetisches Gleichgewicht bedeutet:

- Es besteht ein Zwangszustand für die Hauptflüsse, der durch die Konzeption des Transformatorkerns zwingend vorgeschrieben ist.
  Dementsprechend müssen auch die Durchflutungen im Gleichgewicht sein.

Aufgrund des elektrischen und magnetischen Gleichgewichts gelten die folgenden Regeln:

1. Ist die Primärwicklung im Stern geschaltet, so ist die Summe der Leiterströme gleich Null. Im Sonderfall ohne Sternpunktleiter:

   $$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \quad ; \quad \sum \underline{I} = 0 \qquad \textbf{(3.(21)}$$

   Die Summe der Außenleiterspannungen ist Null.

   $$\underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3 = 0 \quad ; \quad \sum \underline{U} = 0 \qquad \textbf{(3.(22)}$$

   (Durch speisendes Netz erzwungenes Gleichgewicht.)
   Im Sonderfall mit Sternpunktleiter ist die Summe der Sternspannungen $\underline{U}_{\mathrm{St}}$ ebenfalls Null.

   $$\underline{U}_{1N} + \underline{U}_{2N} + \underline{U}_{3N} = 0 \quad ; \quad \sum \underline{U}_{St} = 0 \qquad \textbf{(3.(23)}$$

2. Bei Dreieckschaltung der Primärwicklungen ist die Summe aller Leiterspannungen gleich Null.

$$\underline{U}_{RS} + \underline{U}_{ST} + \underline{U}_{TR} = 0 \qquad ; \qquad \sum \underline{U}_L = 0 \qquad \mathbf{3.(24)}$$

(Durch speisendes Netz erzwungenes Gleichgewicht.)

3. Beim Kern- oder Tempeltransformator ist die Summe der Hauptflüsse gleich Null.

$$\underline{\Phi}_1 + \underline{\Phi}_2 + \underline{\Phi}_3 = 0 \qquad ; \qquad \sum \underline{\Phi} = 0 \qquad \mathbf{3.(25)}$$

(Durch Bauart des Kerns erzwungenes Gleichgewicht)

4. Die Summe der auf jedem Schenkel durch die Belastungsströme erzeugten Durchflutungen ist entweder Null oder gleich einer auf allen Schenkeln gleichen resultierenden Durchflutung θ_r. Eine Dreieckwicklung läßt eine resultierende Durchflutung nicht zu. Aus Regel 4 ergibt sich:

5. Die Summe der in jeden Kernfenster von den Belastungsströmen erzeugten Durchflutung ist Null.

$$\sum \underline{\theta} = 0 \qquad \mathbf{3.(26)}$$

Dieser Zusammenhang kann auch folgendermaßen erklärt werden: Durch die vorgegebenen Spannungen der Primärwicklungen ist der magnetische Fluß und damit die magnetische Induktion B in jedem Schenkel begrenzt.

$$u = N_1 \cdot \frac{d\Phi_h}{dt} \qquad \mathbf{3.(27)}$$

Da für Eisen in erster Näherung gilt $\mu_r \rightarrow \infty$, gilt

$$\vec{H}_{Fe} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} = 0 \qquad \mathbf{3.(28)}$$

Mit $\vec{H}_{Fe} = 0$ in jedem Schenkel gilt auch für einen geschlossenen Umlauf im Eisenweg (Kernfenster):

$$\oint \vec{H} d\vec{s} = \theta = 0 \qquad \mathbf{3.(29)}$$

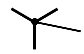
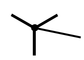
3.3.2 Belastung des Drehstromtransformators

1. Symmetrische Belastung

Bei symmetrischer Belastung ist, vom Magnetisierungsstrom abgesehen, die Art des magnetischen Rückschlusses ohne Einfluß.
Das Verhalten des symmetrisch belasteten Drehstromtransformators kann durch das einphasige Ersatzschaltbild hinreichend beschrieben werden. Eine etwa vorhandene Dreieckwicklung wird dazu mit Hilfe der Dreieck → Sterntransformation in eine äquivalente Sternschaltung umgewandelt.
Auf diese Weise kann z.B. der in jeder Phase auftretende Längsspannungsabfall bei Belastung mit der vereinfachten Ersatzschaltung (R_K, X_K) berechnet werden.

