

INGENIEUR- FERNSTUDIUM

HAYN

TRANS- FORMATOREN

1

HERAUSGEBER
INGENIEURSCHULE FÜR
STARKSTROMTECHNIK
„HANNO GÜNTHER“ VELTEN-
HOHENSCHÖPPING

1202-01/62

Herausgeber:
Ingenieurschule für Starkstromtechnik
„Hanno Günther“ Velten-Hohenschöpping

Transformatoren

Lehrbrief 1

von

Dipl.-Ing. Erich Hayn

4. Auflage

1962

Zentralstelle für Fachschulausbildung
— **Bereich Maschinenbau, Elektrotechnik, Leichtindustrie** —
Dresden

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

Seite

Teil I:	Einführung in Aufbau und Wirkungsweise der Transformatoren	
1. Kapitel:	Einführung, Theorie und Grundbegriffe	
	1 Sinn und Zweck des Transformators	3
	2 Wesen und Wirkung des Transformators	5
	3 Erklärung elektrischer Begriffe	7
2. Kapitel:	Das Magnetgestell	
	4 Bauformen des Einphasen-Transformators	9
	5 Bauformen des Drehstrom-Transformators	12
	6 Der Eisenkern	14
3. Kapitel:	Die Wicklungen	
	7 Anwendung der Transformatoren in der Niederspannungs- und Fernmeldetechnik	20
	8 Die natürlichen Grenzen des Transformators in der Hochfrequenz- und Hochspannungstechnik	22
	9 Wicklungsanordnung und Wicklungsformen ...	23
	10 Wicklungsaufbau	27
4. Kapitel:	Isolation	
	11 Windungsisolation	30
	12 Wicklungsisolation	31
	13 Außenisolation — Durchführungen	33
5. Kapitel:	Kühlung	
	14 Erwärmung und innerer Wärmekreislauf	37
	15 Kühlungsarten und Gefäßformen	40
6. Kapitel:	Betriebseligenschaften..	
	16 Leerlauf, Belastung	48
	17 Verluste und Wirkungsgrad	57
	18 Schaltungen und Parallellauf	61
	19 Transformatorenschutz	66
7. Kapitel:	Sonderausführungen	
	20 Der Spartransformator	72
	21 Der Drehtransformator	76
	22 Meßwandler	79
	Antworten und Lösungen	84
	Formelzusammenstellung	87

Teil I: Einführung in Aufbau und Wirkungsweise der Transformatoren

1. Kapitel: Einführung, Theorie und Grundbegriffe

[1] Sinn und Zweck des Transformators. Das Wort „transformieren“ stammt aus der lateinischen Sprache und bedeutet: etwas in seiner Gestalt verwandeln, umformen oder umbilden.

Die Umformer elektrischer Energie teilt man ein in umlaufende und in ruhende Umformer.

Die gebräuchlichsten umlaufenden Umformer sind die *Motorgeneratoren*. Mit ihnen können Sie Gleichstrom in Wechselstrom umformen oder Wechselstrom in Gleichstrom oder Wechselstrom einer Frequenz in Wechselstrom einer anderen Frequenz. Sie können auch die Stromart beibehalten und nur die Spannungen umwandeln oder auch andere Kombinationen ausführen. Der Motorgenerator ist somit ein vielseitiger Umformer, dessen Anwendungsmöglichkeit nur durch die im Elektromaschinenbau beherrschbaren Spannungen begrenzt ist.

Der *Transformator* ist ein ruhender Umformer, der zwar in seiner Anwendungsmöglichkeit dem rotierenden Umformer nachsteht, aber statt dessen in der Wandelbarkeit der Spannungen unbegrenzte Möglichkeiten bietet.

Im Transformator erfolgt die Umwandlung elektrischer Energie einer gegebenen Wechselspannung in eine andere Wechselspannung bei gleichbleibender Frequenz.

Im Transformator können nur Wechselströme umgeformt werden, keine Gleichströme. Diese Tatsache wird durch das elektromagnetische Induktionsgesetz erklärt, auf das sich die Wirkungsweise des Transformators gründet (s. [2]). Obwohl „Transformator“ sprachlich dasselbe wie „Umformer“ bedeutet, soll die abweichende Benennung beachtet werden. Die Bezeichnung „Transformator“ ist in der ganzen Welt so fest eingebürgert, daß eine andere Benennung nur verwirren würde. Auch die Bezeichnung „Umspanner“ statt „Transformator“, die als gutgemeinte Verdeutschung in Anlehnung an das Wort „Umspannwerk“ eingeführt wurde, muß abgelehnt werden. Lediglich einem einzigen Teilgebiet der Transformatorentechnik, dem der Strom- und Spannungswandler, die in ihrer besonderen Konstruktion den Übergang zur elektrischen Meßtechnik herstellen, bleibt die abweichende Bezeichnung „Meßwandler“ vorbehalten.

Der Transformator nimmt innerhalb der Elektrotechnik eine besondere Stellung ein. Er ist das wichtigste Bindeglied zwischen den Erzeugungsstätten elektrischer

Energie, dem Energieverteilungsnetz und den Verbrauchern elektrischer Energie. Ohne Transformatoren ist über große Entfernungen ein Übertragen elektrischer Energie im Sinne unserer heutigen Anforderungen überhaupt nicht denkbar.

Betrachten Sie das in Bild 1 dargestellte Schema einer elektrischen Übertragungsanlage.

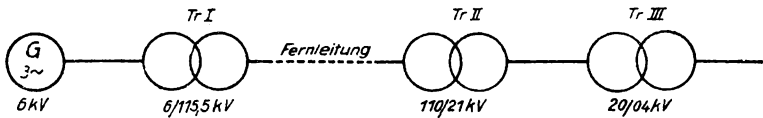


Bild 1. Übertragungsschema

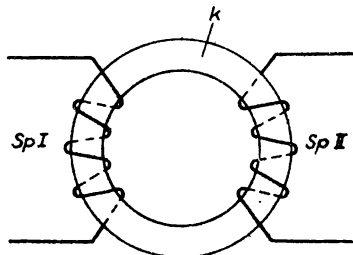
Die elektrische Energie wird in den Generatoren meist mit einer Spannung von 6000 V bzw. 10000 V erzeugt. In Kraftwerkstransformatoren wird die erzeugte Spannung auf die Fernleitungsspannung von 110000 V oder 220000 V umgeformt. Sie wissen, daß der Leitungsquerschnitt der Stromstärke angepaßt sein muß, denn wenn Sie einen zu geringen Querschnitt wählen, ist der Spannungsabfall über der Leitung zu groß, ebenso der Leistungsverlust. Die Leistung N eines Wechselstromes ist

$$N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Ist $\cos \varphi = 1$, so ist die Leistung nur von dem Produkt der Spannung und der Stromstärke abhängig. Nehmen Sie eine hohe Spannung bei gleicher Leistung, so erhalten Sie eine geringere Stromstärke. Der Leitungsquerschnitt kann demzufolge geringer gewählt werden, so daß Sie an Material und Kosten sparen. In Großspannwerken, auch Überlandzentralen genannt, erfolgt die Abwärtstransformation auf ein Mittelspannungsnetz, das mit Spannungen von 10...30 kV die Verteilung der Elektroenergie übernimmt. Nach weiterer Transformation entsteht die Spannung 380/220 V, der eine sekundäre Transformatorspannung von 400/231 V entspricht.

Die Vielzahl der Transformatoren auf dem Wege vom Erzeuger bis zum Verbrauchersetz eine hohe Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit dieser Zwischenglieder voraus. Im Transformator haben Sie ein elektrisches Übertragungsorgan vor sich, das von allen elektrischen Maschinen den höchsten Wirkungsgrad besitzt bei denkbar größter Betriebssicherheit. Der Wirkungsgrad liegt zwischen 99,0 und 99,5 % bei Großtransformatoren. Die serienmäßig hergestellten kleinen Netztransformatoren haben Verluste in der Größenordnung von 5 bis 20 % aufzuweisen.

[2] Wesen und Wirkung des Transformators. Die Idee des Wechselstromtransformators geht zurück auf die Arbeiten des Engländers FARADAY, der im Jahre 1831 die elektromagnetische Induktion entdeckte. FARADAY verwendete bei seinen Versuchen eine Anordnung, die sich grundsätzlich kaum von einem Transformator unterscheidet. Bild 2 zeigt das klassische Bild des FARADAYSchen Ringes, eines *geschlossenen* Eisenringes, der von zwei Wicklungen umschlungen wird.



Wie ist die Wirkungsweise dieses Transformators?

Bild 2. FARADAYScher Ring

Legen Sie eine Wechselspannung an die Spule I, so fließt ein Strom I_1 , der im Eisenkern K einen magnetischen Fluß hervorruft. Dieser Fluß durchsetzt die Spule II und erzeugt in ihr eine Spannung.

Das Verhältnis der Spannungen und Ströme sowie der Windungen der Spulen zueinander ist festzustellen. In „Grundlagen der Elektrotechnik“ Lehrbrief 7 lernten Sie die Formel kennen

$$E = \mathfrak{B} \cdot l \cdot v$$

Nach Bild 3 ergibt sich für die Spannung der rotierenden Leiterschleife

$$E_{\max} = 2 \cdot \mathfrak{B} \cdot l \cdot v$$

(Der Faktor 2 muß eingefügt werden, da zwei Leiter im Magnetfeld vorhanden sind.)

Die Geschwindigkeit ist $v = \pi \cdot D \cdot n$ so daß Sie erhalten

$$E_{\max} = 2 \pi \cdot \mathfrak{B} \cdot l \cdot D \cdot n$$

und, da $F = l \cdot D$ der Querschnitt des Kernes ist,

$$E_{\max} = 2 \pi \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot n$$

Nun ist aber $n = \frac{f}{p}$, wobei p die Polpaarzahl ist. $\frac{f}{p}$ eingesetzt, ergibt

$$E_{\max} = \frac{2 \pi \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f}{p}$$

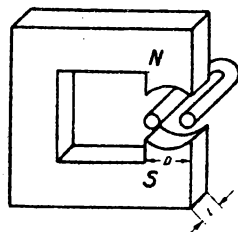


Bild 3. Prinzipzeichnung eines Generators

Kreisen statt einer Leiterschleife w Windungen, so ist

$$E_{\max} = \frac{2 \pi \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w}{p}$$

Sie wissen: Um eine Spannung zu erzeugen, muß sich der Leiter im Magnetfeld bewegen, oder es muß eine Flußänderung bei ruhender Spule vorhanden sein. Letzteres ist das Prinzip des Transformators. Wenn also die in Bild 2 gezeigte Spule I mit Wechselstrom betrieben wird, ist die gestellte Bedingung erfüllt.

Beim Transformator ist p stets 1. Somit ist die maximale Spannung

$$E_{m,x} = 2\pi \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w$$

und der Effektivwert

$$E_{\text{eff}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w = 4,44 \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w$$

In praktischen Rechnungen ist es üblich, für die Größen der magnetischen Induktion und des magnetischen Flusses die Einheiten aus dem absoluten Maßsystem zu wählen (*Gauß* und *Maxwell*), während alle anderen Einheiten dem praktischen Maßsystem entnommen werden.

