

5. Transformator

Der Transformator ist ein ruhender elektrischer Energiewandler. Elektrische Energie wird fast ausschließlich als Drehstrom mit einer Systemspannung von 10...30 kV erzeugt und über weite Entfernungen bei Spannungen von 380 kV transportiert. Zwischen der häufigsten Verbraucher-Nennspannung von 400 V/230 V und der Hochspannung von 380 kV gibt es weitere Spannungsebenen für Verteilernetze. Der Energieaustausch zwischen diesen Netzebenen verschiedener Spannung geschieht über Transformatoren.

Weitere Aufgaben für Transformatoren sind:

- Änderung der Strangzahl und/oder Phasenlage der Ausgangsspannungen
- Potenzialtrennung,
- Anpassung zwischen Verbraucher und Spannungsquelle.

5.1. Aufbau des Leistungstransformators

Die Wirkungsweise des Transformators beruht auf elektromagnetischen Erscheinungen, die sich zwischen zwei oder mehreren über ein Magnetfeld gekoppelten Leiterschleifen ergeben.

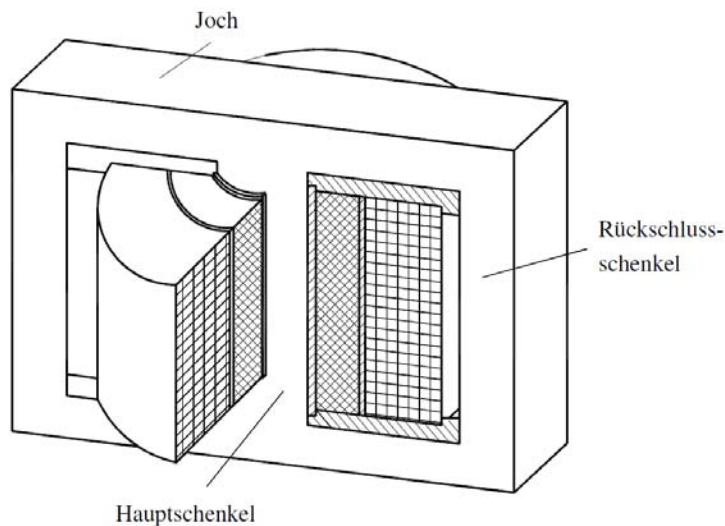


Bild 5 - 1: Manteltransformator

Beim technischen Leistungstransformator umfassen die als Wicklungen ausgeführten Leiterschleifen einen gemeinsamen Eisenkern. Werden der Eisenkern und die Wicklungen von Eisenwegen umfasst, die den Eisenkern zu einem geschlossenen Eisenpfad für den Magnetfluss ergänzen, spricht man von einem Manteltransformator (Bild 5 - 1). Den von der Wicklung umfassten Teil des Eisenkerns nennt man Hauptschenkel oder einfach Schenkel,

die zu ihm parallel verlaufenden äußeren Teile des Eisenwegs heißen Rückschlussschenkel. Die Teile des Eisenkerns, die die Schenkel verbinden, heißen Joche.

Verbindet man zwei Hauptschenkel mit entgegengesetzt gleichen Magnetflüssen durch Joche, werden keine Rückschlussschenkel benötigt. Transformatoren dieser Bauart nennt man Kerntransformatoren (Bild 5 - 2).

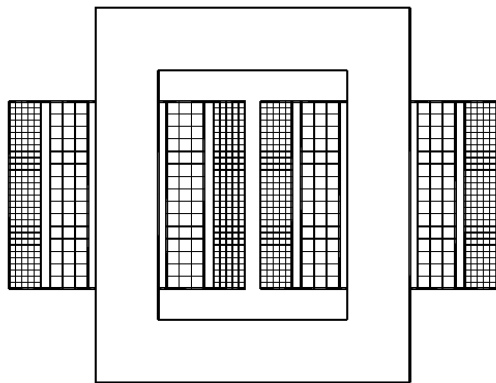


Bild 5 - 2: Kerntransformator

Drehstromtransformatoren bestehen meist aus Kernen mit drei oder fünf Schenkeln, seltener aus drei einzelnen Kernen mit je vier Schenkeln (Bild 5 - 3). Die Dreiphasen-Fünfschenkel und die Einphasen-Vierschenkel-Ausführung kommen in der Regel nur bei sehr großen Transformatoren zum Einsatz.

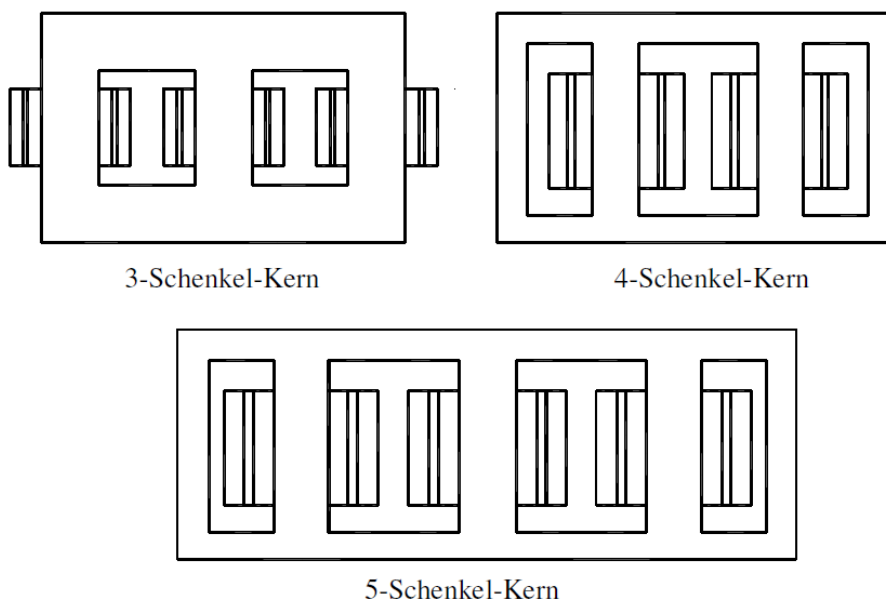


Bild 5 - 3: Drei-, Vier- und Fünfschenkel-Kerne von Leistungstransformatoren

Bei Vier- und Fünfschenkel-Kernen kann der Jochquerschnitt kleiner als bei Drei- bzw. Zwei-schenkel-Kernen gewählt werden, weil ein Teil des Flusses über die Rückschlussschenkel

geleitet wird. Die durch die Transportierbarkeit im Bahnprofil begrenzte Bauhöhe von Grenzleistungstransformatoren kann dadurch besser ausgenutzt werden.

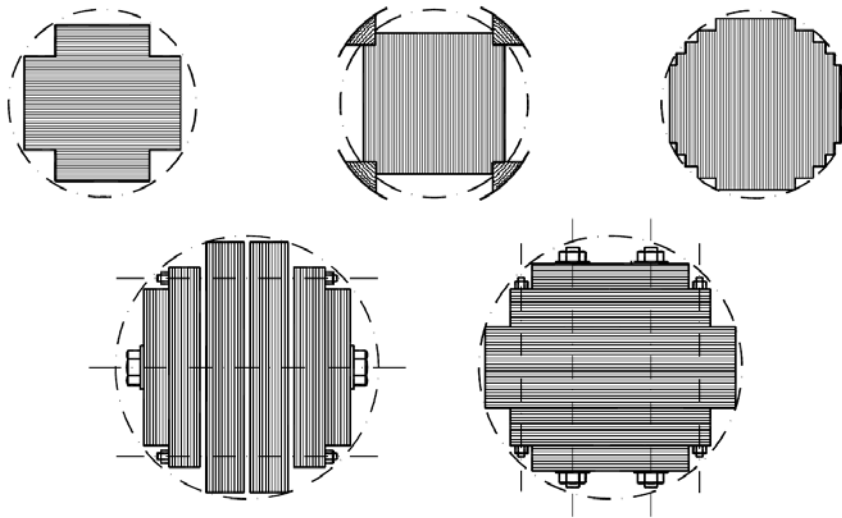


Bild 5 - 4: Kernquerschnitte beim Leistungstransformator

Der Eisenkern wird aus gestanzten, in der Regel 0,35 mm starken Blechen geschichtet (Bild 5 - 4), die durch Oberflächenbehandlung gegeneinander isoliert wurden. Das Blechpaket wird mittels Pressbolzen zusammengehalten. Bei größeren Eisenquerschnitten wird der Kern in einzelne Blechpakete unterteilt, zwischen denen sich vom Kühlmittel durchströmte Schlitz befinden.

Für die beiden Wicklungen eines einzelnen Transformatorschenkels sind folgende Bezeichnungen üblich:

- Ober- und Unterspannungswicklung, bzw.
- Primär- und Sekundärwicklung.

Dabei beziehen sich die zuletzt genannten Bezeichnungen auf die Energieflussrichtung.

Bezüglich der Ausführung von Transformatorwicklungen unterscheidet man zwei Hauptarten: Zylinderwicklungen und Scheibenwicklungen (Bild 5 - 5).

Bei Zylinderwicklungen umgeben Ober- und Unterspannungswicklung einander konzentrisch.

Bei der Scheibenwicklung sind die einzelnen Scheibenspulen abwechselnd auf Ober- und Unterspannungswicklung aufgeteilt; der Abschluss zu den Jochen hin wird immer von zwei Unterspannungs-Halbspulen gebildet. Hochstromwicklungen (für Ofen- oder Elektrolyseanwendungen) werden mitunter aus Hohlprofilen gewickelt, die direkt von Kühlwasser durchflossen werden.