2. Unsymmetrische Belastung

Bevor an Beispielen unsymmetrische Belastungen behandelt werden, sollen zunächst Schaltungen und Darstellungen erläutert werden:

Schaltung		Symbol
Oberspannungswicklung: (Primärwicklung)	Stern	Y
	Stern mit Sternpunktleiter	
	Dreieck (Dreileiternetz)	△
Unterspannungswicklung: (Sekundärwicklung)	Stern	Y
	Stern mit Sternpunktleiter	
	Dreieck	△
	Zickzack (nur mit Sternpunktschaltung)	

Klemmenbezeichnungen (siehe Bild 3.12 und Bild 3.13):
nach DIN 42 500

Oberspannung: Großbuchstaben
U_1, V_1, W_1, U_2, V_2, W_2, N (früher M_P)

Unterspannung: Kleinbuchstaben
u_1, v_1, w_1, u_2, v_2, w_2, n (früher m_P)

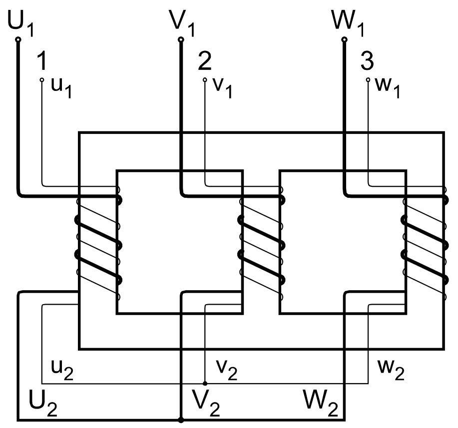


Bild 3.12: Wicklungsanordnung der Stern-Stern-Schaltung

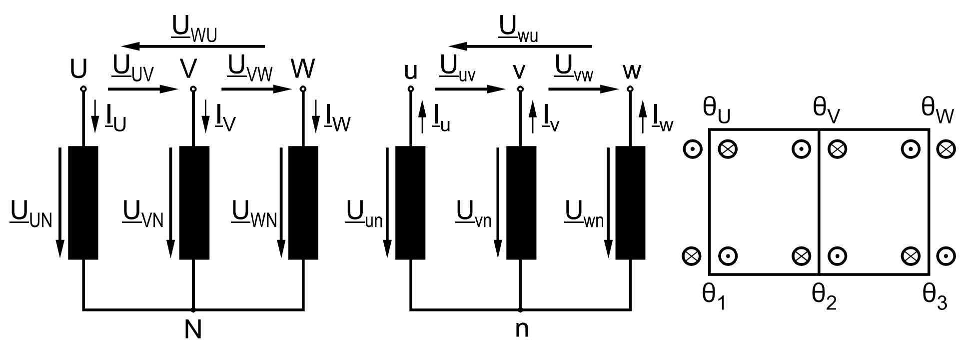


Bild 3.13: Schaltbild der Stern-Stern-Schaltung

Unsymmetrische Belastungsfälle

In den folgenden Beispielen wird die unter- und oberspannungsseitige Stromverteilung unter Berücksichtigung des elektrischen und magnetischen Gleichgewichts bestimmt. Mit der Voraussetzung $N_1 = N_2$ können statt der Durchflutung gleich die Ströme eingetragen werden. Es werden jeweils einphasige Belastungen behandelt.

Fall 1: ⅄⅄

Last zwischen 2 Außenleitern (Bild 3.14)

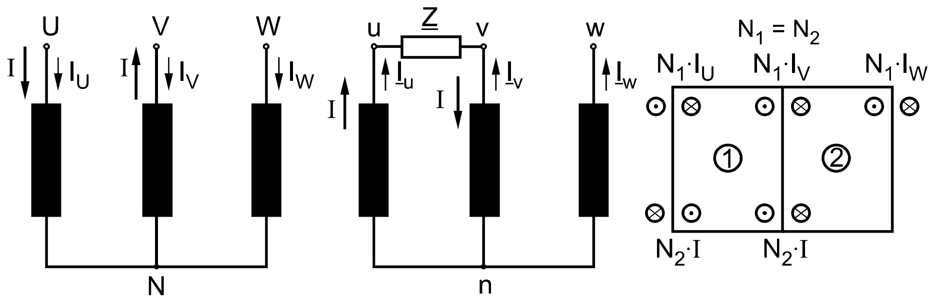


Bild 3.14: Schaltbild zu Fall 1

1. Elektrisches Gleichgewicht der Sekundärseite

$$\underline{I}_u + \underline{I}_v + \underline{I}_w = 0 \quad ; \quad \underline{I} = \frac{\underline{U}_{uv}}{\underline{Z}} \tag{3.(30)}$$

$$\underline{I}_u = +\underline{I} \quad ; \quad \underline{I}_v = -\underline{I} \quad ; \quad \underline{I}_w = 0 \tag{3.(31)}$$