Wird das Ergebnis in Volt gewünscht und \mathfrak{B} in Gauß, F in cm^2 und f in s^{-1} eingesetzt, so lautet die Transformatorgleichung

$$E_{\text{eff}} = 4,44 \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w \cdot 10^{-8} \text{ [V]} \quad (1)$$

Gehen Sie von dem magnetischen Fluß Φ aus, so werden in den zwei Spulen die Spannungen induziert

$$E_1 = 4,44 \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w_1 \cdot 10^{-8}$$

und

$$E_2 = 4,44 \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w_2 \cdot 10^{-8}$$

Setzen Sie die induzierten Spannungen E_1 und E_2 ins Verhältnis, so erhalten Sie

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w_1 \cdot 10^{-8}}{4,44 \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w_2 \cdot 10^{-8}}$$

Daraus folgt

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \ddot{u} \quad (2)$$

\ddot{u} nennt man das *Übersetzungsverhältnis*.

Für die weitere Entwicklung wird der Transformator als *verlustfrei* angesehen.

Es ist dann die

Eingangsleistung N_1 gleich der Ausgangsleistung N_2

und die

Klemmenspannung U gleich der Ursprungung E .

Daraus folgt

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

oder

$$E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2$$

Betrachten Sie die Strom- bzw. Spannungsverhältnisse, so erhalten Sie

$$\boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1}} \quad (3)$$

Das heißt:

Der Primärstrom verhält sich zum Sekundärstrom umgekehrt wie die Spannungen bzw. die Windungszahlen der Wicklungen.

Der OHmsche Widerstand der Primärwicklung ist

$$R_1 = w_1 \frac{l \cdot \rho}{q_1}$$

und der Widerstand der Sekundärwicklung

$$R_2 = w_2 \frac{l \cdot \rho}{q_2}$$

wenn l die mittlere Länge einer Windung, q_1 der Leiterquerschnitt der Primärwicklung und q_2 der Leiterquerschnitt der Sekundärwicklung ist. Nach Division folgt

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{w_1 \cdot q_2}{w_2 \cdot q_1}$$

Da die Leiterquerschnitte q_1 und q_2 den Strömen I_1 und I_2 proportional sind, gilt

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{q_2}{q_1} = \ddot{u}$$

Demzufolge ist

$$\frac{R_1}{R_2} = \ddot{u} \cdot \ddot{u} = \ddot{u}^2$$

bzw.

$$\boxed{R_1 = R_2 \cdot \ddot{u}^2} \quad (4)$$

Widerstände werden mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses übertragen.

[3] Erklärung elektrischer Begriffe. Um eine bestimmte Betriebssicherheit zu schaffen und rationell arbeiten zu können, wurde das „Vorschriftenwerk Deutscher Elektrotechniker“ (VDE) geschaffen. In diesem Werk sind die **Regeln für Transformatoren** unter der Nummer 0532/I. 47 niedergelegt.

In diesem Abschnitt sollen Sie die wichtigsten Grundbegriffe kennenlernen (gemäß §§ 11 bis 17 des VDE).

- § 11: *Nennbetrieb* heißt der Betrieb des Transformators mit der Nennprimärspannung (§ 14), der Nennfrequenz (§ 17), dem Nennsekundärstrom (§ 15) und der Betriebsart (§ 24), die auf dem Leistungsschild genannt sind.
- § 12: Bei Transformatoren wird unter *Leistung* die Scheinleistung verstanden. *Abgabe* ist die abgegebene Wirkleistung an den Sekundärklemmen. *Aufnahme* ist die aufgenommene Wirkleistung an den Primärklemmen.
- § 13: *Übersetzung* ist das Verhältnis der Spannung der Wicklung mit der größeren Windungszahl zur Spannung der Wicklung mit der kleineren Windungszahl bei Leerlauf. (Über Spartransformatoren s. [20].)
- § 14: a) *Nennspannung* ist die Spannung, für die der Transformator hinsichtlich seines Transformationsvermögens bemessen ist (Nennspannungen sind: 125, 220, 380 und 500 V; 1, 3, 6, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 110, 150, 220, 400 kV).
b) *Reihenspannung* ist die Spannung, für die der Transformator hinsichtlich seines Isoliervermögens gebaut ist (Spannungsabstufung wie bei Nennspannung, jedoch ab 1 kV).
c) *Nennprimärspannung* ist die Spannung, für welche die Primärwicklung bemessen ist. *Nennsekundärspannung* ist die bei Leerlauf des Transformators an den Klemmen der Sekundärwicklung auftretende Spannung bei Speisung der Primärwicklung mit der Nennspannung.
- § 15: a) *Nennsekundärstrom* ist der Vollaststrom, für den die Sekundärwicklung bemessen ist.
b) *Nennprimärstrom* ist der Strom, der sich ergibt, wenn man den Nennsekundärstrom mit dem Verhältnis von Nennsekundär- zu Nennprimärspannung multipliziert (dies gilt strenggenommen nur bei $\cos \varphi = 1$).
- § 16: a) *Nennleistung* ist die als Produkt aus Nennsekundärspannung, Nennsekundärstrom und Phasenfaktor berechnete Scheinleistung. Sie ist als Typenleistung anzusehen und verschieden von der bei Nennbetrieb abgegebenen Scheinleistung, da sich die Nennsekundärspannung als Leerlaufspannung um den Betrag der inneren Spannungsabfälle von der sekundären Klemmenspannung bei Belastung unterscheidet.
b) Nennleistung bei Gleichrichter-Transformatoren ist die auf dem Leistungsschild angegebene Scheinleistung, die der Transformator im zugehörigen Gleichrichterbetrieb dauernd aufnehmen kann. Sie wird wie unter a) errechnet.
- § 17: *Nennfrequenz* ist die Frequenz, für die der Transformator gebaut ist.

Die weiteren Begriffserklärungen bzw. Bestimmungen werden mit in den folgenden Abschnitten behandelt.

Der aktive Teil eines Transformators besteht aus einem allseitig geschlossenen *Eisenkern mit zwei Wicklungen*, der Primär- und der Sekundärwicklung. Die beiden Wicklungen werden auch nach der Höhe der zugehörigen Spannungen benannt, und man spricht dann allgemein von der *Oberspannungswicklung* und von der *Unterspannungswicklung*, unabhängig von der betriebenen Energie- richtung. So ist z. B. die Oberspannungswicklung bei Herauftransformierung gleichzeitig die Sekundärwicklung und bei Herabtransformierung die Primärwicklung. Oft werden zur besseren Kennzeichnung auch die zugehörigen Nennspannungen des speisenden und des zu speisenden Netzes genannt. Man

spricht also z. B. von einer 30-kV-Wicklung und von einer 10-kV-Wicklung und bezeichnet dann den Transformator als 30/10-kV-Transformator.

Nach den Bestimmungen des VDE sind alle Transformatoren unter einer Leistung von 5 kVA Kleintransformatoren. Von 5 bis etwa 1600 kVA liegt der Bereich der Ortsnetztransformatoren. Der mittlere Leistungsbereich von 2000 bis zu ungefähr 10000 kVA umfaßt im allgemeinen die Umspannwerktransformatoren. Alle Transformatoren über 10000 kVA, die vorwiegend in Kraftwerken oder in Großumspannwerken eingesetzt werden, bezeichnet man als Großtransformatoren.

Zusammenfassung

Der Transformator ist ein ruhender Umformer, dessen Wirkung auf dem Induktionsprinzip beruht. Bei gleichbleibender Frequenz wird entsprechend dem Windungsverhältnis eine Spannungsänderung erzielt. Die Spannungen verhalten sich proportional dem Windungsverhältnis, die Ströme sind jedoch umgekehrt proportional den Windungszahlen.

In den „Regeln für Transformatoren“ (VDE 0532, §§ 11 bis 17) sind die elektrischen Grundbegriffe festgelegt.

Übungen

1. Was versteht man unter einem Transformator?
2. Welchen Zweck erfüllt der Transformator in der Energieversorgung?
3. Auf welchem Grundgesetz beruht die Wirkung des Transformators?
4. Wie lauten die drei transformatorischen Grundgleichungen?
5. Wodurch ist das Übersetzungsverhältnis des Transformators bestimmt?
6. Wie lautet die im VDE gegebene Definition für die Nennleistung eines Transformators?

2. Kapitel: Das Magnetgestell

[4] **Bauformen des Einphasen-Transformators.** Der FARADAYSche Ring ist nicht nur für die Theorie, sondern auch für die praktische Ausführung Ausgangspunkt unserer Überlegungen. Sehen Sie sich noch einmal seine Darstellung in Bild 2 an, und dann betrachten Sie die Bilder 4a und 4b, auf denen die ersten Transformatoren dargestellt sind, die im Jahre 1885 gebaut wurden. Sie werden eine völlige Übereinstimmung mit dem FARADAYSchen Ring feststellen. Die Wicklungen und der Eisenkern greifen ineinander wie die Glieder einer Kette. Hier ist das Symbol des Ringes selbst zur Gestalt geworden. Der Kern des Transformators in Bild 4a besteht aus einem Eisendrahring, auf dem die Spulen aufgewickelt sind. Bei der in Bild 4b dargestellten Bauart bilden die primären und die sekundären Wicklungen den inneren Ring, der dann

seinerseits mit Eisendraht umwickelt wurde. Sie haben also in Bild 4a einen **Kerntransformator** vor sich und in Bild 4b einen **Manteltransformator**. Diese sinnvollen Bezeichnungen sprechen für sich selbst.

Zur Vereinfachung wurden sehr bald die einzelnen Teile des magnetischen Kreises aus geraden Stücken hergestellt. Bei dieser Konstruktion lassen sich

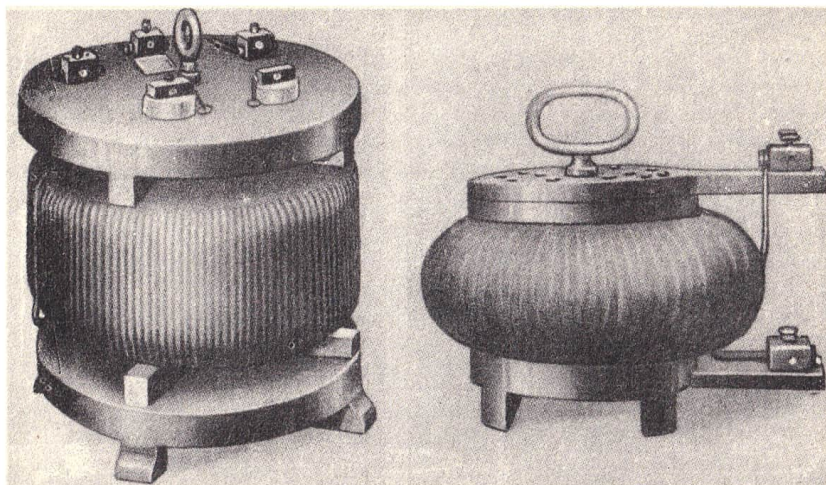


Bild 4a. Ringtransformator mit innerem Eisenkern (Eisendraht)

Bild 4b. Ringtransformator, Eisendraht um den Wicklungsring gewickelt

die Wicklungen gut über die Eisenkerne schieben. Die folgenden Bilder 5 und 6 zeigen das deutlich.

Die bewickelten Teile des Magnetgestells nennt man *Schenkel*, *Säulen* oder *Kerne*. Sie werden durch *Joche* miteinander verbunden. Beim Kerntransformator wird im allgemeinen auf jeden der beiden Schenkel die Wicklung aufgebracht.