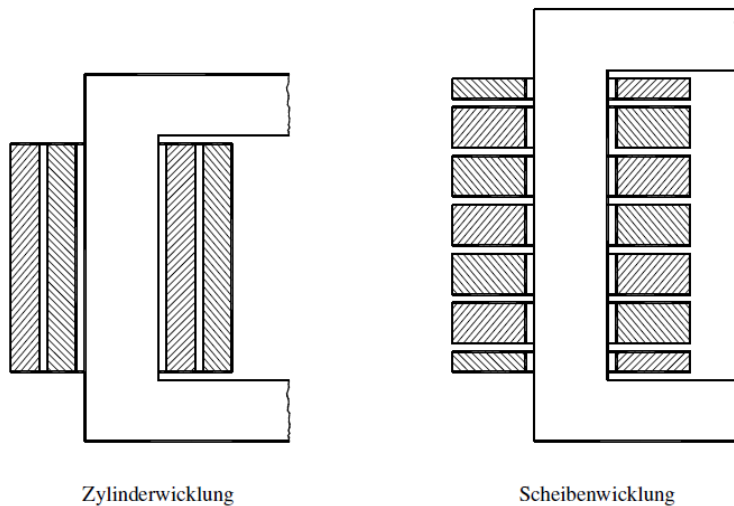


Bild 5 - 5: Zylinder- und Scheibenwicklung

Alle großen Transformatoren werden in ölgefüllte Kessel eingebaut. Das Öl dient einmal als Isoliermittel, das wesentlich höhere Beanspruchungen als Luft zulässt, und zum anderen der Verlustabfuhr aus Wicklungen und Eisenkern. Bei Transformatoren der mittleren Leistungsklasse (bis 100 MVA) ist die Wand des Ölkessels durch Rippen oder Rohre nach Art von Heizungsradiatoren stark vergrößert (Bild 5 - 6), die unter Umständen außerdem durch Lüfter beblasen werden. Die Verlustwärme wird dann direkt an die Umgebungsluft abgeführt.

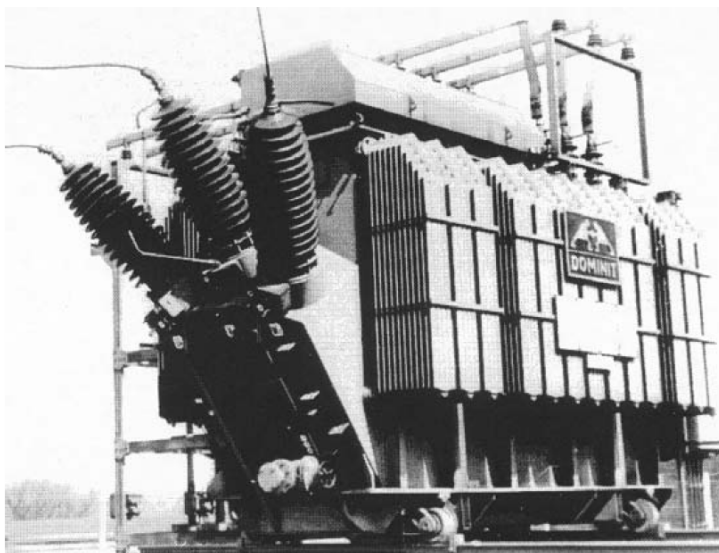


Bild 5 - 6: Öltransformator mit Radiatorkessel

Bei Großtransformatoren (Bild 5 - 7) wird dagegen in einem besonderen Wärmetauscher die Verlustwärme vom Öl auf Kühlwasser übertragen. Da bei Leistungen über 850 MVA der Transport mit der Bahn (in Europa) extrem schwierig bis unmöglich wird, werden Blocktransformatoren für Kraftwerksgeneratoren der Höchstleistungsklasse (1500 MVA) als drei getrennte Einphasentransformatoren ausgeführt (Bild 5 - 8).

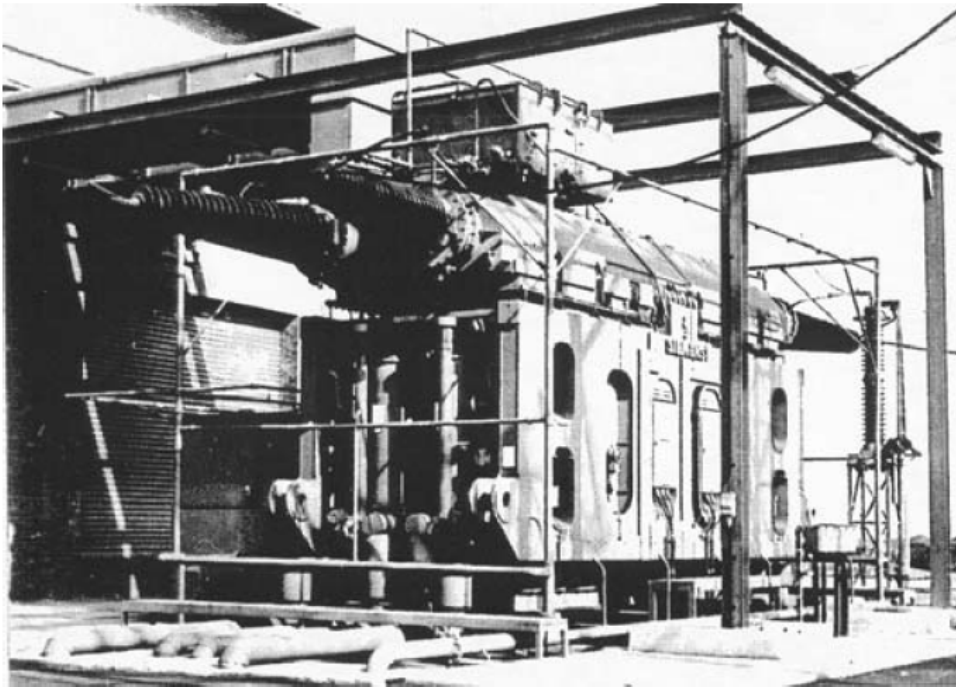


Bild 5 - 7: Grenzleistungstransformator

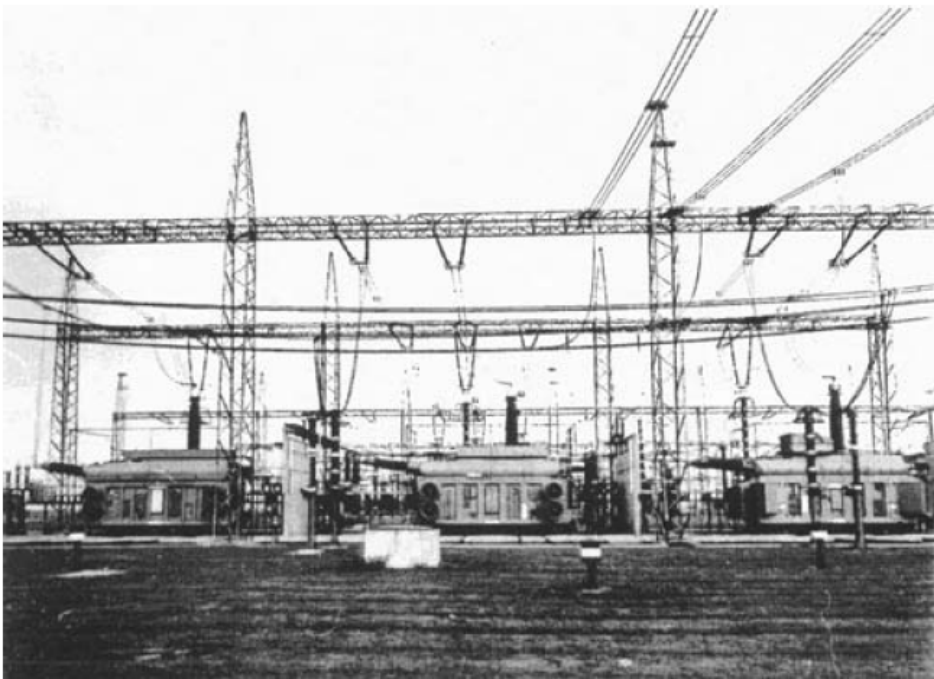


Bild 5 - 8: Transformatorbank von drei Einphasentransformatoren

Kleinere Transformatoren mit Scheinleistungen bis etwa 1,5 MVA werden heute meist als gießharzisierte Trockentransformatoren mit direkter Luftkühlung gebaut (Bild 5 - 9). Durch die Ölfreiheit können sie einfach in Hochhäusern oder in unterirdischen Stationen aufgestellt werden.



Bild 5 - 9: Gießharztrockentransformator (1250 kVA; 10/0,4 kV; Dyn5)

5.2. Magnetfeld des Transformators bei Leerlauf

Wird eine Wicklung eines einphasigen Transformators an eine Wechselspannung angeschlossen, beginnt ein Strom zu fließen. Die Änderung des dadurch erregten Spulenflusses ist genau gleich der angelegten Spannung, wenn man den Spannungsfall des Leerlaufstroms am Wicklungswiderstand vernachlässigt. Es ist im Wesentlichen gleichgültig, ob die äußere oder innere Wicklung mit der Wechselspannungsquelle verbunden wird. Wegen des großen μ_r des Eisenkerns verläuft der Leerlaufstrom fast ausschließlich im Eisen, beide Wicklungen sind mit dem Leerlaufstrom Φ_μ voll verkettet (Bild 5 - 10). Wenn die gespeiste Wicklung mit dem Index 1 bezeichnet wird, gilt die Gleichung:

$$u_1 = i_\mu \cdot R_1 + \dot{\Psi}_{1\mu} = i_\mu \cdot R_1 + w_1 \cdot \dot{\Phi}_\mu$$