2. Magnetisches Gleichgewicht
   Sekundäre Durchflutungen sind bekannt. Primäre Durchflutungen über Maschengleichungen für magnetische Spannungen bestimmen.

   Fenster 1:

$$N_2\underline{I} - N_1\underline{I}_U + N_1\underline{I}_V + N_2\underline{I} = 0 \tag{3.(32)}$$

   wegen $N_1 = N_2$

$$2 \cdot \underline{I} = \underline{I}_U - \underline{I}_V \tag{3.(33)}$$

   Fenster 2:

$$-N_2\underline{I} - N_1\underline{I}_V + N_1\underline{I}_W = 0 \tag{3.(34)}$$

   wegen $N_1 = N_2$

$$\underline{I} = \underline{I}_W - \underline{I}_V \tag{3.(35)}$$

3. Elektrisches Gleichgewicht der Primärseite

$$\underline{I}_U + \underline{I}_V + \underline{I}_W = 0 \tag{3.(36)}$$

Aus den Gleichungen (3.33) und (3.35) ergibt sich:

$$\underline{I}_U = +\underline{I} \quad ; \quad \underline{I}_V = -\underline{I} \quad ; \quad \underline{I}_W = 0 \tag{3.(37)}$$

Fall 2 Y Y

Stern-Stern mit Sternpunktleiter und einphasiger Last (Bild 3.15)

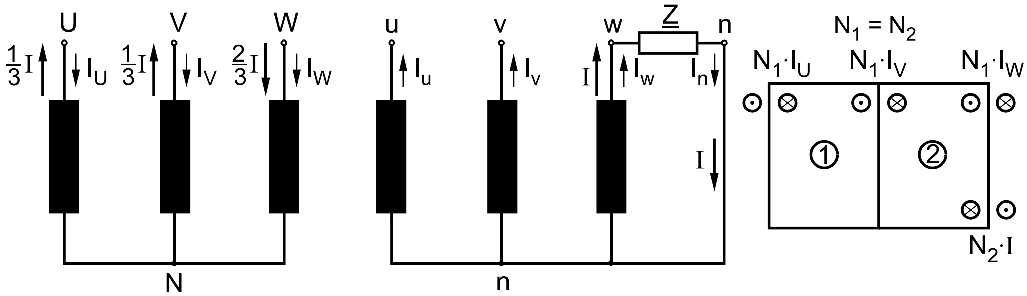


Bild 3.15: Schaltbild zu Fall 2

1. Elektrisches Gleichgewicht der Sekundärseite

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_{w0}}{\underline{Z}} \tag{3.(38)}$$

$$\underline{I}_u = 0 \quad ; \quad \underline{I}_v = 0 \quad ; \quad \underline{I}_w = \underline{I} \quad = \quad \underline{I}_0 = \underline{I} \tag{3.(39)}$$

2. Magnetisches Gleichgewicht ($N_1 = N_2$)
   Fenster 1

$$-\underline{I}_U + \underline{I}_V = 0 \quad \rightarrow \quad \underline{I}_U = \underline{I}_V \tag{3.(40)}$$

   Fenster 2

$$-\underline{I}_V + \underline{I}_W - \underline{I} = 0 \quad ; \quad \underline{I} = \underline{I}_W - \underline{I}_V \tag{3.(41)}$$

3. Elektrisches Gleichgewicht auf der Primärseite

$$\underline{I}_U = -\frac{1}{3}\underline{I} \; ; \quad \underline{I}_V = -\frac{1}{3}\underline{I} \; ; \quad \underline{I}_W = +\frac{2}{3}\underline{I} \; ; \quad \underline{I}_0 = \underline{I} \tag{3.(42)}$$

Konsequenzen dieser Lösung:

Auf jedem Schenkel verbleibt eine resultierende Durchflutung von $-\frac{1}{3} N_2 \cdot I$. Diese in allen 3 Schenkeln nach Betrag und Phase gleiche Durchflutung erzeugt Flüsse, die sich allerdings im Eisenkern nicht schließen können (magnetische Sternschaltung).
Die Flüsse schließen sich über die Luft bzw. Konstruktionsteile (z.B. Transformatorkessel).
Wegen des hohen magnetischen Widerstandes dieses Flußweges bleiben diese Flüsse klein.