Wenn — wie in Bild 7 — die Primär- und die Sekundärwicklung auf einen Schenkel aufgebracht sind, ergibt sich, daß für die Fertigung der äußeren Spule eine größere Menge Kupfer benötigt wird als bei der Verteilung der Spulen auf beide Schenkel (Bild 8). Gleichzeitig ist bei der ersten Anordnung die Streuung des Magnetfeldes größer, so daß der Wirkungsgrad schlechter wird. In Bild 8 sind die Primär- und die Sekundärwicklung getrennt auf je einem Schenkel untergebracht. Die mittlere Windungslänge l_m wird dadurch kleiner, gleichzeitig auch der Kupferaufwand. Die Streuung ist ebenfalls kleiner geworden. Trotzdem spricht man von **Streutransformatoren**. Die günstigsten Verhältnisse

erhält man, wenn die Primär- und die Sekundärwicklung je zur Hälfte auf jeden Schenkel verteilt wird. Die Wicklungshälften werden entweder parallel oder in Reihe geschaltet.

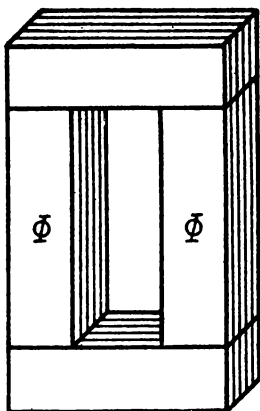


Bild 5. Einphasen-Kerntransformator

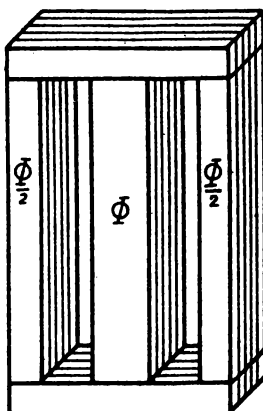


Bild 6. Einphasen-Manteltransformator

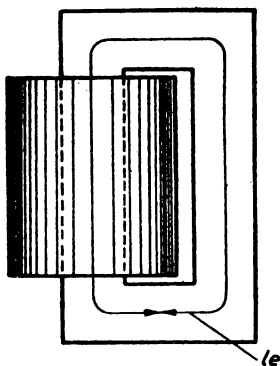


Bild 7. Einphasen-Kerntransformator mit einem bewickelten Schenkel;
 l_e mittlere Eisenlänge

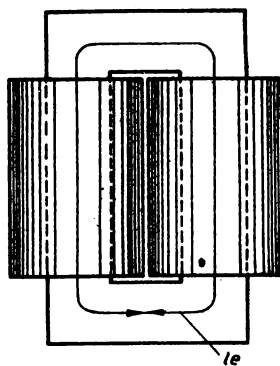


Bild 8. Einphasen-Kerntransformator mit zwei bewickelten Schenkeln;
 l_e mittlere Eisenlänge

Beim Manteltransformator sitzen die Wicklungen nur auf dem Mittelschenkel und werden durch die beiden Außenschenkel ummantelt. Der Querschnitt des Mittelschenkels ist doppelt so groß wie der Querschnitt der Außenschenkel

und der Joche, weil der Fluß Φ des Mittelschenkels je zur Hälfte über die Joche und Außenschenkel zurückfließt (Bild 6, das jedoch ohne Wicklung ist). Der Manteltransformator ist der übliche Kleintransformator, den Sie bestimmt schon in Rundfunkgeräten, Hausklingelanlagen usw. gesehen haben. Durch die gedrungene Form des Kernes ist der Leerlaufstrom geringer als bei den anderen Anordnungen; gleichzeitig ist die Fertigung dieser Transformatoren billiger, wie Sie noch feststellen werden.

[5] Bauformen des Drehstrom-Transformators. Wenn Sie an Stelle von einphasigem Wechselstrom dreiphasigen Wechselstrom transformieren wollen, so können Sie hierfür drei Einphasen-Transformatoren benützen, die Sie in Stern- oder in Dreieckschaltung an die drei Phasen des Drehstromnetzes anschließen. Sie brauchen hierfür drei Einphasenkerne. Das System der Verwendung von *drei Einphasen-Transformatoren zur Übertragung von Drehstrom* hat, vom Standpunkt der Betriebsführung aus betrachtet, zweifellos etwas sehr Bestechendes an sich. Durch Hinzufügen eines vierten Einphasen-Transformators zu einer Gruppe von drei Transformatoren gewinnt man mit diesem vierten Transformator eine Reserve für die drei anderen, während beim Drehstrom-Transformator die Reserve für alle drei Phasen durch Aufstellung von drei Drehstrom-Transformatoren gehalten werden muß. Auch können schwierige Transportverhältnisse und erhebliche Gewichte bei sehr großen Transformatoreneinheiten ausschlaggebend sein für die Aufteilung der Drehstromgruppe in drei Einphasen-Transformatoren. Der erhebliche Material-

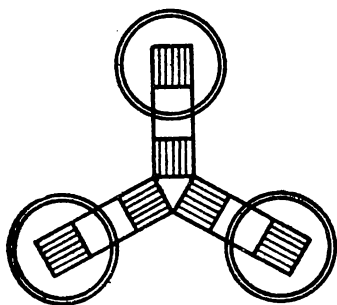


Bild 9. Drei Einphasen-Kerntransformatoren, sternförmig zusammengestellt

aufwand und der Platzbedarf führten jedoch zwangsläufig zur Kombination der drei Einphasen-Transformatoren zu einem einzigen Drehstrom-Transformator.

Betrachten Sie noch einmal den beschriebenen Einphasen-Transformator mit nur einem bewickelten Schenkel, bei dem der andere Schenkel als Rückschluß dient (s. Bild 7). Sie stellen drei solche Transformatorenkerne sternförmig zusammen, so daß sich die unbewickelten Rückschlussschenkel gegenseitig berühren, wie das in Bild 9 gezeichnet ist.

Dann ergibt sich bereits bei der Betrachtung dieser Grundrißskizze, daß eine Vereinigung dieser Grundrißskizze, daß eine Vereinigung Überraschung: Wenn Sie jetzt um diese

der drei Säulen zu einer einzigen Säule mit dreifachem Querschnitt möglich sein muß. Nun kommt aber die

gemeinsame Rückschlußsäule eine Hilfswicklung legen, die über einen Spannungsmesser geschlossen wird, und wenn Sie die drei Wicklungen mit dreiphasigem Wechselstrom (Drehstrom) speisen, so werden Sie feststellen, daß in der Hilfswicklung überhaupt keine Spannung induziert wird. Das besagt: Die drei Rückflüsse heben sich gegenseitig auf, so daß der resultierende Fluß gleich Null wird, genau so wie die Summe der zum Drehstrom zusammengeschlossenen Spannungen in jedem Augenblick gleich Null ist. Das heißt also, es werden überhaupt keine gemeinsamen Rückschlußschenkel gebraucht. Für den Drehstrom-Transformator benötigen Sie nur die drei Schenkel unserer drei Einphasen-Transformatoren. Der Fluß jedes einzelnen Schenkels schließt sich über die beiden anderen, so daß die drei Flüsse magnetisch miteinander verkettet werden. Das ist die Erfindung von DOLIVO DOBROWOLSKY im Jahre 1890. Bild 10 zeigt Ihnen einen der ersten Drehstrom-Transformatoren, die nach diesem Prinzip für Leistungen bis etwa 200 kVA gebaut worden sind.

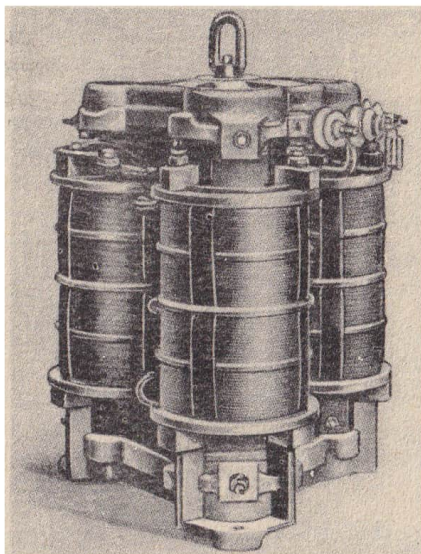


Bild 10. Symmetrischer Drehstrom-Kerntransformator

Die elektromagnetisch außerordentlich günstige, symmetrische Gestalt des Drehstromkernes bietet jedoch herstellungsmäßig infolge der Spezialkonstruktion der Jochverbindungen Nachteile, so daß sie zugunsten der in Bild 11 gezeigten Kernanordnung aufgegeben wurde. Die Kernanordnung ist gleichfalls von DOLIVO DOBROWOLSKY entwickelt worden.

Die drei Schenkel liegen in einer Ebene. Die Anordnung ist also nicht mehr symmetrisch, so daß eine Gleichgewichtsstörung des Flusses in Kauf genommen werden muß. Bei der ebenen, nebeneinanderliegenden Anordnung der drei Schenkel hat der Fluß der beiden äußeren Schenkel einen längeren Weg zurückzulegen als der Fluß des Mittelschenkels. Dadurch stellt sich eine Ungleichheit der Magnetisierungsströme ein. Der Mittelschenkel nimmt einen kleineren Magnetisierungsstrom auf als die beiden Außenschenkel. Für die äußere Betriebsführung ist diese Erscheinung jedoch unwesentlich. Die konstruktiven

und fabrikatorischen Vorteile des **unsymmetrischen Drehstrom-Kerntransformators** sind so groß, daß diese Bauform die Normalgestalt des Drehstrom-Transformators geprägt hat.

Um die Bauhöhe zu verringern, konstruierte man **Fünfschenkel-Transformatoren**. Durch diese Anordnung ist gleichzeitig in den Jochen eine günstige Flußverteilung vorhanden. Die beiden äußeren Schenkel können einen geringeren Querschnitt haben, da sie nur Rückschlußschenkel sind. Bild 12 zeigt diese Form, die vor allem im Großtransformatorenbau angewendet wird,

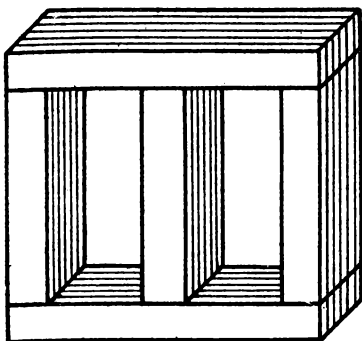


Bild 11. Unsymmetrischer Drehstrom-Transformator

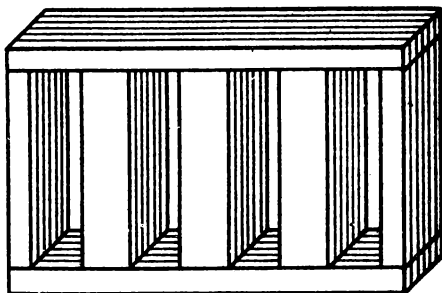


Bild 12. Drehstrom-Fünfschenkel-Transformator

um bei Grenzleistungen an Höhe zu sparen. (Wichtig bei Eisenbahn- oder Straßentransport; hier muß die lichte Tunnel- und Brückenhöhe berücksichtigt werden.) Auch im Gebiet der Meßwandler werden Sie wieder auf diese Bauform stoßen.

[6] Der Eisenkern. Nachdem Sie die verschiedenen Kernanordnungen kennengelernt haben, sollen Sie sich nun dem Aufbau des Eisenkernes zuwenden. Eisen ist ein magnetischer Stoff und gleichzeitig ein elektrischer Leiter. Durch die Flußänderung entsteht im Eisenkern ein Wirbelstrom. Der magnetische Widerstand R_m ist abhängig von dem Material und dem Querschnitt:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot \mu_0 \cdot F}$$

F ist dabei der Querschnitt senkrecht zu der Flußrichtung und l die Eisenweglänge. Wenn Sie den Eisenkern aus einzelnen Blechen herstellen (lamellieren), die durch Papier isoliert sind, entsteht in jedem Blech ein Wirbelstrom, der infolge des kleineren Blechquerschnitts nicht die Größe erreicht wie bei massivem Querschnitt (l ist gleich groß geblieben, so daß R_m größer

wird). Durch die Wirbelströme wird die Wirkkomponente des Leerlaufstromes erhöht.