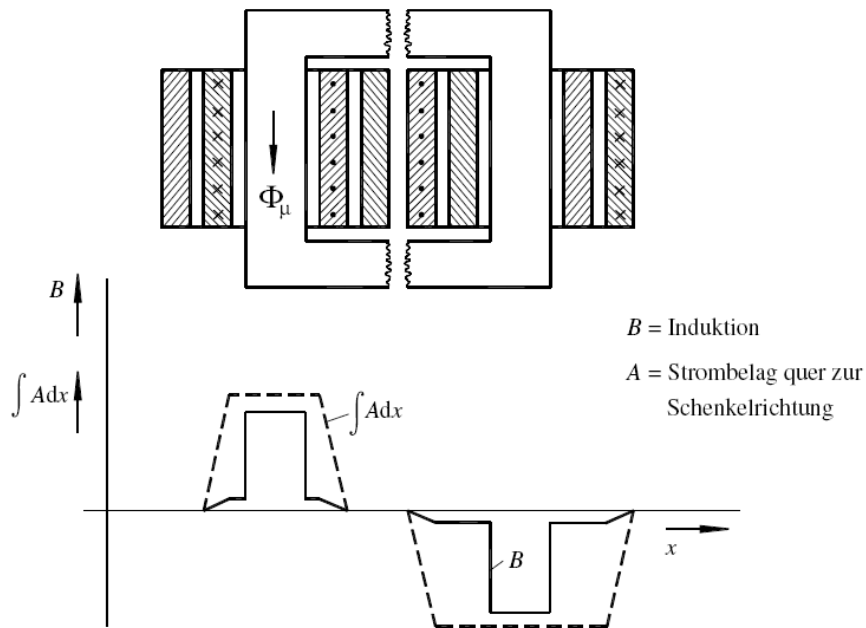


Bild 5 - 10: Transformator im Leerlauf

In der Regel ist der Einfluss des Glieds $i_\mu \cdot R_1$ so klein, dass man aus:

$$\Phi_\mu = \frac{1}{w_1} \cdot \int u_1 \cdot dt$$

den Fluss im Eisenkern ohne merklichen Fehler bestimmen kann. Die folgende Abschätzung soll das verdeutlichen: Rechnet man bei Betrieb mit sinusförmigen Größen mit einem Leerlaufstrom von 10% des Nennstroms und einer Verlustleistung am Widerstand der Primärwicklung bei Nennlast von 1% der Nennleistung, beträgt bei Leerlauf die Spannung am Wicklungswiderstand 10% von $1\% = 1\%$. Der Zeiger des Leerlaufstroms eilt dem Zeiger der speisenden Spannung um praktisch 90° nach, ebenso der Zeiger $\underline{I}_\mu \cdot R_1$. Der Betrag des Zeigers $\underline{\Psi}_1$ stimmt demnach bis auf die Differenz von $0,5 \cdot 10^{-6}$ mit dem Betrag des Zeigers der angelegten Spannung überein. Über die Magnetisierungskurve $B = f(H)$ des verwendeten Eisens kann man aus dem Zeitverlauf der Induktion:

$$B = \frac{\Phi_\mu}{A_{Fe}}$$

den Zeitverlauf des Leerlaufstroms:

$$i_\mu = \frac{H}{w} \cdot L_{Fe}$$

bestimmen, wenn A_{Fe} der magnetisch wirksame Eisenquerschnitt ist (Bild 5 – 11).

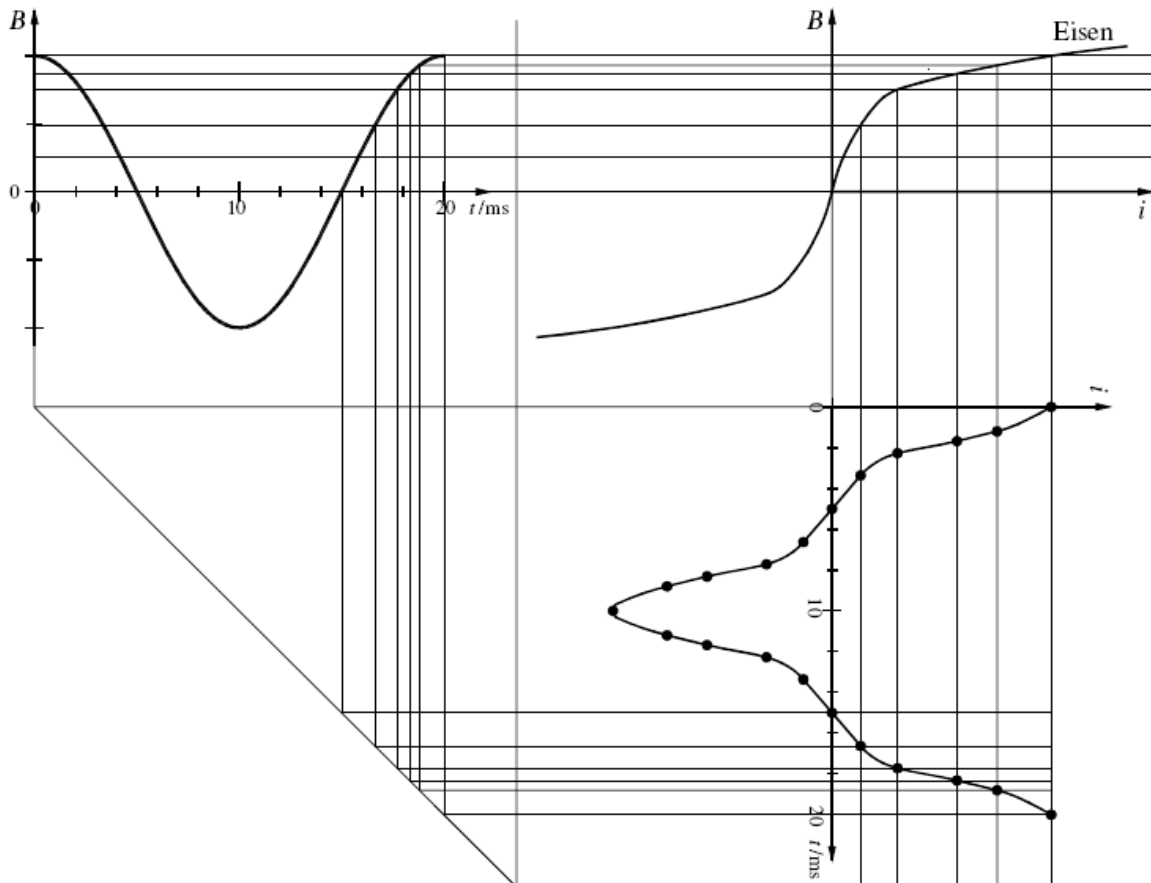


Bild 5 - 11: Bestimmung des Leerlaufstroms eines Transformators

Da beide Wicklungen des Transformators im Leerlauf praktisch vom gleichen Fluss durchsetzt werden, ist das Verhältnis der Spannungen im Leerlauf gleich dem Verhältnis der Windungszahlen:

$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{w_1}{w_2}$$

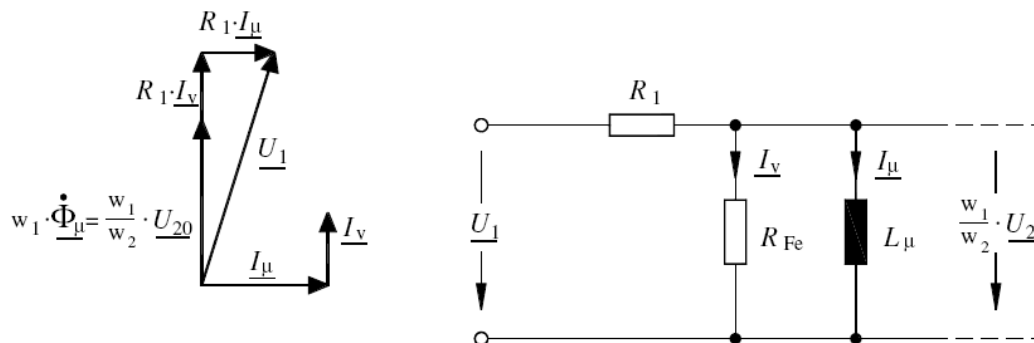


Bild 5 - 12: Zeigerbild und Ersatzschaltbild für den Transformator im Leerlauf

Die Bemessungsübersetzung ist nach nach EN 60076-1, 3.4.4 so zu definieren, dass sie sich immer zu ≥ 1 ergibt:

$$\dot{u} = \left\{ \begin{array}{l} U_1/U_{20}, \text{ wenn } U_1 \geq U_{20} \\ U_{20}/U_1, \text{ wenn } U_{20} \geq U_1 \end{array} \right\}$$

Die sekundäre Leerlaufspannung \underline{U}_{20} , die mit $\underline{\Psi}_\mu$ in Phase ist, eilt gegenüber der Primärspannung \underline{U}_1 geringfügig vor (Bild 5 - 12).

Die Eisenverluste setzen sich aus Hysterese- und aus Wirbelstromverlusten zusammen. Um erstere zu verringern, wird kornorientiertes, kaltgewalztes Trafoblech mit schmaler Hystereseschleife verwendet, das in Walzrichtung sehr geringe spezifische Verluste zeigt (Bild 5.13); sie sind in erster Näherung $\sim f$. Zur Reduzierung der Wirbelstromverluste ($\sim f^2$) wird das Eisen mit Silizium legiert, um den Widerstand zu erhöhen; die Blechdicke ist bei 50 Hz meist 0,35 mm. Der Magnetisierungsstrom (Betrag der Grundschwingung) wird wesentlich von μ_r bestimmt, das ebenfalls durch die Walzrichtung beeinflusst wird. Der tatsächliche Magnetisierungsleistungsbedarf ist aber etwa um den Faktor 10 höher als die dem Bild zu entnehmenden 3 VA/kg, da er weitgehend von den unvermeidlichen Luftspalten in den Stößen der geschichteten Eisenbleche abhängt.