Auswirkungen dieses Stromflusses:

- In den vom Fluß durchsetzten metallischen Konstruktionsteilen entstehen Hysterese- und Wirbelstromverluste → Zusatzverluste.

- In den Wicklungen entstehen durch diese zusätzlichen Flüsse zusätzliche Spannungen, die in allen 3 Strängen gleiche Phasenlage haben (abhängig von der Phasenlage des einphasigen Belastungsstromes $\underline{I}$). Diese Spannungsänderung bewirkt nun auch eine Änderung des Stromes $\underline{I}$. (Bild 3.16)

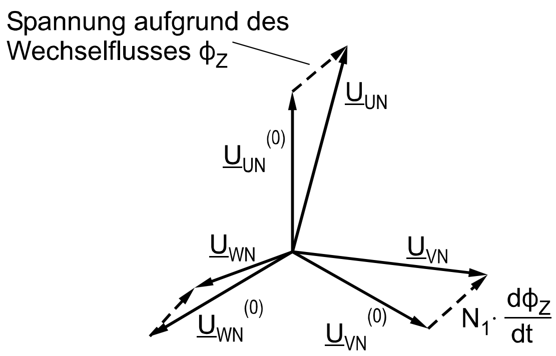


Bild 3.16: Spannungen der Primärwicklungen bei Luftfluß (Wechselfluß Φ_z)

Durch die Nullpunktsbelastung entstehen Zusatzverluste und Spannungsverlagerung. Üblicherweise wird deshalb der Strom des Nullpunktleiters auf 10 % des Nennstromes begrenzt.
Bei Mantelkerntransformatoren (5 Schenkel) kann sich der bei Belastung des Nullpunktleiters entstehende Restfluß über die freien Schenkel schließen (magnetischer Kurzschluß). Eine Belastung des Nullpunktleiters ist deshalb nicht gestattet.

Fall 3 △Y

Last zwischen Außenleiter und Sternpunktleiter (Bild 3.17)

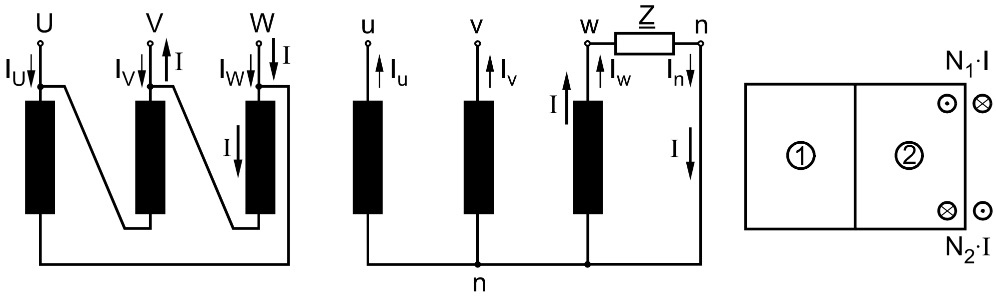


Bild 3.17: Schaltbild zu Fall 3

1. Elektrisches Gleichgewicht der Sekundärseite

$$\underline{I}_u = 0\ ;\quad \underline{I}_v = 0\ ;\quad \underline{I}_w = \frac{\underline{U}_{w0}}{\underline{Z}} = \underline{I}\ ;\quad \underline{I}_0 = \underline{I} \tag{3.(43)}$$

2. Magnetisches Gleichgewicht ($N_1 = N_2$)

$$\underline{I}_W = \underline{I} \quad ; \quad \underline{I}_V = -\underline{I} \quad ; \quad \underline{I}_U = 0 \tag{3.(44)}$$

Die Dreieckwicklung gestattet volle Nullpunktsbelastbarkeit auf der Sekundärseite. Diesen Vorzug der Dreieckschaltung kann man auch nutzen, wenn bei einem Transformator eine zusätzliche Dreieckwicklung als sogenannte Ausgleichswicklung benutzt wird.
Bezeichnung: Dreieckwicklung als Tertiärwicklung, Dreieckausgleichswicklung.