Im Transformatorenbau werden heute allgemein Eisenbleche von 0,35 bzw. 0,50 mm Dicke verwendet, die mit Silizium legiert werden. Die *Siliziumlegierung* bewirkt einen höheren elektrischen Widerstand des Eisens, wodurch die Wirbelstromverluste weiter verringert werden, ohne daß die magnetischen Eigenschaften darunter leiden. Die Legierung des Eisenbleches mit Silizium gehört zu den grundlegenden Erfindungen der Transformatorentechnik. Ihre **Bedeutung wird klar, wenn Sie erfahren, daß die Verlustziffer v_{10} .**

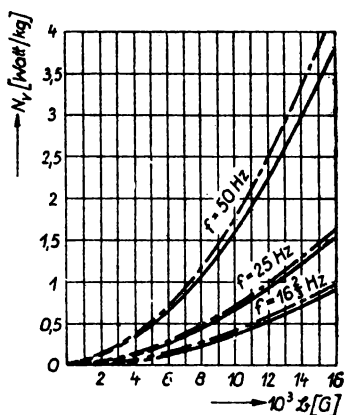


Bild 13. Eisenverluste von Dynamo-blechen in Abhängigkeit von der Frequenz

— · — · — 0,50-mm-Blech

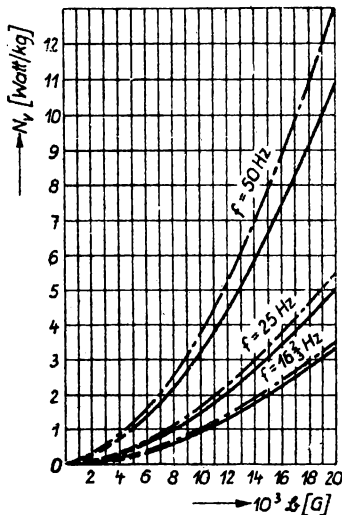


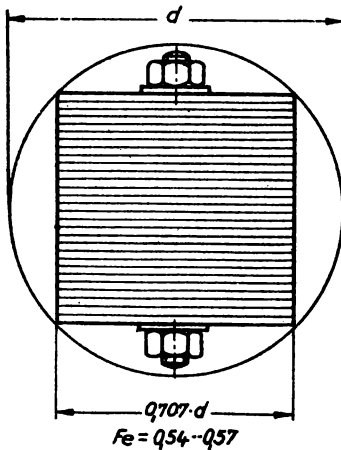
Bild 14. Eisenverluste von Dynamo-blechen in Abhängigkeit von der Frequenz

0,35-mm-Blech

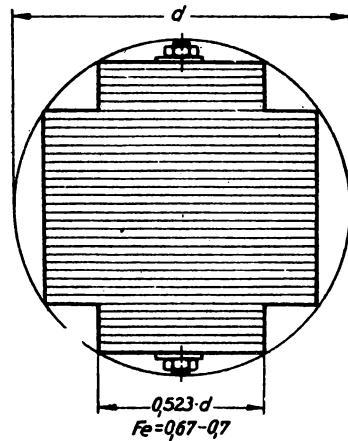
bei Verwendung von Eisenblechen, mit Silizium legiert, von 5 Watt je kg bis auf etwa 1 Watt je kg zurückgingen. Die Hysteres- und Wirbelstromverluste faßt man zusammen in der Verlustziffer. Wird diese Ziffer z. B. auf 10000 G und 50 Hz bezogen, so erhält sie die Größe v_{10} (Bild 13). Bei 15000 G und 50 Hz dagegen ergibt sich v_{15} (Bild 14), d. h., der Index gibt die Größe der Induktion an. Die Bilder 13 und 14 bieten mit ihren Kurven ein anschauliches Bild der Verluste.

Es ist außerordentlich wichtig, daß die Bleche sorgfältig voneinander isoliert werden, denn die geringste Berührungsfläche ermöglicht wieder eine Ausbreitung der Wirbelströme auf die Nachbarbleche. Ganz besonders muß auch darauf geachtet werden, daß bei den Blechen der Stanzgrat beseitigt ist. Es genügt bereits eine geringe Verletzung der Papierisolation, um eine Strom-

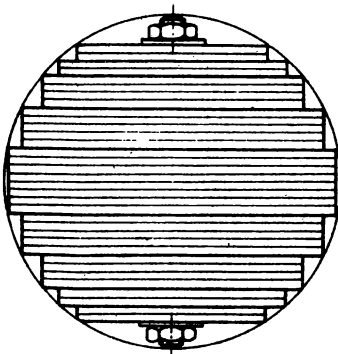
übergangsstelle von einem Blech zu dem nächsten zu schaffen. Diese Stelle kann sich so stark erwärmen, daß eine Sinterung eintritt und mehrere Bleche zusammenbacken. Da die Spannungsdifferenzen gering sind und nur Bruch-



a



b



c

Bild 15. Schenkelquerschnitte für kleinere Leistungen

teile von einem Volt betragen, kann die Isolierschicht aus einseitig aufgeklebtem, dünnem Seidenpapier bestehen, aus einer gleichmäßig aufgetragenen Lackschicht oder aus einem Anstrich mit Wasserglas.

Die isolierten Bleche werden zu Paketen zusammengeschichtet nach einem gegebenen Schichtplan, der sich einmal auf den Kernquerschnitt bezieht, zum anderen auf das Zusammenfügen der Kernsäulen mit den Jochbalken. In Bild 15a ist der Kernquerschnitt quadratisch gezeichnet. Das ist der einfachste und billigste Kernquerschnitt, der vorwiegend beim Bau von kleinen und kleinsten Transformatoren angewendet wird. Die qua-

dratische Form steht aber im Widerspruch zur Kreisform der Wicklung, die bei Mittel- und Großtransformatoren durch wirtschaftliche und fabrikatorische

Gründe bedingt ist. Die Fläche eines Quadrates füllt ja bekanntlich die Fläche des umschriebenen Kreises nur zu 64 % aus. Um einen besseren „Füllfaktor“ zu bekommen, ist es notwendig, sich der Kreisform auch im Kernquerschnitt möglichst anzunähern. Das gelingt durch entsprechende Abstufung der einzelnen Blechpakete, wie Sie aus den Querschnittzeichnungen der Bilder 15 a, b, c ersehen. Bei den Kernen der Großtransformatoren wird die Abstufung so weit getrieben, daß die Kreisform praktisch erreicht ist, so daß der Füllfaktor φ_e bis 85 % betragen kann.

Bei Großtransformatoren werden die einzelnen Blechpakete voneinander distanziert, um Kühlkanäle zu schaffen. Unter Umständen ist es sogar notwendig, den Kern nochmals quer zur Schichtebene aufzuteilen, um die ent-

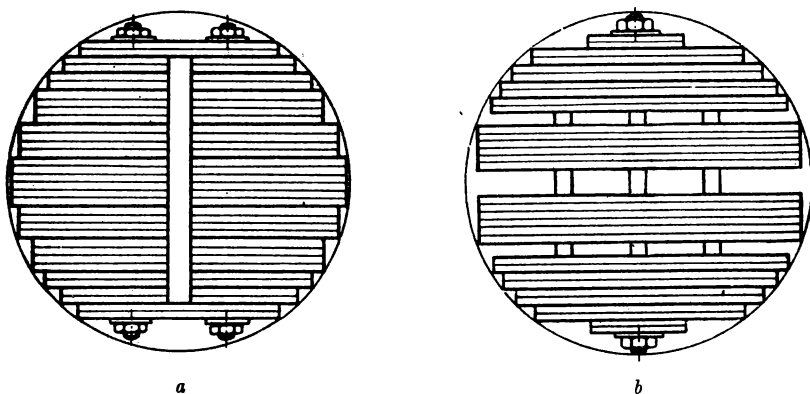


Bild 16. Schenkelquerschnitte für große Leistungen

stehende Verlustwärme abführen zu können. Entsprechende Kernquerschnitte ersehen Sie aus den Bildern 16a und b.

Beim Zusammenbau der Eisenkerne haben Sie noch ein weiteres wichtiges Moment zu beachten: die *Stoßfugen* zwischen den Blechenden. Stoßfugen bedeuten stets einen Luftspalt, der für den magnetischen Fluß einen großen Widerstand darstellt und der unerwünscht ist, weil er den Magnetisierungsstrom (Leerlaufstrom) erhöht. Man hilft sich durch Überblattung der einzelnen Bleche. Säulen und Joche werden abwechselnd aus längeren und kürzeren Blechen überlappt verschachtelt, so daß am Ende eines Bleches die Induktionslinien über die großen seitlichen Berührungsflächen durch die hauchdünne Isolierschicht hindurch jeweils in die beiden Nachbarbleche übertreten können. In Bild 17 sehen Sie das einfache Schema einer solchen Verzapfung der Säulen

mit den Jochen. Die beiden nebeneinandergezeichneten Blechlagen kommen abwechselnd aufeinanderzuliegen.

Bei Transformatoren, bei denen oft die Spulen ausgewechselt werden (z. B.

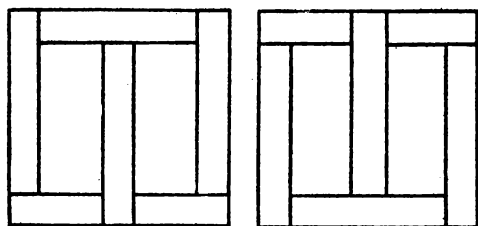


Bild 17. Schema der Verschachtelung von Schenkel und Joch

Versuchstrafos im Unterricht), läßt man Schenkel und Joche stumpf aufeinanderstoßen und preßt sie durch Spannschrauben zusammen. Bild 18 zeigt Ihnen diese Anordnung.