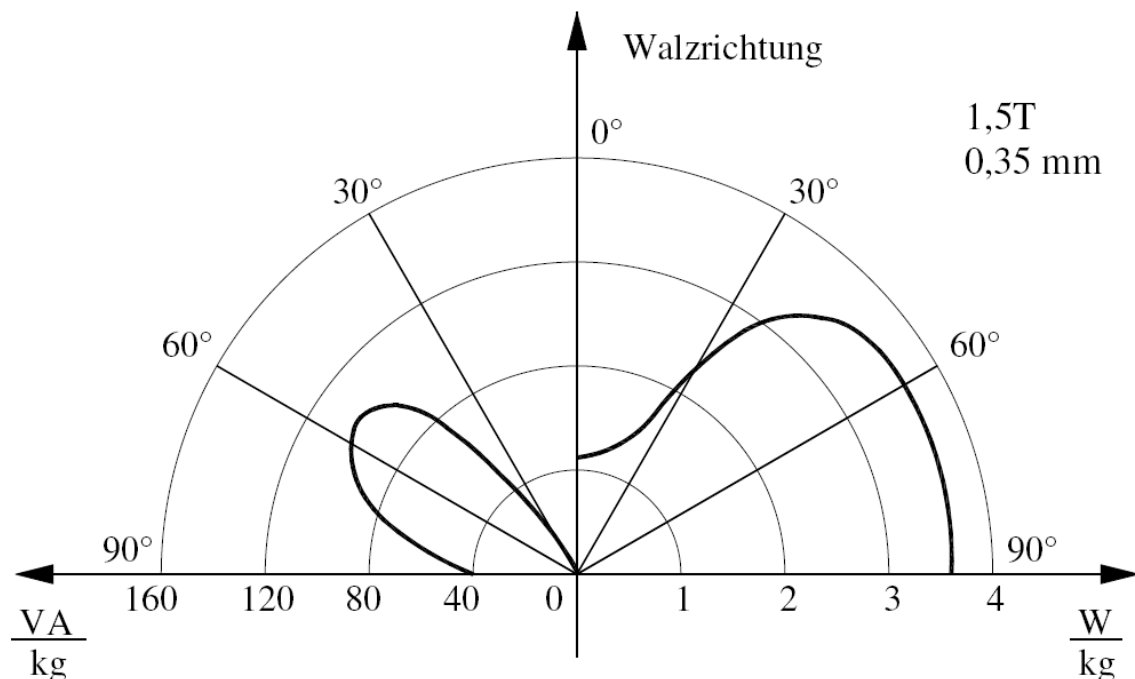


Bild 5 - 13: Verlustziffer V15 (spezifische Eisenverluste, in W/kg, rechts) und spezifischer Magnetisierungsleistungsbedarf (in VA/kg, links) von Trafoblech 0,35 mm bei $f = 50$ Hz und $B = 1,5$ T

Die Verluste hängen bei konstanter Frequenz etwa quadratisch von der Induktion des Kern Eisens ab, damit auch quadratisch von der Spannung \underline{U}_1 . Als Ersatzschaltbild des leerlaufen-

den Transformators wählt man daher zweckmäßigerweise die Parallelschaltung einer Induktivität L_{μ} und eines Verlustwiderstands R_{Fe} . Diese Elemente kann man in guter Näherung mit den im Bild 8.13 angegebenen Kenngrößen berechnen. Aus

$$P_{Fe} = U_1^2 \cdot \frac{1}{R_{Fe}} = m \cdot V_{15} \cdot \left(\frac{B}{1,5 \text{ T}}\right)^2$$

kann man den Wert R_{Fe} leicht bestimmen, wenn m die Masse des aktiven Eisens ist. Ganz entsprechend kann man mit der Kennziffer für die spezifische Magnetisierungsleistung für sinusförmige Induktion bei 50 Hz den Wert für L_{μ} angeben.

5.3. Magnetfeld des Transformators im Kurzschluss, Streuinduktivität

Speist man die Primärwicklung eines Transformators mit einer konstanten Wechselspannung, kann man die Sekundärwicklung als eine mit Innenwiderstand behaftete Spannungsquelle betrachten. Die Leerlaufspannung wurde im vorhergehenden Unterkapitel bestimmt. Zur Ermittlung des Innenwiderstands werden jetzt die Verhältnisse im Transformator betrachtet, wenn die Primärwicklung kurzgeschlossen und in die Sekundärwicklung ein Wechselstrom i_{2K} eingespeist wird (Bild 5 - 14).

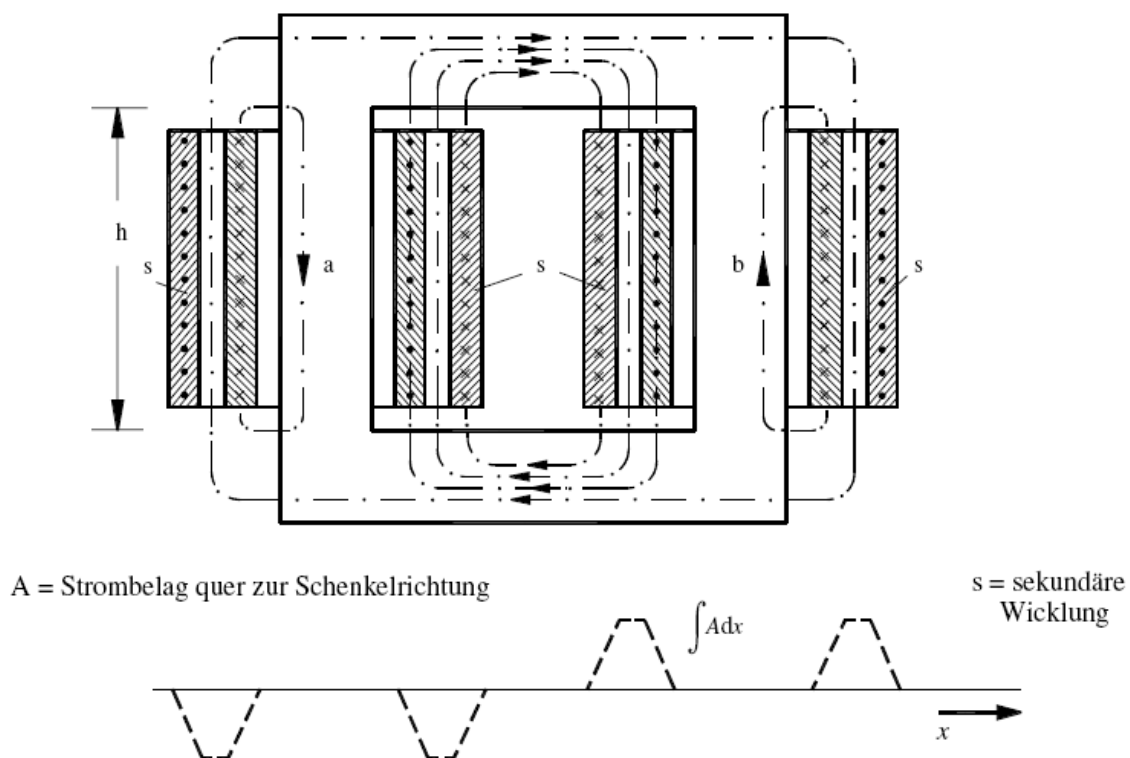


Bild 5 - 14: Transformator mit kurzgeschlossener Primärwicklung

Dazu sollen die Wicklungswiderstände in der Überlegung vernachlässigt werden. Infolge des Kurzschlusses muss der resultierende Spulenfluss Ψ_1 der Primärwicklung gleich null sein, die magnetisierende Wirkung des in Wicklung 2 eingespeisten Stroms muss daher im Wesentlichen durch den Kurzschlussstrom in Wicklung 1 kompensiert werden. Es soll der Einfachheit halber angenommen werden, dass beide Wicklungen die gleiche Windungszahl w aufweisen und dass bei Kurzschluss dann auch die Ströme praktisch gleich groß sind. Bildet man entlang der eingezeichneten magnetischen Kraftlinien das Umlaufintegral $\oint H \cdot ds$ und vernachlässigt die Anteile auf den Wegteilen, die innerhalb des Eisens verlaufen, erhält man längs der Spulen:

$$H_x \cdot 2 \cdot h = 2 \cdot \int_x A \cdot dx$$

wenn A der auf die x -Richtung bezogene Strombelag ist. Für die Induktion auf den Luftwegen erhält man dann:

$$B_x = \frac{\mu_0}{h} \cdot \int_x A \cdot dx$$

$$B_\sigma = \frac{\mu_0}{h} \cdot i_{2K} \cdot w$$

wobei B_σ der über x auftretende Höchstwert der Induktion ist.

Das magnetische Feld der Ströme bei kurzgeschlossener Primärwicklung verläuft im Wesentlichen im Luftspalt zwischen den beiden Wicklungen. Der Anteil, der die Wicklungen selbst durchsetzt, kann jedoch nicht vernachlässigt werden. Das Volumenintegral über das magnetische Feld ergibt den Streufluss; dabei muss aber zusätzlich die unterschiedliche Verkettung der Spulen mit diesem Fluss berücksichtigt werden. Dies wird in der folgenden Betrachtung im Detail gezeigt. Die Streuinduktivität erhält man, wenn man den Streufluss auf den erregenden Strom i_{2K} bezieht.

Wichtig ist die Feststellung, dass die Streuinduktivität nur bei exakt aufeinanderfallenden Primär- und Sekundärwicklungen zu Null würde. Dies ist natürlich nicht möglich, zusätzlich müssen nicht unerhebliche Isolationsabstände gewahrt werden, womit Hochspannungstransformatoren naturgemäß größere Streuinduktivitäten aufweisen als Niederspannungstransformatoren.

Betrachtet man den Spulenfluss der Wicklung 1 genauer, stellt man fest: Der vom Wicklungskupfer erfüllte Hohlzylinder mit der Dicke a_1 wird von einem Fluss:

$$\Phi_1 = \frac{1}{2} \cdot a_1 \cdot D_1 \cdot \pi \cdot B_\sigma$$

durchsetzt, wenn B_σ der Maximalwert der trapezförmig über x verlaufenden Induktion ist.