Fall 4

Last zwischen Außenleiter und Sternpunkt (Bild 3.18)

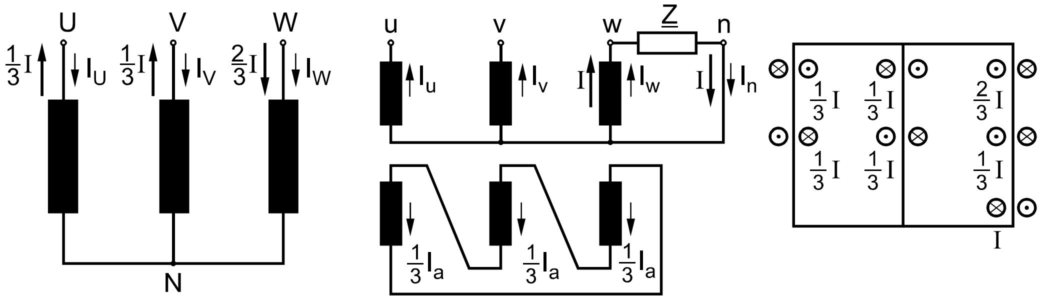


Bild 3.18: Schaltbild zu Fall 4

In den drei Strängen der Tertiärwicklung ist nur ein einheitlicher Strom $\underline{I}_a$ möglich. Die Bestimmung der Ströme erfolgt wie in den vorherigen Beispielen.
Als Ergebnis erhält man:

$$\underline{I}_W = \underline{I}_0 = \underline{I} \qquad \underline{I}_a = \frac{1}{3}\underline{I} \tag{3.(45)}$$

$$\underline{I}_W = \frac{2}{3}\underline{I} \quad ; \quad \underline{I}_U = \underline{I}_V = -\frac{1}{3}\underline{I} \tag{3.(46)}$$

Die Ausgleichswicklung für eine Durchflutung = Null auf allen Schenkeln macht den Transformator voll nullpunktsbelastbar.

Der gleiche Effekt ist mit einer sogenannten Zickzackwicklung zu erzielen. (Bild 3.19)

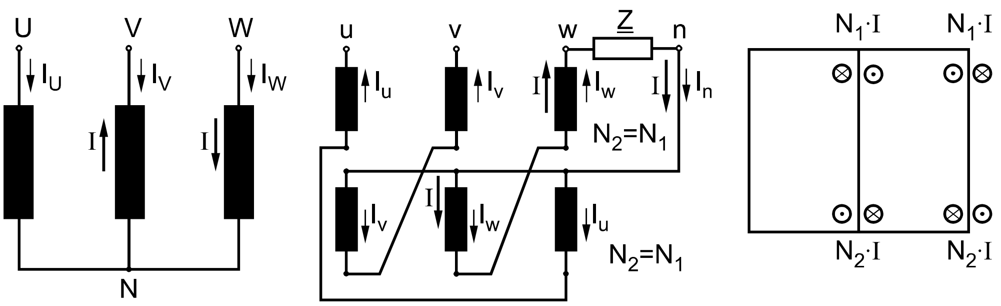


Bild 3.19: Schaltbild eines Drehstromtransformators mit Zickzackwicklung und Last zwischen Außenleiter und Sternpunktleiter

3.3.3 Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren

Durch die Möglichkeit, die einzelnen Wicklungsstränge unterschiedlich zu verbinden, ergibt sich eine Vielzahl verschiedener Drehstromtransformatoren, die durch die "Schaltgruppe" (VDE 0532) gekennzeichnet sind. Hierbei gibt es Symbole für die Schaltung von Primär- (Großbuchstaben) und Sekundärwicklung (Kleinbuchstaben) sowie eine zusätzliche Ziffer, die die relative Lage der Zeiger von primärer und sekundärer Außenleiterspannung angibt, und zwar als Vielfaches von 30°.