Schenkel und Joche aller kleinen und mittleren Transformatoren werden in der beschriebenen Form verschachtelt. Bei Großtransformatoren

hat man aus Montagegründen lange Zeit die getrennte Schichtung von Kernen und Jochen bevorzugt, die dann nach der Fertigstellung unter Zwischenlage einer dünnen Mikanitschicht oder Preßspanplatte mit stumpfem Stoßzusammengesetzt werden. Der magnetische Kreis erhält dabei mehrere Luftstrecken. Diese haben zwar nur geringe Längen, sie reichen jedoch aus, um den Magnetisierungsstrom im Vergleich zu einem gleich großen verschachtelten Magnetgestell merklich zu erhöhen. In der Fabrikation wird erst einmal der Kern ohne

Wicklung zusammengeschachtelt, um die Leerlaufverluste zu messen. Es müssen also, um die Wicklungen einzubauen, die Bleche des oberen Joches wieder aus der Verschachtelung herausgenommen werden, um dann Stück für Stück wieder eingesetzt zu werden. Auch bei Reparaturen ist die gleiche zeitraubende Handhabung nicht zu vermeiden. Der wirtschaftliche Vorteil des geringeren Magnetisierungsstromes gleicht jedoch den Mehraufwand bei der Fertigung und bei der Montage wieder aus. Die geschichteten Blechpakete werden durch verschiedene Preßrichtungen fest und dauerhaft verspannt, um

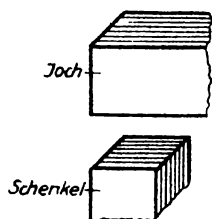


Bild 18. Lösbare Verbindung von Joch und Schenkel

jedes Schwingen im *Rhythmus* der Frequenz sowie das dadurch hervorgerufene Brummen zu vermeiden. Bei großen Kernen sind hierzu zahlreiche über die ganze Schenkel- und Jochlänge verteilte Spannbolzen nötig, die isoliert durch das Blechpaket hindurchgeführt werden. Die Spannbolzen müssen isoliert sein, da die Isolation der einzelnen Bleche wegen der Gefahr der Wirbelströme und des Eisenbrandes keinesfalls überbrückt werden darf. Aus dem gleichen Grunde werden auch alle für die Verspannung der Kerne

erforderlichen Distanzstücke und Preßplatten möglichst aus unmagnetischem Material hergestellt. Wenn Eisenteile verwendet werden, müssen sie aus den bekannten Gründen längs unterteilt werden. Bei mittelgroßen Transformatoren genügen einfachere Kernverspannungen in Form von Hartholzdübeln (Bild 19), Schrauben oder Nieten. Bei kleineren Transformatoren bis zu einigen 100 kVA kann man sogar die Bolzen ganz weglassen und sich mit einer Umbandelung

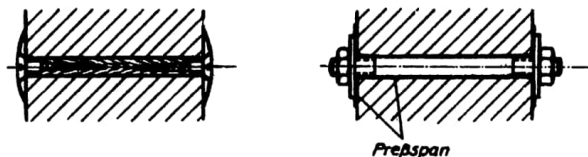


Bild 19. Preßschrauben bei kleinen Transformatoren

der Kerne begnügen, sofern der innere Isolierzylinder der Wicklung gleichzeitig den mechanischen Zusammenhalt mit übernehmen kann.

Die Joche werden bei Transformatoren mittlerer Größe zwischen Hartholzbalken oder mit U-Eisenträgern bzw. mit Winkleisen verspannt (Bild 20). Dabei ist darauf zu achten, daß die Preßschrauben außerhalb der magnetischen Felder zu liegen kommen, um die Isolierung der einzelnen Bleche nicht zu überbrücken. Bei Klein- und Kleinsttransformatoren, die vorzugsweise als Einphasen-Transformatoren und oft als Manteltypen gebaut werden, läßt sich auch der ganze Eisenkern zwischen zwei isolierte Preßplatten einspannen, wobei der Wickelraum frei gelassen wird. Die Preßkonstruktion kann gleichzeitig als Ständer ausgebildet sein oder anderen Konstruktionsteilen angepaßt werden.

Es ist selbstverständlich, daß bei größeren Transformatoren auch für eine entsprechende Standfestigkeit des Eisenkernes gesorgt werden muß.

Soweit es sich um luftgekühlte Transformatoren (Trockentransformatoren) handelt, ist das verhältnismäßig einfach zu erreichen durch eine Verschraubung mit

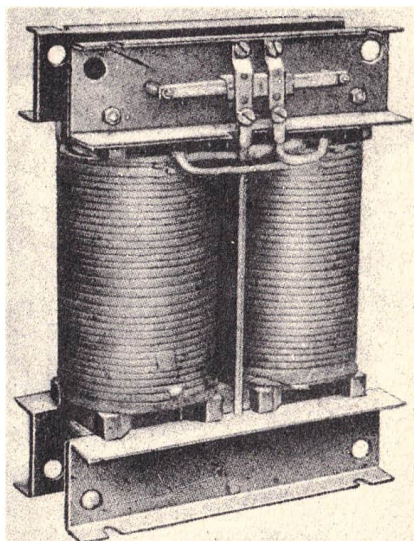


Bild 20. Preßvorrichtung bei mittleren und größeren Transformatoren

Winkel- oder U-Eisen. Bei Transformatoren, die als Öltransformatoren in Gefäße eingebaut werden, wird der Eisenkern — an den Spannbolzen hängend — mit dem Deckel des Gefäßes verbunden, so daß er den Gefäßboden entlastet. Die Spannbolzen werden dabei so eingestellt, daß der Kern den Boden nur berührt. Zusätzlich erhält der Kern Seitenabstützungen, damit er sich während des Transportes nicht verschieben kann.

Zusammenfassung

Es gibt Kern- und Manteltransformatoren. Die letzteren haben einen geringen Streufluß. Ihre wirtschaftliche Anwendung beschränkt sich auf das Gebiet der Kleintransformatoren.

Kerntransformatoren werden für Einphasenstrom mit 2 Schenkeln und für Drehstrom mit 3 Schenkeln gebaut. Drehstrom-Großtransformatoren werden bei Grenzleistungen mit 5 Schenkeln ausgestattet, um die Bauhöhe zu verringern.

Der Eisenkern ist aus isolierten Eisenblechen, mit Silizium legiert, aufgebaut. Bei Transformatoren kleiner Leistung wird der rechteckige Kern bevorzugt, für große Leistungen wird der Kernquerschnitt abgestuft. Die Befestigungsschrauben müssen, wenn sie im magnetischen Kreis liegen, von den Blechen isoliert sein. Bei Öltransformatoren wird der Kern mit dem Gefäßdeckel verbunden und gegen die Kesselwände distanziert.

3. Kapitel: Die Wicklungen

Die Wicklung besteht aus zwei Windungsgruppen: der Primär- und der Sekundärwicklung. Sie erinnern sich der Definition in [2]. Die Spannungen der beiden Wicklungen stehen im Verhältnis ihrer Windungszahlen, die durchfließenden Ströme im umgekehrten Verhältnis. Die räumliche Bemessung der Wicklungen hinsichtlich ihrer Drahtquerschnitte, Spulendurchmesser und Spulenlänge richtet sich also nach den Spannungen und Stromstärken, für die die einzelnen Wicklungen ausgelegt werden. Dabei sind die verschiedenen Verwendungszwecke der Transformatoren zu beachten.

[7] Anwendung der Transformatoren in der Niederspannungs- und Fernmeldetechnik. Das Anwendungsgebiet der Transformatoren ist sehr umfangreich. Es beschränkt sich nicht nur auf die Energieübertragung vom Kraftwerk über die Umspannwerke zum Ortsnetz, sondern erstreckt sich auch auf die Verteilung elektrischer Energie bis zum Endverbraucher in jedem Haus. Mit der Verbrauchsspannung von 380 V bei Drehstromanschluß bzw. 220 V bei Einphasenanschluß ist die Grenze noch nicht erreicht. Diese Spannungen sind für zahlreiche Verwendungszwecke in der Werkstatt und im

Haushalt noch viel zu hoch, so daß sie weiter herabgesetzt werden müssen, z. B. für Kleinspannungsanlagen als Schutzmaßnahme gegen das Auftreten einer zu hohen Berührungsspannung auf 42 V (VDE 0100 § 3e), für Spielzeugtransformatoren auf 24 V (VDE 6550 § 19) und für Klingeltransformatoren auf 4...8 V. Stellen Sie Ihren Rundfunkapparat an, so setzen Sie, je nach Art Ihres Gerätes, einen oder mehrere Transformatoren in Betrieb, die teils dazu dienen, die Heiz- und Anodenspannungen zu gewinnen, teils als „Übertrager“ den Lautsprecher an die Endröhre anzupassen. Sie finden sogar Transformatoren in Schraubfassungen oder in Stecker eingebaut, die es gestatten, Kleinstleuchten mit 4-V-Glühlampen zu benutzen. Diese Transformatoren dürften wohl die kleinsten sein, die für direkten Anschluß an das 220-V-Wechselstromnetz hergestellt werden. Bild 21 zeigt Ihnen einen solchen Kleinsttransformator für Steckereinbau (mit abgehobener Schutzkappe), bemessen für das Übersetzungsverhältnis 220/4 V bei einer Sekundärstromstärke von 0,3 A. Zum Größenvergleich ist links ein normaler Klingeltransformator mit dem Übersetzungsverhältnis 220/8 V und einer Sekundärstromstärke von 1 A zu sehen.

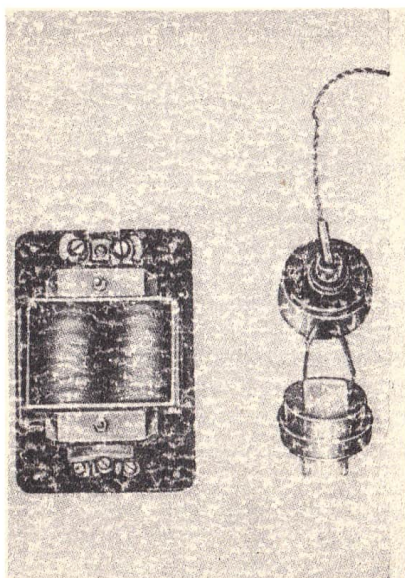


Bild 21. Kleiner Transformator für Steckereinbau

Betrachten Sie die Gleichrichter-Apparatur zum Aufladen von Autobatterien oder Notbeleuchtungsanlagen,

so sehen Sie einen kleinen Transformator, der die Netzspannung auf die vom Gleichrichter benötigte Wechselspannung herabtransformiert.

Auf dem Gebiet der Fernmeldetechnik finden Sie ebenfalls Transformatoren oder „Übertrager“, wie sie dort genannt werden. Im Fernspreckverkehr werden z. B. ringförmige Übertrager entsprechend der Urform des FARADAYschen Ringes verwendet, wie in Bild 22 dargestellt.

Solche Übertrager werden angewendet, um Leitungen für Sprechströme induktiv miteinander zu verbinden. Das ist ein ganz anderes Anwendungsgebiet. Es erscheint zunächst denen ungewöhnlich, die nur an Starkstrom

denken. Der Zusammenhang wird Ihnen jedoch klarwerden, wenn Sie daran denken, daß die Sprechströme auch wechselnde Ströme sind, die sich transformieren lassen. Was wäre die Funktechnik ohne Transformatoren? In der Sender-, Empfänger- und Verstärkertechnik werden im großen Ausmaß Transformatoren benötigt, sei es als Eingangs-, Ausgangs-, Zwischentransformator

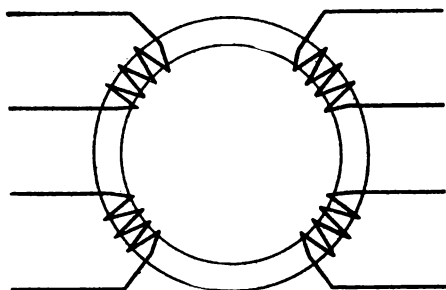


Bild 22. Übertrager

usw. Jeder einzelne Transformator dient dazu, die verschiedensten Konstruktionselemente der Geräte mit den zweckmäßigsten Spannungen zu betreiben, so daß eine optimale Wirkung erreicht wird.

[8] Die natürlichen Grenzen des Transformators in der Hochfrequenz- und Hochspannungstechnik. In der Starkstromtechnik arbeitet man mit Wechselstrom

von 50 Hz, in der Fernmeldetechnik dagegen mit höheren Frequenzen. Man unterscheidet hier zwischen *Niederfrequenz*, *Tonfrequenz* und *Hochfrequenz*. Wechselstrom von 50 Hz wird als Niederfrequenz bezeichnet. Tonfrequenz ist der Bereich der hörbaren Frequenzen bis etwa 20000 Hz. Frequenzen über 20000 Hz bezeichnet man als Hochfrequenz. Bei diesen Frequenzen sind die Ummagnetisierungsverluste in den Transformatorenblechen unwirtschaftlich hoch. Die Hochfrequenztechnik verwendet deshalb für ihre Transformatoren Spezialkerne aus zusammengepreßtem Eisenpulver. Somit ist die Grenze für Transformatoren unter Verwendung von üblichen Transformatorenblechen in bezug auf Höhe der Frequenz bei etwa 20000 Hz erreicht.