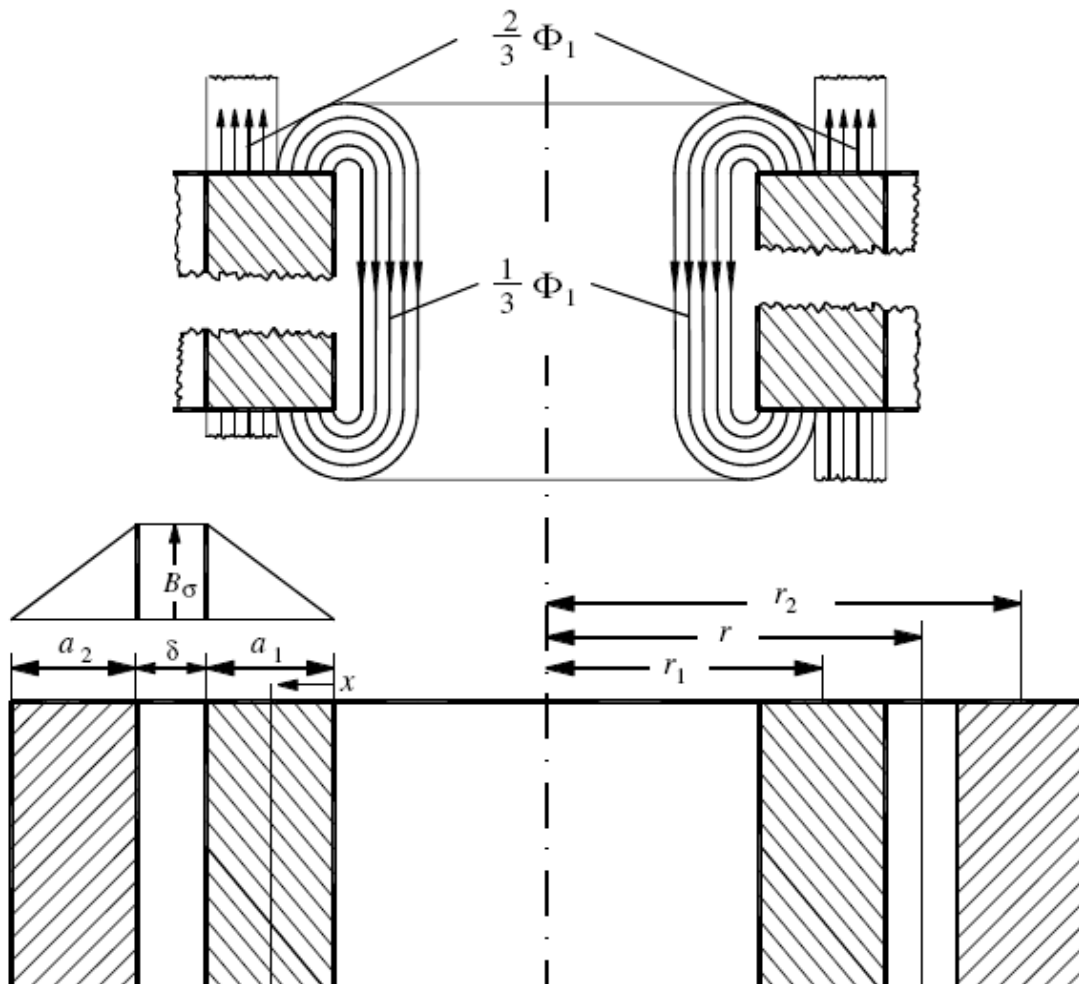


Bild 5 - 15: Berechnung des Streuflusses eines Transformators

Eine Flussröhre, die durch das Innenloch der Spule 1 führt, ist mit allen w Windungen voll verkettet, eine, die außen an der Spule vorbeiführt, ist mit ihr nicht verkettet. Im Raum der Wicklung selbst nimmt die Verkettung von innen nach außen proportional mit x ab. Eine Flussröhre mit kreisringförmigem Querschnitt an der Stelle x ist demnach mit $[(a_1 - x) / a_1] w$ Windungen verkettet. Der Teilspulenfluss ist:

$$d\Psi_{lx} = dx \cdot D_1 \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \frac{x}{a_1} \cdot \frac{a_1 - x}{a_1} \cdot w = w \cdot D_1 \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \left(\frac{x}{a_1} - \frac{x^2}{a_1^2} \right) \cdot dx$$

Der Spulenfluss im Raum des Wicklungskupfers ist dann:

$$\begin{aligned}\Psi_{1\text{Cu}} &= \int_0^{a_1} d\Psi_{1x} = w \cdot D_1 \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{x^2}{a_1} - \frac{1}{3} \cdot \frac{x^3}{a_1^2} \right]_0^{a_1} = \\ &= w \cdot D_1 \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \frac{a_1}{6} = \frac{1}{3} \cdot \Phi_1 \cdot w\end{aligned}$$

Da die Wicklung 1 kurzgeschlossen ist, kann sie jedoch keinen resultierenden Spulenfluss Ψ_1 umfassen, infolgedessen muss von dem Fluss, der die Wicklung von unten nach oben durchsetzt, ein Teil in umgekehrter Richtung durch das Innenloch zurückfließen. Dieser Teil ist:

$$\Phi_{1i} = \frac{1}{w} \cdot \Psi_{1x} = \frac{1}{3} \cdot \Phi_1$$

Der übrige Teil von der Größe:

$$\Phi_1 - \Phi_{1i} = \frac{2}{3} \cdot \Phi_1$$

muss sich außerhalb beider Spulen schließen.

Der im Raum der Spule 1 vorhandene Fluss ist voll mit allen Windungen der Spule 2 verkettet, man erhält:

$$\Psi_{21} = w \cdot \Phi_1 - w \cdot \Phi_{1i} = w \cdot \frac{2}{3} \cdot \Phi_1 = w \cdot D_1 \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \frac{a_1}{3}$$

Der Fluss im Luftspalt mit der Breite δ ist ebenfalls voll mit allen Windungen der Spule 2 verkettet:

$$\Psi_{2\delta} = w \cdot \Phi_\delta = w \cdot D_\delta \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \delta$$

Innerhalb des vom Wickelkupfer erfüllten Raums der Spule 2 nimmt von innen nach außen sowohl die Flussdichte als auch die Verkettung linear ab, der Spulenfluss berechnet sich deshalb in diesem Raum wie folgt:

$$\begin{aligned}d\Psi_{2x} &= dx \cdot D_2 \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \frac{x}{a_2} \cdot \frac{x}{a_2} \cdot w = w \cdot D_2 \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \frac{x^2}{a_2^2} \cdot dx \\ \Psi_{2\text{Cu}} &= \int_0^{a_2} d\Psi_{2x} = w \cdot D_2 \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{x^3}{a_2^2} \right]_0^{a_2} = w \cdot D_2 \cdot \pi \cdot B_\sigma \cdot \frac{a_2}{3}\end{aligned}$$

Der gesamte Spulenfluss der Wicklung 2, der durch den in diese Wicklung eingespeisten Strom und den entgegengesetzt wirkenden der kurzgeschlossenen Wicklung 1 erregt wird, ist:

$$\Psi_{\sigma} = \Psi_{21} + \Psi_{2\delta} + \Psi_{2Cu} = w \cdot \pi \cdot B_{\sigma} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot (D_1 \cdot a_1 + D_2 \cdot a_2) + D_{\delta} \cdot \delta \right]$$

Mit $D_1 \approx D_2 \approx D_{\delta} \approx D$ erhält man:

$$\Psi_{\sigma} = w \cdot \pi \cdot B_{\sigma} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot (a_1 + a_2) + \delta \right] \cdot D$$

$$\Psi_{\sigma} = \mu_0 \cdot w^2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{h} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot (a_1 + a_2) + \delta \right] \cdot i_{2K}$$

Hieraus erhält man für das Ersatzschaltbild:

$$L_{\sigma} = \frac{\Psi_{\sigma}}{i_{2K}} = \mu_0 \cdot w^2 \cdot \pi \cdot \frac{D}{h} \cdot \left[\frac{1}{3} \cdot (a_1 + a_2) + \delta \right]$$

Nach dieser Formel lässt sich L_{σ} schon vor dem Bau eines Transformators berechnen. Rechnet man die Verhältnisse für den Fall durch, dass die außenliegende Sekundärwicklung kurzgeschlossen und die innenliegende Primärwicklung gespeist wird, erhält man für den Streufluss und damit, bezogen auf die gleiche Windungszahl, auch die gleiche Kurzschlussreaktanz. Es gibt keinerlei physikalisch begründbare Aufteilung des Streufelds auf die Primär- oder die Sekundärwicklung. Dieses Feld wird durch Gegenerrregung beider Wicklungen mit der gleichen Durchflutung erzeugt.

Bei gleicher Windungszahl kann man beide Wicklungen durch Reihenschaltung zu einer einzigen Wicklung vereinen. Wenn die Hauptinduktivität L_{μ} aus dem Leerlaufersatzschaltbild allerdings den Fluss im Eisenkern repräsentieren soll, ist eine Aufteilung der Streureaktanz in einen Teil, den man der inneren Wicklung zuordnet und einen Teil, den man der äußeren Wicklung zuordnet, eindeutig möglich. Üblicherweise wird darauf aber verzichtet, und nach Hinzufügung der Wicklungswiderstände erhält man das folgende Ersatzschaltbild 5 - 16:

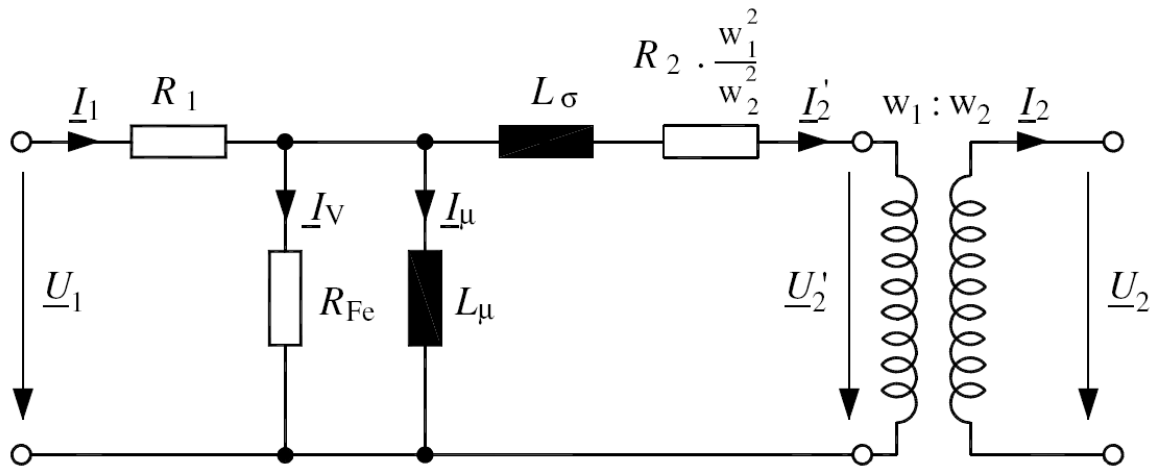


Bild 5 - 16: Ersatzschaltbild des Transformators

In der Praxis sind die Querimpedanzen groß gegenüber den Längsimpedanzen; dann kann man ohne merklichen Fehler das Ersatzschaltbild noch weiter vereinfachen (Bild 5 - 17):