Beispiele

Y y 0: Stern - Stern, Phasenverschiebung $0 \cdot 30° = 0°$
D y 5: Dreieck - Stern, Phasenverschiebung $5 \cdot 30° = 150°$

Die verschiedenen Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren sind in Bild 3.20 zusammengestellt. Die bevorzugten Schaltgruppen sind unterstrichen.

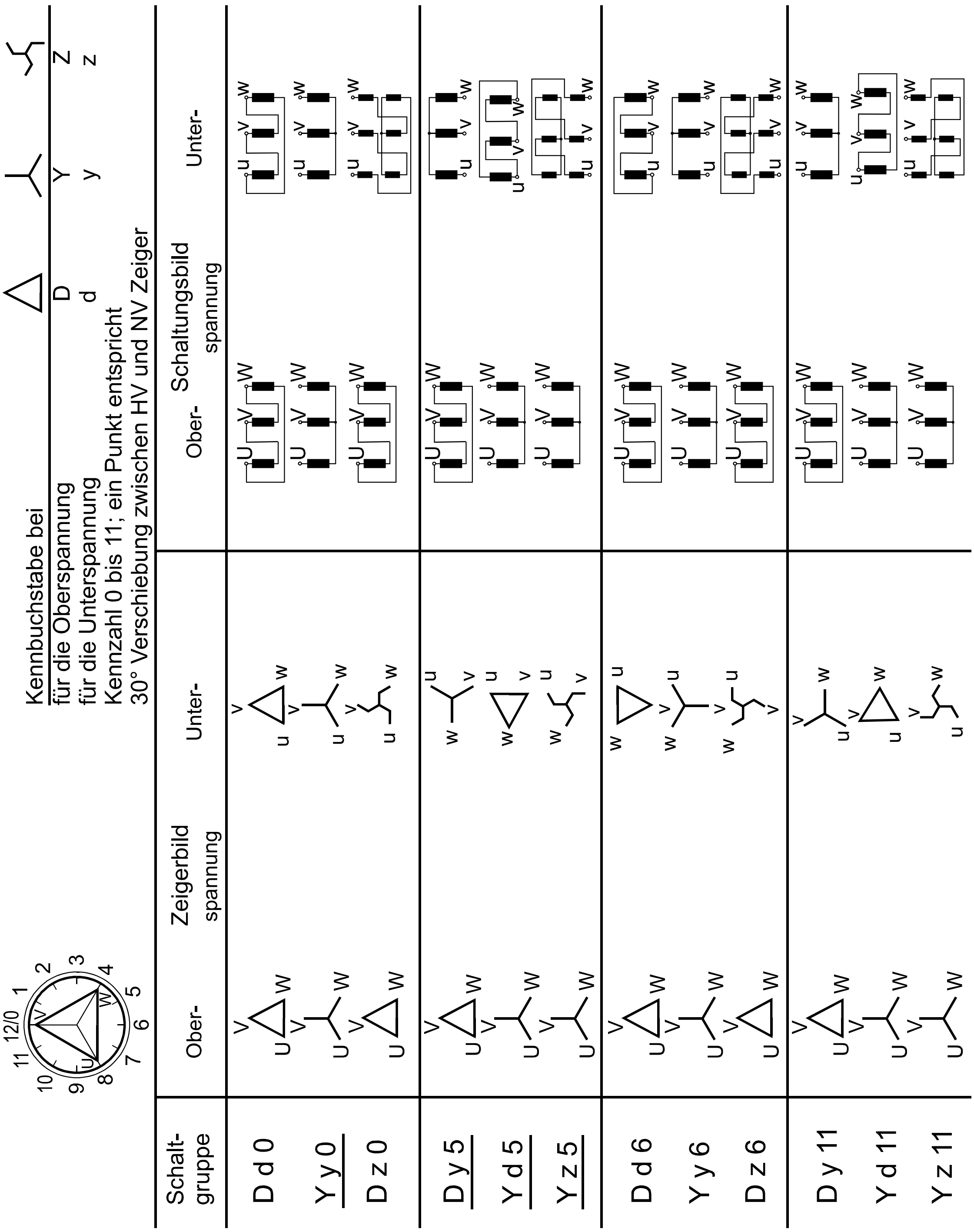


Bild 3.20: Schaltgruppen von Drehstromtransformatoren

S8803 Elektrische Energietechnik