Es werden Transformatoren für Prüfzwecke gebaut, die eine Sekundärspannung von 750 kV, ja bis 1000 kV haben. Größere Spannungen bereiten isolationsmäßig Schwierigkeiten. Werden noch höhere Spannungen benötigt, so muß man zu der sogenannten Kaskadenschaltung übergehen. Der erste Transformator speist mit seiner Sekundärspannung die Primärspule des zweiten Transformators, der auf Isolierstützen steht, damit er nicht voll gegen Erde isoliert sein muß. Wenn z. B. 3 Transformatoren (I, II und III) von je 1 MV hintereinandergeschaltet sind, so kann jedesmal die gleiche Transformorentype mit der gleichen Wicklungsisolation und der gleichen Isolation gegen das Gehäuse verwendet werden. Der Transformator II ist auf Isolierstützen gestellt, die gegen Erde für eine Isolationsfestigkeit von 1 MV gebaut sind, so daß zwischen Gehäuse und Wicklung sekundärseitig nur eine Isolation

von 1 MV nötig ist. Der Transformator III muß dann eine Stützerisolation von 2 MV haben, so daß die Restspannung gegen Erde 1 MV beträgt, also die gleiche Isolation wie bei den vorhergehenden Transformatoren vorhanden ist. Bild 23 zeigt Ihnen eine Kaskadenschaltung, wobei Transformator I und II den gleichen Wicklungsaufbau besitzen (Übertragungswicklung), jedoch Transformator III nicht. In den späteren Lehrbriefen „Transformatoren“ werden diese Schaltarten noch genauer beschrieben.

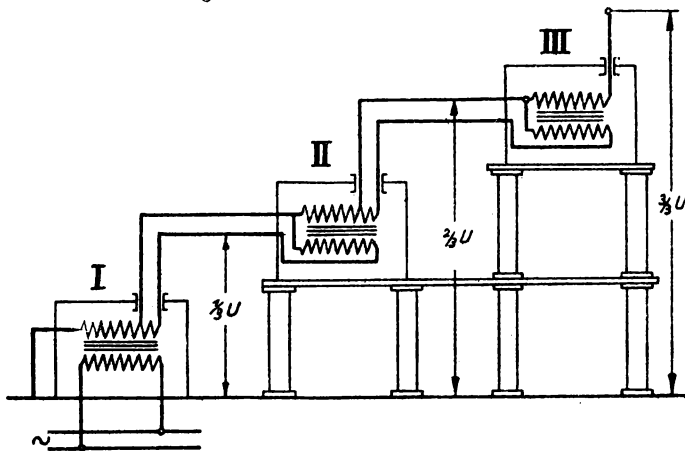


Bild 23. Kaskadenschaltung

[9] Wicklungsanordnung und Wicklungsformen. Aus dem großen Anwendungsgebiet der Transformatoren erkennen Sie, daß die Probleme für die Konstruktion und den Aufbau der Transformatorenwicklungen sehr vielseitig sind. Es ist ein gewaltiger Unterschied, ob der Wicklungsaufbau nur für Spannungen von wenigen Volt bei den Kleintransformatoren oder für hohe Spannungen von einigen 1000...100000 V und darüber zu bemessen ist. Es ist ferner ein Unterschied, ob ein kleiner Strom oder Strom für ganze Versorgungsgebiete aus der Sekundärwicklung entnommen werden soll. Nach der Spannungshöhe und der Stromstärke hat sich der Aufbau der Wicklungen zu richten. Im folgenden sollen Sie die verschiedenen Arten der Wicklungen mit ihren Vor- und Nachteilen kennenlernen.

Bei Kleintransformatoren finden Sie Kern- und Manteltransformatoren. Sie können beim Kerntransformator die Primär- und die Sekundärwicklung gemeinsam auf einen Schenkel wickeln (Bild 24) oder auch die Primär- und die Sekundärwicklung getrennt auf je einen Schenkel (Bild 25).

Wie bereits erwähnt, benötigt die zweite Anordnung weniger Wickelmaterial als die erste, da die mittlere Windungslänge l_m kleiner ist. Beim Manteltrans-

formator wird nur der Mittelschenkel bewickelt. Die äußeren Schenkel dienen zum magnetischen Rückschluß. Bei Transformatoren größerer Leistung wird, von einigen Sonderfällen abgesehen, nur die Kernbauweise angewendet.

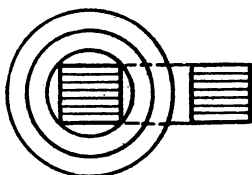


Bild 24. Einschenkelwicklung

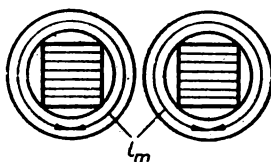


Bild 25. Zweischenkelwicklung

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten für die Anordnung der Wicklung auf dem Schenkel, die in Bild 26 und 27 dargestellt sind.

Wenn die Primär- und die Sekundärwicklung konzentrisch ineinanderstehen, ergibt sich eine zylindrische Trennfläche. Man bezeichnet diese Wicklungsanordnung sinngemäß als **Zylinderwicklung**.

Wenn die Primär- und die Sekundärwicklung abwechselnd als ringförmige Flachspulen axial übereinandergeschichtet werden, so ist die Trennfläche zwischen den Spulen scheibenförmig. Eine solche Wicklungsanordnung wird als **Scheibenwicklung** bezeichnet.

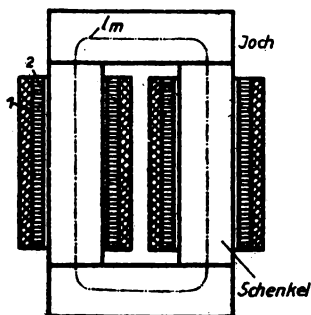


Bild 26. Zylinderwicklung

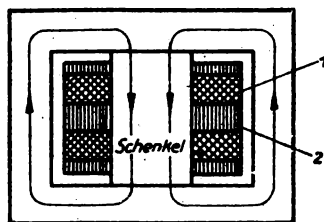


Bild 27. Scheibenwicklung

Aus Gründen der Symmetrie und im Hinblick auf die einfachere Isolation gegen den Eisenkern ordnet man bei der Scheibenwicklung als Endspule zwei Halbspulen der Unterapannungswicklung an. Die Scheibenwicklung bedingt, daß jede Oberspannungsspule gegen die benachbarte Unterspannungsspule voll isoliert sein muß. Das kann bei höheren Spannungen nur mit viel Aufwand an Isoliermaterial und Isolierraum erreicht werden, so daß diese Wicklungsart

im Vergleich zur Zylinderwicklung wirtschaftlich im Nachteil ist. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, wird sie bei Hochspannungstransformatoren heute kaum noch angewendet.

Für die zylindrische Wicklungsanordnung gibt es verschiedene Wicklungsformen, deren Ausführungsart zu Spezialbezeichnungen geführt hat. Man unterscheidet *Röhrenwicklung* und *Spulenwicklung*, ferner *Lagenwicklung*, *verstärzte Wicklung* und *Wendelwicklung*. Da die verstärzte Wicklung und die Wendelwicklung Spezialkenntnisse verlangen, werden diese zwei Wicklungsarten in einem späteren Lehrbrief behandelt.

Die *Röhrenwicklung* ist die einfachste Form der Zylinderwicklung. Sie wird auf der Wickelbank einlagig oder zweilagig fortlaufend über die ganze verfügbare Wickellänge so gewickelt, daß Windung neben Windung zu liegen kommt. Bei der Verwendung von Runddraht muß zur Versteifung des Wickelkörpers auf eine Isolierhülse gewickelt werden. Bei profilierten Drähten, wie sie bei starken Querschnitten als Rechteckdrähte allgemein üblich sind, kann die Röhrenwicklung mit genügender Festigkeit auch selbsttragend hergestellt werden. Die Niederspannungswicklungen unserer normalen Netztransformatoren für 400 V Drehstrom werden ausschließlich in dieser einfachen Form als Röhrenspulen angefertigt.

Bei der *Spulenwicklung* wird die Wicklung in Einzelspulen unterteilt. Diese werden axial übereinandergeschichtet und in Reihe geschaltet. Jede Teilspule hat einen Anfang und ein Ende, die bei Reihenschaltung entsprechend geschaltet und verlötet werden müssen. Wenn Sie das nach dem Aufstecken der Spulen tun wollten, müßten Sie die inneren Wicklungsenden — jeweils an den darüberliegenden Windungen vorbei — nach außen herausleiten. Das würde zusätzlich Isolation und Platz beanspruchen.

Wie können Sie sich da helfen? Sie stellen Doppelspulen her, die Sie aus zwei Einzelspulen zusammensetzen, welche vorher innen verlötet und isoliert werden. Dann haben Sie nur die äußeren Enden nachträglich zusammenzuschalten und zu isolieren. Bild 28 zeigt eine solche Doppelspule. Der gleiche Gedankengang führt noch einen Schritt weiter. Statt der Einzelspulen wickeln Sie sämtliche Teilspulen eines Schenkels auf einen gemeinsamen

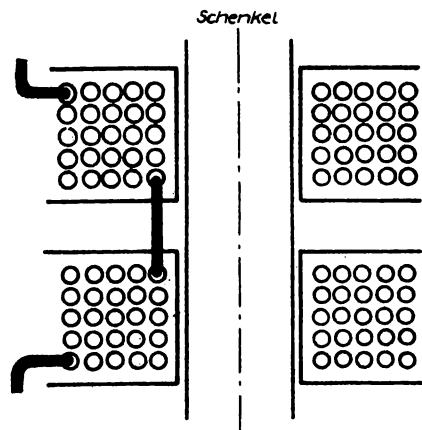


Bild 28. Spulenwicklung

Isolierzylinder, wobei Sie abwechselnd eine Spule rechts wickeln und die entsprechende Nachbarspule links. Sie erhalten dann eine *röhrenförmige Spulenwicklung* mit nur zwei Wicklungsenden, die montagefertig auf der Wickelbank hergestellt wird. In der Praxis werden zuerst alle Rechtsspulen gewickelt, dann alle Linksspulen. Die noch nicht bewickelten Zwischenräume werden jeweils mit Holzschablonen ausgefüllt.

Bei allen Hochspannungswicklungen der serienmäßig fabrizierten Transformatoren mit Spannungen von 6000...30000 V hat sich diese Wicklungsform wegen ihrer einfachen Montage sehr bewährt. Der Zusammenbau von Hochspannungs- und Niederspannungswicklung geht so vor sich, daß erst die Niederspannungswicklung fertiggestellt, dann die Zusatzisolation gegen die Hochspannungswicklung angelegt und darauf die Hochspannungswicklung aufgeschoben wird. Diese Wicklungsanordnung bezeichnet man auch als *einfach-konzentrische Wicklungsanordnung* (Bild 29).