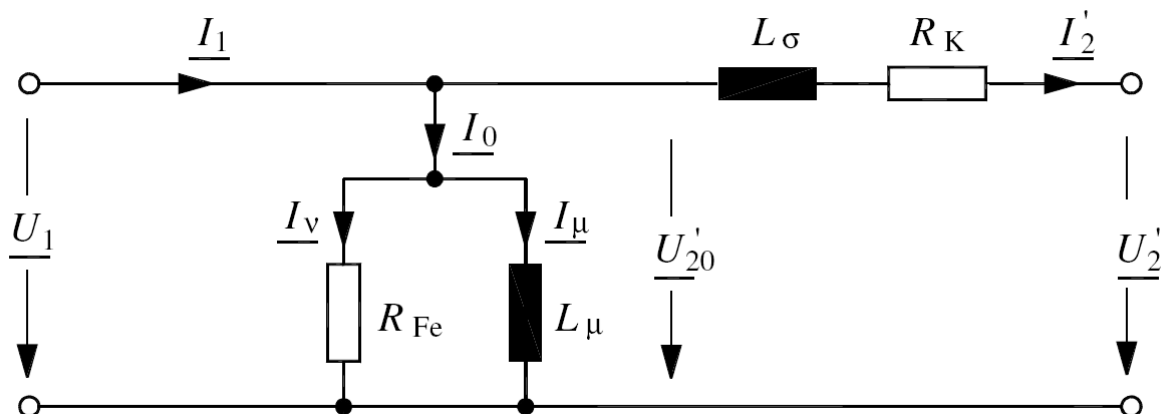


Bild 5 - 17: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Transformators

Die Elemente dieser Ersatzschaltung lassen sich im so genannten Leerlauf- bzw. Kurzschlussversuch mit guter Genauigkeit bestimmen.

Im Kurzschlussversuch speist man z.B. in die außenliegende Wicklung 2 einen Strom in Höhe des Nennstromes I_N dieser Wicklung ein, während die innere Wicklung 1 kurzgeschlossen ist. Gemessen werden der eingespeiste Strom $I_K \approx I_N$, die Spannung U_K , die notwendig ist, den Nennstrom zu treiben, und die Wirkleistung P_K (z. B. mit einem Wattmeter).

Die Elemente des Ersatzschaltbilds berechnen sich dann mit den Formeln:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}; \quad \cos \varphi_K = \frac{P_K}{U_K \cdot I_K}$$

$$R_K = Z_K \cdot \cos \varphi_K; \quad X_K = \omega \cdot L_\sigma = Z_K \cdot \sin \varphi_K$$

Bezieht man die bei Nennstrom auftretende Kurzschlussspannung U_{KN} auf die Leerlauf-Nennspannung U_{20} , erhält man die so genannte relative Kurzschlussspannung u_K , die eine wichtige Kenngröße des Transformators darstellt.

$$u_K = \frac{U_{KN}}{U_{20}}$$

Sie bestimmt die im Kurzschlussfall sich einstellenden Ströme und ist deshalb für Netzfehlerberechnungen von entscheidender Bedeutung; daneben bestimmt sie aber auch die im Betrieb sich einstellenden Spannungsfälle.

5.4. Spannungsänderung des belasteten Transformators

Das Verhalten des Transformators im Betrieb mit konstanten sinusförmigen Strömen und Spannungen ergibt sich in einfacher Weise aus der Ersatzschaltung nach Bild 5 - 17.

Ist die Belastung wie im Inselbetrieb als Impedanz vorgegeben, ist die Kurzschlussimpedanz des Transformators mit der Belastung in Reihe zu schalten. Der Belastungsstrom ergibt sich dann aus der speisenden Spannung durch Division durch die resultierende Impedanz.

Ist der Belastungsstrom wie beim Betrieb im Verbundnetz nach Größe und Phasenlage vorgegeben, erhält man – von U_2' ausgehend – folgendes Zeigerbild 5 - 18:

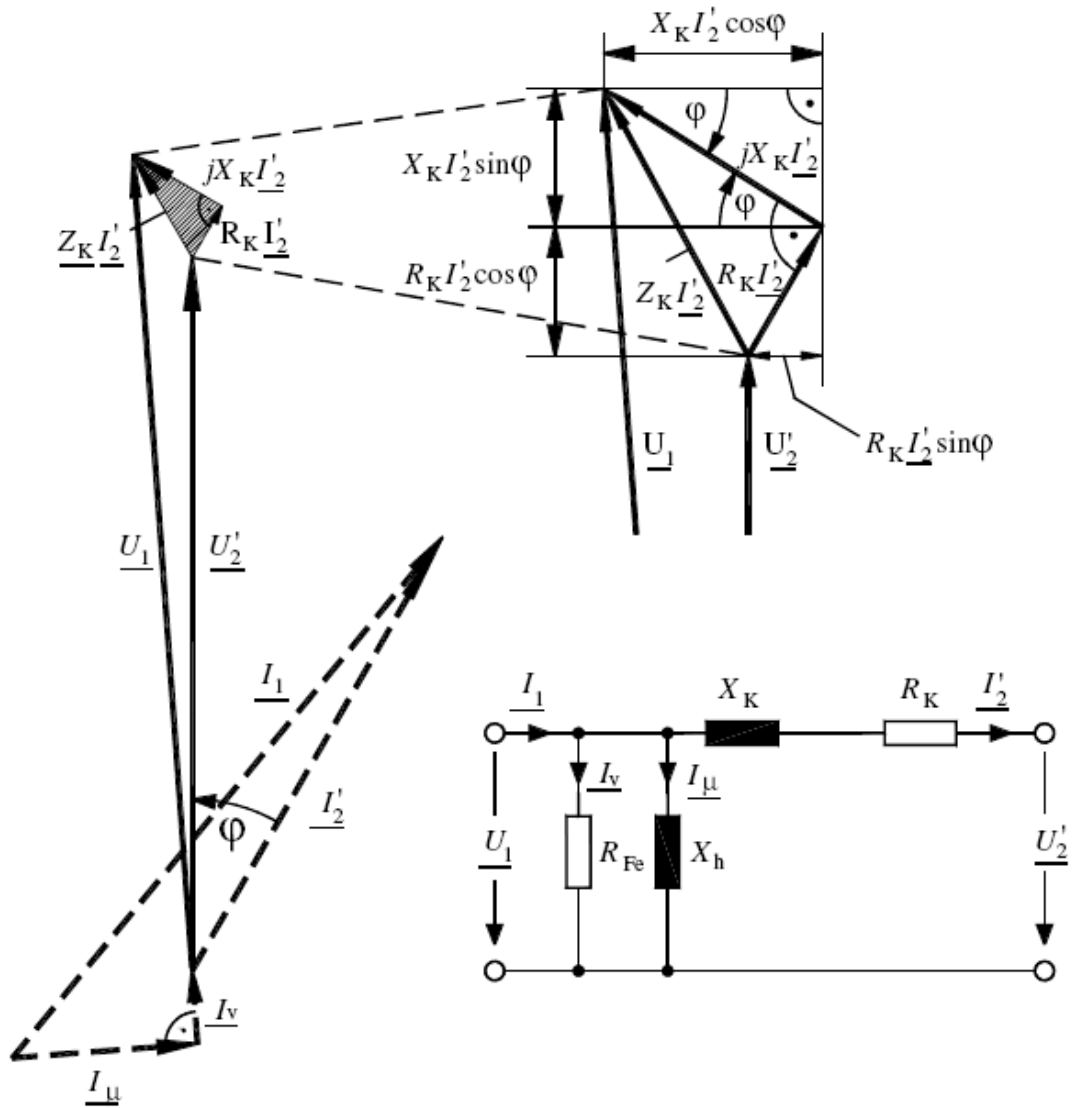


Bild 5 - 18: Zeigerbild des belasteten Transformators

Das schraffierte rechtwinklige Dreieck, dessen Katheten aus dem ohmschen und dem induktiven Spannungsfall des Transformators bestehen, heißt Kapp'sches Dreieck. Seine Form ist bei fester Frequenz konstant, seine Größe ist proportional zum Belastungsstrom und seine Drehungslage ist durch den Phasenwinkel des Belastungsstroms bestimmt.

Man unterteilt üblicherweise den Spannungsfall in zwei Komponenten, den

- Längsspannungsfall ΔU_{\parallel} , der die gleiche Richtung wie der Spannungszeiger der Last hat, und den
- Querspannungsfall ΔU_{\perp} , der dazu senkrecht liegt.