Bei der *doppelt-konzentrischen Wicklungsanordnung* wird die Niederspannungswicklung in zwei Wicklungszyylinder aufgeteilt, die innerhalb und außerhalb der Hochspannungswicklung stehen. Der Vorteil dieser Maßnahme besteht darin, daß die Bauhöhe des Transformators herabgesetzt wird. Sie erhalten bei der doppelt-konzentrischen Anordnung drei Wicklungs-

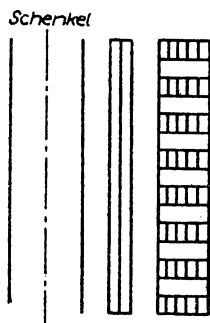


Bild 29. Einfach-konzentrische Wicklungsanordnung

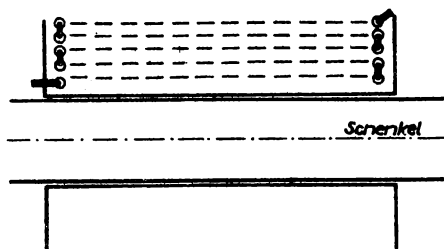


Bild 30. Lagenwicklung

zylinder auf jedem Schenkel. Die Anzahl dieser konzentrisch angeordneten Wicklungen kann ohne Schwierigkeiten erhöht werden, wie das bei Dreiwicklungs-Transformatoren und anderen Mehrwicklungs-Transformatoren geschieht. Dreiwicklungs-Transformatoren werden z. B. dann benötigt, wenn zwei Hochspannungsnetze mit verschiedenen Spannungen von einer Kraftwerks-Sammelschiene gespeist werden sollen. In einem solchen Falle wird man zweckmäßig die für die Generatorspannung von 6 kV oder 10 kV bemessene Primärwicklung in die Mitte zwischen die beiden Hochspannungswicklungen legen.

Die *Lagenwicklung* ist nichts anderes als eine mehrlagige Röhrenwicklung (s. Bild 30). Sie verbindet die fabrikatorischen Vorteile bei der montagefertigen Herstellung der einfachen Röhrenwicklung mit einer größeren Sicherheit gegen Überspannungen. (Dazu Näheres in den folgenden Lehrbriefen über Transformatoren.)

Die besprochenen Wicklungsanordnungen und Wicklungsformen werden bei den Einphasen- und bei den Mehrphasenwechselströmen angewendet.

[10] Wicklungsaufbau. Die in [9] beschriebenen Wicklungsarten müssen ihre jeweiligen Vorteile verbinden mit einer großen mechanischen Festigkeit des Aufbaus, der den oft sehr rauen Betriebsanforderungen gewachsen sein muß. Als Wicklungsmaterial hat sich in der Transformatorentechnik wie im gesamten Elektromaschinenbau Kupfer weitaus am besten bewährt. Die Transformatorenwicklung ist nicht nur ein unter Spannung stehender Leiter, sie muß vielmehr in besonderem Maße den Stromkräften gewachsen sein, die bei Schaltungen und Belastungen im Betrieb auftreten. Bei Überlastungen und bei Kurzschlüssen entstehen zusätzlich dynamische Kraft- und Wärmewirkungen, die ein hohes Maß mechanischer Festigkeit des Wicklungsmaterials und des Wicklungsaufbaus voraussetzen.

Wie wirken die Stromkräfte? Bild 31 zeigt Ihnen eine Windung. Aus „Grundlagen der Elektrotechnik“ Lehrbrief 7 wissen Sie, daß die Kraft P nach folgender Formel berechnet wird:

$$P = 2,04 \cdot \frac{l}{a} \cdot I^2 \cdot 10^{-8} \text{ [kg]}$$

wobei l die Leiterlänge und a der Leiterabstand ist.

Die Spule erleidet somit eine Beanspruchung auf Biegung. Um die Kraftwirkung zu vermindern, werden größere Transformatoren mit rundem Kernquerschnitt gebaut. Kraftwirkungen treten ebenfalls zwischen den einzelnen Windungen auf. Bei der Konstruktion des Wicklungsaufbaus und bei der Anfertigung der Einzelwicklungen auf der Wickelbank müssen demnach zur Beherrschung dieser Kräfte ausreichend Abstützungen zwischen den Wicklungen und innerhalb der Wicklungen vorgesehen werden, um ein gegenseitiges Verschieben und Verformen von Wicklungsteilen zu verhüten.

Runddrahtwicklungen sind bei Belastung schwieriger zu beherrschen als Wicklungen aus Profildraht, dessen Windungen gleichmäßiger aufeinanderliegen. Wicklungen aus dünnen Runddrähten werden aus diesem Grunde zusätzlich durch Bandagen sowie durch eine Tränkung mit Speziallack befestigt. Dadurch werden die einzelnen

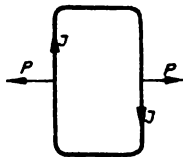


Bild 31. Stromkräfte einer Windung

Windungen gut miteinander verbunden, so daß die gesamte Spulenwicklung eine mechanisch widerstandsfähige Einheit bildet.

Wie der Wicklungsaufbau eines Drehstrom-Transformators in der Werkstatt vor sich geht, erkennen Sie sehr instruktiv aus Bild 32. Dort ist der Aufbau eines Netztransformators von 100 kVA dargestellt.

Der rechte Schenkel ist noch völlig unbewickelt. Über den mittleren Schenkel wurde nur die Unterspannungswicklung aufgeschoben. Auf dem linken Schenkel,

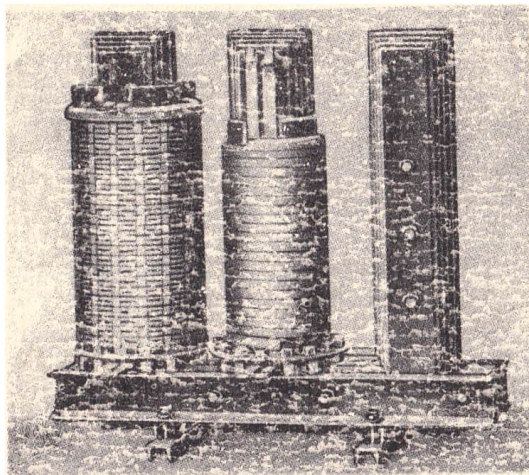


Bild 32. Aufbau eines 100-kVA-Transformators

der beide Wicklungen trägt, ist deutlich zu sehen, wie die Hochspannungs-Zylinderwicklung konzentrisch gegen die

Niederspannungswicklung distanziert ist. Gut zu sehen sind auch die Abstützteile zwischen den Wicklungen und den unteren Jochbalken.

Sie hatten beim Kernaufbau bereits erfahren, daß das Schwingen der Kernbleche durch Spann- und Preßvorrichtungen verhindert wird. Beim Wicklungsaufbau der

Transformatoren ist die gleiche Vorsorge notwendig. Die Wicklungen jedes einzelnen Schenkels müssen unter Zwischenlage von isolierenden Abstützungen gegen die oberen und unteren Joch so stark verspannt werden, daß eine Bewegung — selbst durch die Einwirkung von Kurzschlußkräften — nicht mehr möglich ist. Ungenügende Verspannung der Wicklung oder eine im Laufe der Zeit allmählich gelockerte Verspannung bei älteren Transformatorenkonstruktionen ist schon oft die Ursache von Windungskurzschlüssen geworden. Wenn auf eine locker sitzende Wicklung Überstrom- bzw. Kurzschlußstromkräfte im Rhythmus der Netzfrequenz einwirken, dann kann durch diese kräftige Vibration sehr bald die Isolation durchgescheuert werden, so daß Windungsschluß auftritt.

Wie die Wicklungen bei Transformatoren kleiner und mittlerer Leistung verspannt werden, ersieht Sie aus Bild 33, das einen Blick auf das Fließband einer Transformatorenfabrik gewährt. Die Abstützung und Verspannung der Wicklungszylinder geschieht durch die unteren und oberen Jochbalken.

mit deren Hilfe gleichzeitig die Jochbleche zusammengepreßt werden. Sie erkennen deutlich die Oberspannungswicklung, aufgeteilt in Einzelspulen mit ihren äußeren Wicklungsenden, die noch nicht zusammengelötet sind. Bei Großtransformatoren sind für das Festhalten der Wicklungen erheblich größere Spannkkräfte nötig, die bis zu mehreren Tonnen betragen können. Dabei entsteht natürlich die Gefahr, daß durch ein Übermaß dieser Vorspannkkräfte die Windungsisolationsgequetscht und eventuell geschwächt wird. Diese Erkenntnis hat dazu geführt, daß bei Spulenwicklungen, insbesondere bei Flachspulen, druckentlastende Einlagen aus Hartpapier eingewickelt werden, die den Preßdruck aufnehmen. Für die Preßvorrichtungen bei Großtransformatoren kommt man wegen der erforderlichen Preßdrücke natürlich nicht mehr mit Holz aus. Es werden eiserne Spannbolzen und Preßrahmen erforderlich, die auch eine Nachspannmöglichkeit bieten müssen, um das altersmäßige bedingte Schwinden des Wicklungsaufbaus ausgleichen zu können. Die bei Großtransformatoren erforderliche Preßkonstruktion erkennen Sie deutlich in Bild 34.

Es stellt eine Serie Einphasentransformatoren mit je 10 MVA Einzelleistung dar. Die aufgesetzten Spulenpreßrahmen stehen unter dem Druck der in der Mitte sichtbaren Spannfedern.

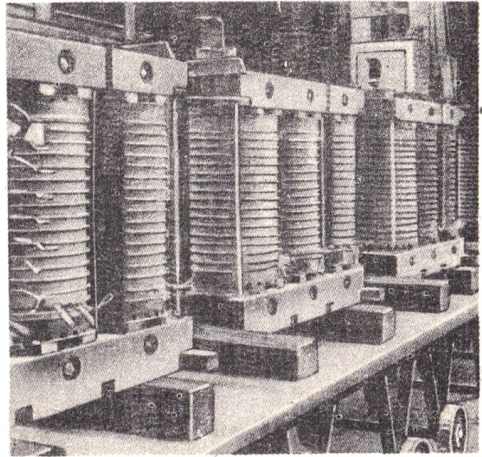


Bild 33. Transformator auf dem Fließband

Zusammenfassung

Das Anwendungsgebiet des Transformators erstreckt sich von der Fernmelde-technik bis zur Höchstspannungstechnik, d. h., die Grenzen sind gegeben durch die Frequenz einerseits und die Spannungshöhe andererseits.

Wicklungsanordnung und -form richten sich nach Spannung und Stromstärke. Bei der Zylinderwicklung werden die Spulen über die ganze Schenkellänge gewickelt und konzentrisch ineinandergeschoben. Bei der Scheibenwicklung werden dagegen abwechselnd Primär- und Sekundärspulen axial übereinandergeschichtet.