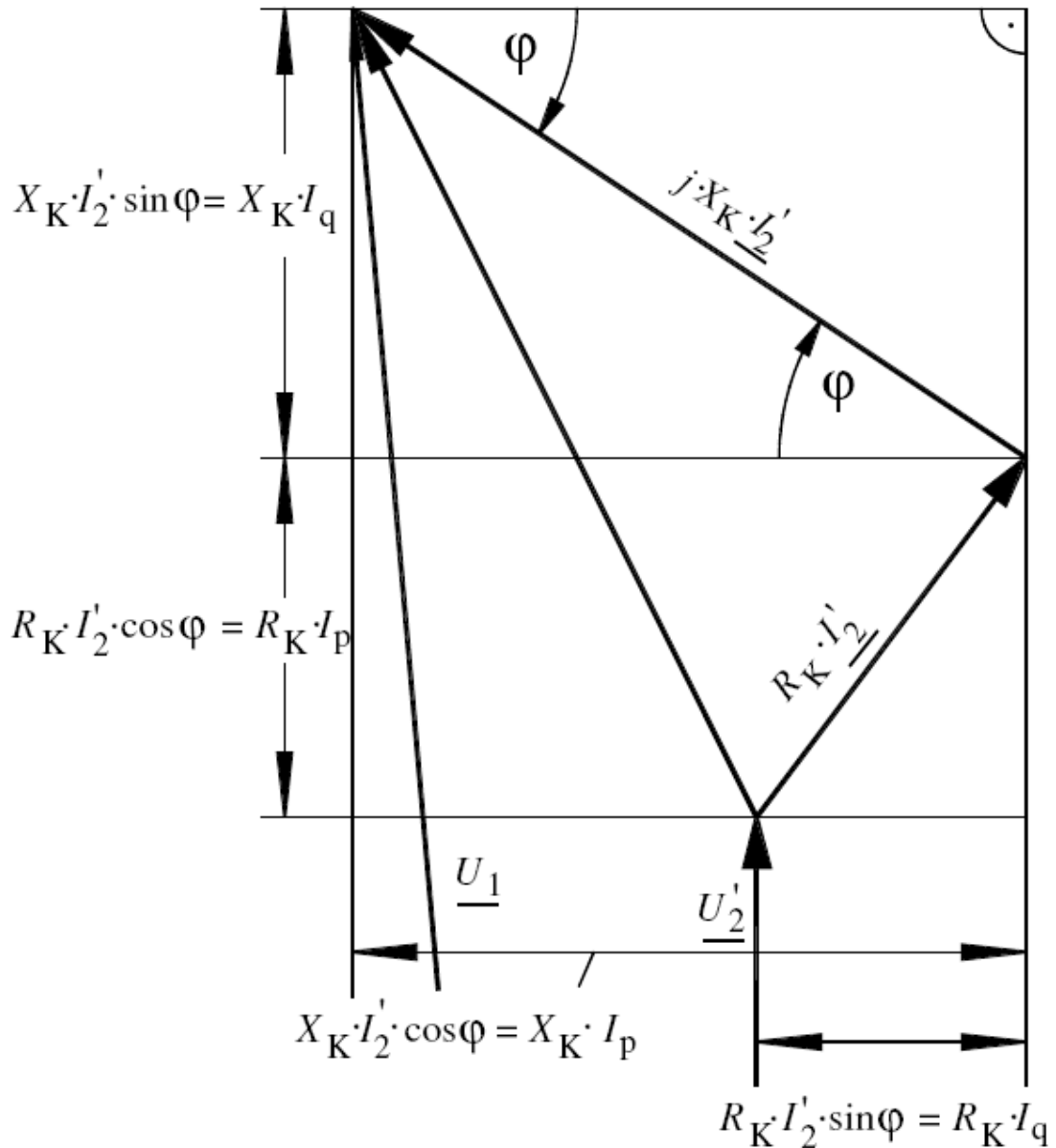


Bild 5 - 19: Längs- und Querspannungsabfall

Aus Bild 5 - 19 kann man ablesen:

$$\Delta U_{\parallel} = X_K \cdot I_q + R_K \cdot I_p \approx X_K \cdot I_q \quad \text{bei } X_K \gg R_K$$

$$\Delta U_{\perp} = X_K \cdot I_p - R_K \cdot I_q \approx X_K \cdot I_p \quad \text{bei } X_K \gg R_K$$

5.5. Drehstromtransformatoren

Die Wicklungen auf den drei bewickelten Schenkeln eines Drehstromtransformators können verschieden zusammen geschaltet werden. Die Hauptschaltungen sind (Bild 5 - 20):

Sternschaltung Kennzeichnung Y bzw. y

Dreieckschaltung Kennzeichnung D bzw. d

Zickzackschaltung Kennzeichnung Z bzw. z

Großbuchstaben dienen zur Schaltungskennzeichnung der Oberspannungswicklung, mit Kleinbuchstaben wird die Schaltung der Unterspannungswicklung bezeichnet. Der Übersichtlichkeit halber werden die Wicklungen eines Transformators untereinander gezeichnet, obwohl sie in Wirklichkeit natürlich konzentrisch oder verschachtelt (Bild 5 - 5) liegen.

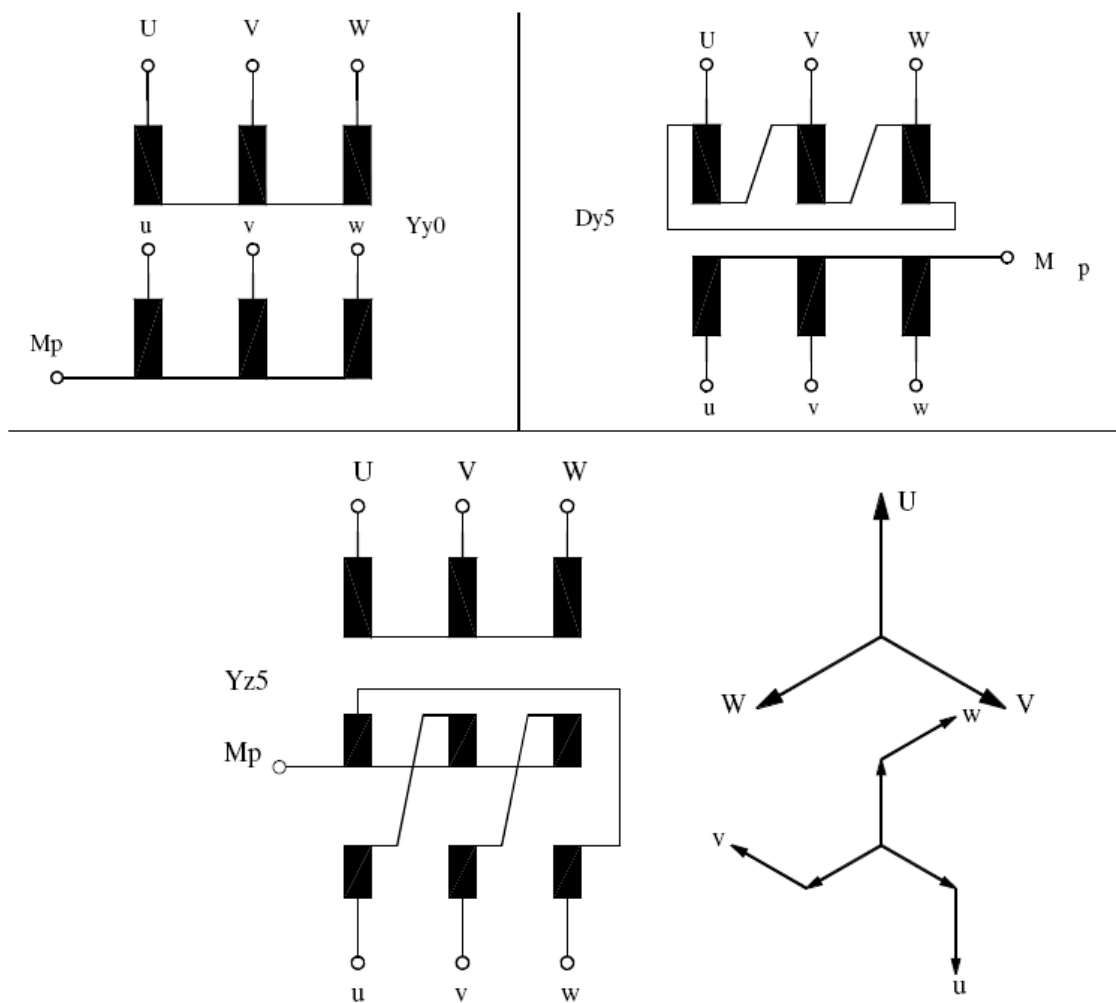


Bild 5 - 20: Schaltungen für Drehstromtransformatoren

Welche dieser Schaltungen nun eingesetzt werden, hängt im Wesentlichen von der Sternpunktbehandlung der Netze ab, in denen die Transformatoren eingesetzt werden. Ohne auf die damit verbundenen speziellen Schutzkonzepte dieser Netze einzugehen, lässt sich feststellen:

- Mittelspannungsnetze (10...110 kV) werden fast immer mit freiem (oder hochohmig geerdeten) Sternpunkt betrieben; der MP ist also nicht angeschlossen.

- Hochspannungs-Übertragungsnetze sowie Niederspannungs-Verteilnetze werden dagegen immer mit starr geerdeten Sternpunkten der Transformatoren betrieben. Da in 400 V/230 V Niederspannungsnetzen zu einem großen Teil auch einphasige Lasten zwischen den Leitern und dem MP angeschlossen werden, bestehen folgende Forderungen: Sinusform der Netz- Sternpunkt-Spannung sowie volle Strombelastbarkeit durch Lasten, die zwischen Außenleiter und Mittelpunktleiter angeschlossen sind.

5.5.1 Sternschaltung

Am einfachsten sieht auf den ersten Blick ein Transformator in Stern-Stern-Schaltung mit der Kennzeichnung Yy0 aus (Bild 5 - 20, links oben). Es gibt aber zwei Probleme:

Wie sich nach der in Bild 5 - 11 dargestellten Methode zeigen lässt, setzt Sinusform der induzierten Spannung bei einer nichtlinearen Magnetisierungskurve einen Magnetisierungsstrom voraus, der durch drei teilbare Oberschwingungen enthält. Wird die Oberspannung an ein symmetrisches Drehstromnetz ohne Mittelpunktleiter angeschlossen, können die Ströme aber keine Oberschwingungen mit durch drei teilbaren Ordnungszahlen ausbilden, denn Oberschwingungen von kurvengleichen Strömen mit 120° Phasenverschiebung haben gegeneinander $v \cdot 120^\circ$ Phasenverschiebung, und die Oberschwingungen mit durch drei teilbaren Ordnungszahlen sind also phasengleich. Da kein Mittelpunktleiter vorhanden ist, können phasengleiche Komponenten – die ein Nullsystem bilden – nicht fließen.

Dann enthält die induzierte Spannung notwendigerweise Oberschwingungen mit durch drei teilbarer Ordnungszahl. Die Schenkelflüsse eines Transformators in Stern-Stern-Schaltung enthalten folglich durch drei teilbare Oberschwingungen, selbst wenn die Leiterspannungen des speisenden Netzes reine Sinusform aufweisen. Die Spannungen der Unterspannungsseite gegenüber dem Mittelpunktleiter sind deshalb nicht sinusförmig, nur die Leiterspannungen der Unterspannungsseite. Ein wichtiges Qualitätsmerkmal der elektrischen Energieversorgung wäre damit nicht erfüllt - die Sternspannungen müssen wegen des Anschlusses von einphasigen Geräten an die 230-V-Sternspannungen einen sinusförmigen Verlauf haben!

Schließt man an die Unterspannungsseite eine unsymmetrische Belastung so an, dass der Mittelpunktleiter Strom führt, erhält das sekundäre Stromsystem eine Nullkomponente. Der Primärstrom kann dagegen – wie oben dargelegt – keine Nullkomponente haben, da kein Mittelpunktleiter vorhanden ist. Damit ist der sekundäre Nullstrom für den Transformator ein reiner Magnetisierungsstrom, alle drei Schenkel werden gleichsinnig und gleichphasig erregt.

Bei Fünf-Schenkel-Transformatoren schließt sich der zugehörige Fluss über die Rückflussschenkel; kleine Erregungen verursachen wegen des großen μ des Eisens sofort einen großen Fluss. Die Reaktanz des Trafos für ein Nullsystem, die Nullreaktanz, liegt in der Größenordnung der Hauptreaktanz.

Bei einem Drei-Schenkel-Transformator muss sich der gleichsinnig erregte Fluss von Joch zu Joch über die Umgebung des Transformators schließen und wird somit Konstruktionsteile und Ölkessel unzulässig erwärmen. Die Nullreaktanz ist hier zwar erheblich kleiner als beim Fünf-Schenkel-Transformator, aber immer noch erheblich.

In der Praxis ist daher ein Y-y-Trafo nicht gegen den Mittelpunktleiter belastbar. Er kann deshalb auch nicht zur Versorgung eines 400-V/230-V-Verbrauchernetzes eingesetzt werden.

8.5.2 Dreieckschaltung

Schaltet man die Oberspannungswicklung im Dreieck, erhält man einen Transformator in D-y-Anordnung (Bild 5 - 21).

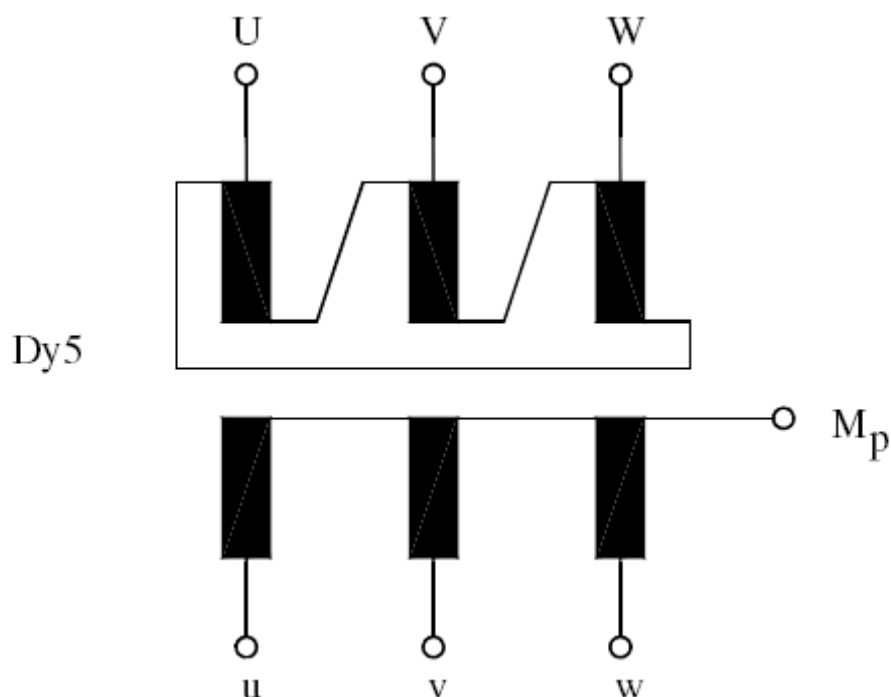


Bild 5 - 21: Transformator in Dy5-Schaltung

Sind die Leiterspannungen des speisenden Oberspannungsnetzes sinusförmig, müssen jetzt die Schenkelflüsse auch sinusförmig verlaufen, da ja ein Schenkel direkt die Leiterspannung der Oberspannungsseite induziert. Das Oberspannungsnetz kann aber nach wie vor keine

Oberschwingungsströme mit durch 3 teilbaren Ordnungszahlen liefern. Wie erklärt sich dieser Widerspruch?

Wird zunächst angenommen, dass auf der Oberspannungsseite eine der Dreieckverbindungen fehlen würde, tritt, wenn in den von den drei Schenkeln induzierten Spannungen Oberschwingungen mit durch 3 teilbaren Ordnungszahlen enthalten sind, die Summe dieser Spannungen, also der dreifache Wert an der Öffnungsstelle des Dreiecks als Klemmenspannung in Erscheinung. Wird das Dreieck nun geschlossen, fließen Kurzschlussströme z.B. von dreifacher Frequenz. Diese Kurzschlussströme erregen Flüsse, die die ursprünglich vorhandenen Oberschwingungen in der Spannung zum Verschwinden bringen. Die Dreieckwicklung ermöglicht also das Fließen von Strömen mit durch 3 teilbaren Ordnungszahlen, die vom speisenden Netz her nicht geliefert werden können. Es ist also ohne weiteres möglich, dass die von den Schenkeln induzierten Spannungen rein sinusförmig sind.

Enthält der sekundäre Belastungsstrom ein Nullsystem, kann sich jetzt in der Primärwicklung die zugehörige Gegendurchflutung ausbilden. Die Dreieckwicklung verhindert das Auftreten aller Jochwechselflüsse, da die hierdurch induzierten Spannungen durch die in sich geschlossene Oberspannungswicklung kurzgeschlossen werden.

8.5.3 Zick-Zack-Wicklung

Für den Anschluss der Primärwicklung an hohe Oberspannungen ist die Sternwicklung wirtschaftlicher als die Dreieckwicklung, da die an der Wicklung liegende Spannung um den Faktor 3 geringer ist und somit Isolationsprobleme besser zu lösen sind. Um auch in diesem Fall ein Sekundärsystem mit voll belastbarem Mittelpunktleiter bilden zu können, wird dann die Unterspannungswicklung als Zick-Zack-Wicklung ausgeführt (Bild 5 - 22):

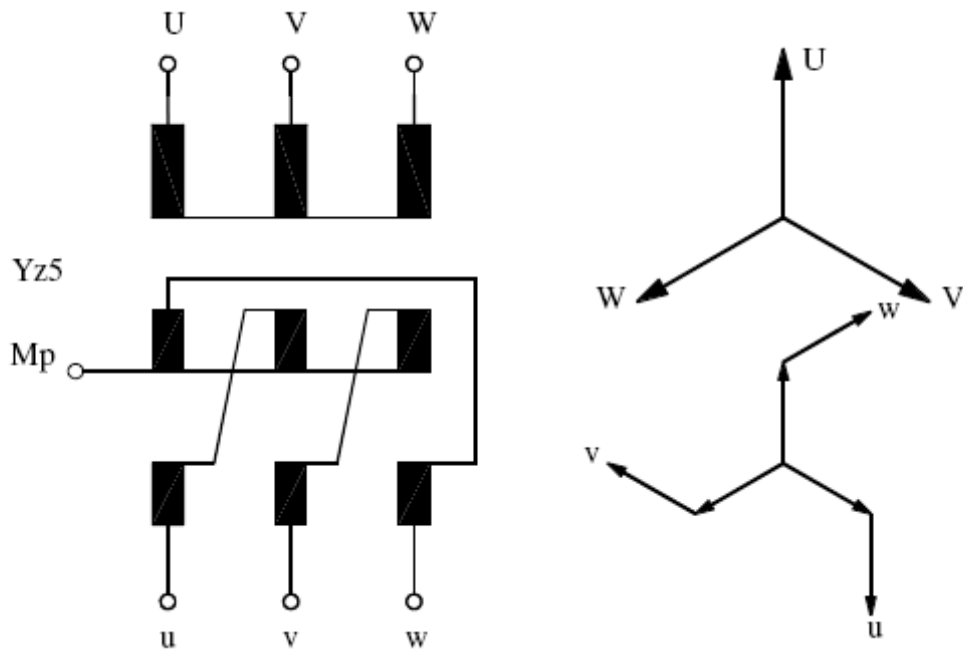


Bild 5 - 22: Transformator in Yz5-Schaltung

Die Schenkelflüsse und damit die Spannungen der Schenkelwicklungen werden wegen des Fehlens einer Dreieck-Wicklung nicht sinusförmig sein. Jede Sekundärspannung besteht aber immer aus der Differenz zweier gleich großer Schenkelspannungen, so dass in der Gesamtspannung die gleichphasigen Oberschwingungen mit durch 3 teilbaren Ordnungszahlen verschwinden.

Enthält der sekundäre Belastungsstrom ein Nullsystem, hebt sich dessen magnetische Wirkung schon innerhalb der Unterspannungswicklung auf, wie das Schaltbild zeigt. Selbst Gleichstrom kann als Nullsystem ohne schädliche Auswirkung über die Wicklung fließen. Da sich die Spannungen der Sekundärseite nicht algebraisch, sondern geometrisch addieren, ist der Aufwand für die Sekundärwicklung im Verhältnis $2 / \sqrt{3} = 1,15$ größer als bei einer einfachen Stern- oder Dreieckwicklung. Bezogen auf den ganzen Transformator macht der Mehraufwand dann etwa 8% aus.

Wenn Drehstromtransformatoren – wie z. B. im Niederspannungsverteilstromnetz erforderlich – sinusförmige Sekundär-Sternspannungen liefern bzw. gegen den sekundären Sternpunkt belastbar sein müssen, kommt die einfache Stern-Stern-Schaltung nicht in Frage; es muss entweder eine primärseitige Dreieckschaltung vorgesehen werden, die die Ausbildung der Stromnullsysteme ermöglicht, oder die – allerdings aufwendigere – Zick-Zack-Schaltung, bei der sich die Nullsysteme schon auf der Sekundärseite ausgleichen können.