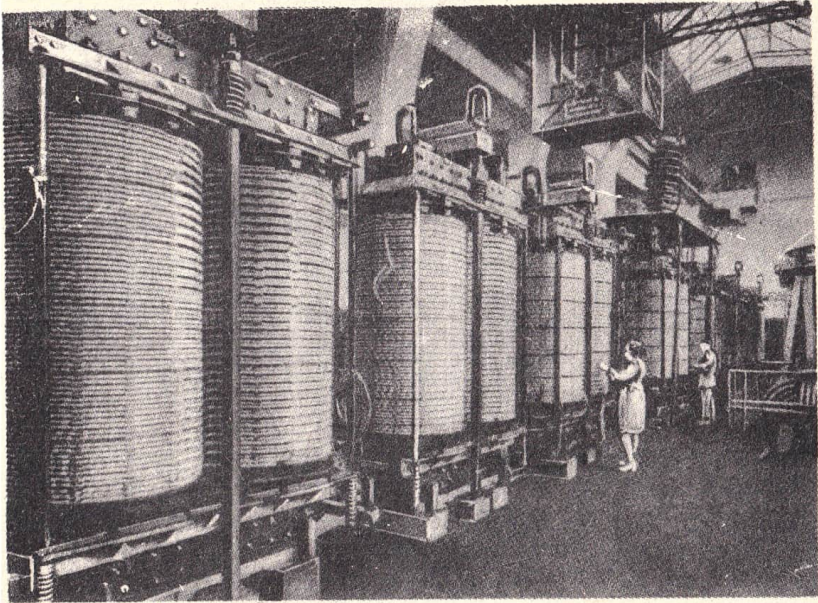


Bild 34. Montage von Einphasen-Transformatoren (10 MVA 100/6 kV mit Spulenpreßrahmen)

Die Röhrenwicklung ist eine einlagige oder zweilagige Zylinderwicklung.

Bei der Spulenwicklung wird die Wicklung in Einzelspulen unterteilt, die axial übereinandergeschichtet und in Reihe geschaltet werden. Die Lagenwicklung ist eine mehrlagige Röhrenwicklung.

Doppelt-konzentrischer Wicklungsaufbau wird bei Großtransformatoren angewendet, um die Bauhöhe herabzusetzen.

Jede Wicklung muß so aufgebaut sein, daß sie sich durch die maximalen Stromkräfte nicht deformiert. Günstigster Wicklungsquerschnitt ist der Kreis.

4. Kapitel: Isolation

[11] Windungsisolation. Als wichtigster Isolierstoff im Transformatorenbau wird Papier verwendet. Welche Eigenschaften sind es, die das Papier zu einem wirksamen Isolator machen? Das für die Isolation der Wickeldrähte verwendete Weichpapier besitzt eine hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit und eine erstaunlich gute mechanische Festigkeit und Elastizität. Es zeigt sich auch den im Transformator entstehenden hohen Wicklungstemperaturen

(bis zu 105° C) ohne Nachlassen seiner elektrischen und mechanischen Eigenschaften gewachsen. Die Papierisolation, die den weiteren Vorzug des niedrigen Preises besitzt, kann für Drähte bis zu einem Durchmesser von 0,5 mm herab angewendet werden. Unterhalb dieses Durchmessers ist es jedoch vorteilhafter, die Drähte zu lackieren und mit Baumwolle zu umspinnen.

Im Bereich der kleinen Transformatoren scheidet demnach Papier für die Leiterisolation aus. Als Lagenisolation jedoch wird es auch hier verwendet. Es findet ein um so weiteres Anwendungsgebiet bei allen größeren Transformatoren, insbesondere bei den Öltransformatoren. Das Papier ist ein Faserstoff mit guter Saugfähigkeit. Begierig saugt es das Transformatoröl auf und wird somit als Träger des elektrisch ebenso hochwertigen flüssigen Isolierstoffes zur *idealen Windungsisolation des Transformators*. Das dünnflüssige Öl erhält durch das Papierband hindurch direkten Kontakt mit der metallischen Oberfläche des Wickeldrahtes. Das ist nicht nur für die Isolation wichtig, sondern auch für die Abführung der Verlustwärme aus der Wicklung, worüber Sie im nächsten Abschnitt mehr erfahren werden. Die Saugfähigkeit besteht nicht nur für Öl, auch Wasser wird stark absorbiert. Bei Transformatoren ohne Ölfüllung wirkt sich das als Nachteil aus. Deswegen muß bei Trockentransformatoren eine besondere Feuchtigkeits-Schutztränkung vorgesehen und zweckmäßig über der Papierisolation eine Baumwollumspinnung angebracht werden, welche die Lacktränkung besser aufnimmt als Papier.

Wenn Papierfolien mit Spezialharzen getränkt und zusammengepreßt werden, erhalten Sie das sogenannte *Hartpapier*, das auch unter den Handelsbezeichnungen „Pertinax“ oder „Geax“ usw. bekannt ist. Hartpapier wird in den verschiedensten Ausführungsformen hergestellt. Es wird z. B. zu Platten gepreßt (in Stärke von wenigen Millimetern bis zu mehreren Zentimetern), aus denen quer zur Schichtung die gewünschten Formstücke herausgesägt werden. Hartpapier wird — über Dorne gewickelt — zu Rohren und Zylindern verarbeitet mit Durchmessern von einigen Millimetern bis zu weit über einen Meter. Es wird so hart und widerstandsfähig, daß es mit Hobel, Bohrer und Fräser bearbeitet werden muß. Die vorzügliche Durchschlagsfestigkeit bleibt jedoch nur erhalten, wenn es vor längeren Feuchtigkeitseinflüssen bewahrt wird.

[12] **Wicklungsisolation.** Von der Windungsisolation unterscheidet sich die *Wicklungsisolation*, welche die Wicklungen gegeneinander und gegen den Eisenkern sowie eventuell gegen das Gehäuse sichert. Der natürlichste und billigste Isolator ist die *Luft*. Von diesem Isoliermittel kann aber nur bei geringen Spannungen Gebrauch gemacht werden, so daß Sie, abgesehen von einigen Spezialtransformatoren, praktisch nur Niederspannungstransformatoren kleiner und kleinster Leistungen in der Bauart als *Trockentransforma-*

loten finden. Natürlich ist es möglich, die Luftisolation auch noch bei Hochspannungen bis zu 6000 oder 10000 V, genau wie bei Generatoren und Hochspannungsmotoren, anzuwenden. Es ist aber dabei zu beachten, daß die Isolationsfestigkeit der Luft nur so lange besteht, wie sie sauber und absolut trocken ist. Die Aufstellung von Trockentransformatoren darf daher auch nur in geschlossenen und trockenen Räumen erfolgen, die stets gleichmäßig temperiert sind. Bei höheren Spannungen mit größeren Leistungen muß der Trockentransformator durch den ölgefüllten Transformator ersetzt werden. Beim Öltransformator wird der gesamte Zwischenraum zwischen den Wicklungen untereinander sowie zwischen den Wicklungen und dem Eisenkern mit Öl ausgefüllt, das eine größere Durchschlagsfestigkeit als die Luft besitzt und den Isolationszustand der eingetauchten Wicklungen unabhängig von den äußeren Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnissen aufrechterhält.

In den „Vorschriften für Schalter- und Transformatorenöle“ (DIN 57 370 bzw. VDE 0370) sind die Bedingungen für die Öle festgelegt. Sie beziehen sich jedoch nur auf Erdöle. Die wichtigsten Bestimmungen sind:

Die Wichte soll nicht über 0,92 betragen (Freiluftanlage 0,895), der Flammpunkt im offenen Tiegel nicht unter 145°C (Freiluftapparate 120°C), der Stockpunkt soll, nicht unter -15°C liegen (bei nicht geheizten Freiluftanlagen dagegen bei -40°C).

Nach 70stündigem Erhitzen auf 120°C darf neues Öl unter Zuführung von Sauerstoff keinen benzinunlöslichen Schlamm aufweisen.

Das im Betrieb befindliche Öl darf die Durchschlagsfestigkeit von 80 kV/cm nicht unterschreiten.

Bild 35 zeigt Ihnen deutlich die Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit des Öles vom Wassergehalt. Bei 0,02‰ Wassergehalt (H_2O) ist bereits die Mindestdurchschlagsfestigkeit erreicht. Bei größerem Wassergehalt ist die Betriebssicherheit gefährdet.

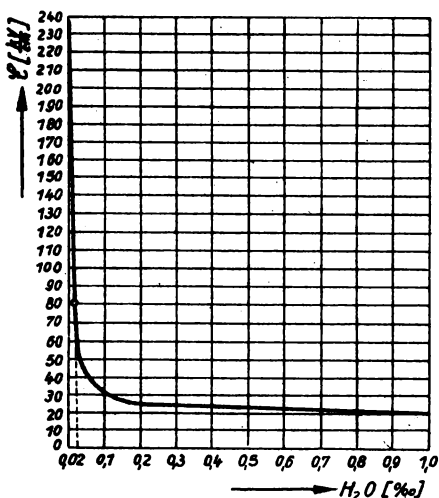


Bild 35. Durchschlagsfestigkeit von Transformatorenöl

Bei hohen Spannungen muß die elektrische Feldbeanspruchung in den Isolierräumen von vornherein oft sehr hoch getrieben werden. Das Transformatorenöl

ist dann nicht mehr allein in der Lage, einen etwaigen Spannungsdurchbruch mit Sicherheit zu verhüten. Durch die *Reihenschaltung von festen und flüssigen Isolierstoffen* gelingt es, die elektrische Festigkeit des Zwischenraumes zu erhöhen. Um diese Wirkung zu erzielen, werden Zylinder aus Hartpapier zwischen die Oberspannungs- und die Unterspannungswicklung eingesetzt, die gleichzeitig als Spulenträger verwendet werden können (s. [10]).

Bei Spannungen über 60 kV kann man außerdem durch *Kappen* und *Winkerringe* aus formgepreßtem Papier die oberen und die unteren Enden der Zylinderwicklungen gegen die Joche abschirmen, so daß durch die Einschaltung solcher Trennwände eine wesentlich größere Durchschlagsfestigkeit erzielt wird als bei freier Ölstrecke. Der wirtschaftliche Vorteil wirkt sich in der Verringerung der gesamten Bauhöhe des Transformators aus, was wiederum eine größere Typenleistung bei gleichem Raum ermöglicht.

Aus den nur andeutungsweise behandelten Isolierproblemen werden Sie erkannt haben, wie außerordentlich wichtig es bei Hochspannungs-Transformatoren ist, einen guten Isolationszustand herzustellen. Zu diesem Zweck werden die zur Fertigmontage vorbereiteten Großtransformatoren viele Stunden (bisweilen tagelang) unter Vakuum im Trockenofen von allen Luft- und Feuchtigkeitsresten befreit. Erst dann werden sie mit gefiltertem und getrocknetem Öl gefüllt. Im Betrieb ist es nicht minder wichtig, durch laufende Kontrollen die Beständigkeit des Isolationswertes und der chemischen Eigenschaften des Öles nachzuprüfen, um Schäden an den für die Energieversorgung so wertvollen Objekten zu verhüten. Sie werden später erfahren, welche Maßnahmen im einzelnen zum Schutz der Transformatoren im Betrieb angewendet werden.

[13] Außenisolation — Durchführungen. Die letzte Montagearbeit, die vor dem Einsetzen des Transformators in den Ölkessel vorgenommen wird, ist die Herausführung der Anschlußleitungen für die Ober- und Unterspannungswicklungen. Hierfür gibt es in Abhängigkeit von den zu beherrschenden Spannungen und dem Verwendungszweck verschiedene Möglichkeiten.

Bei Niederspannungs-Trockentransformatoren bieten sich keine Schwierigkeiten; die Enden der Wicklungsdrähte werden auf dem kürzesten Weg zu den *Anschlußklemmen* geführt, die bei ausschließlicher Verwendung in trockenen Räumen mit Hartpapier isoliert sein können. Aus den in Bild 36a und b dargestellten Trockentransformatoren ist die einfache Klemmenausführung zu ersehen.

Die Herausführung der Anschlußleitungen wird schwieriger, wenn der Transformator kern in einem geerdeten Gehäuse steht, wie das beim Öltransformator der Fall ist. Dann müssen die Wicklungsleitungen durch den Gefäßdeckel oder

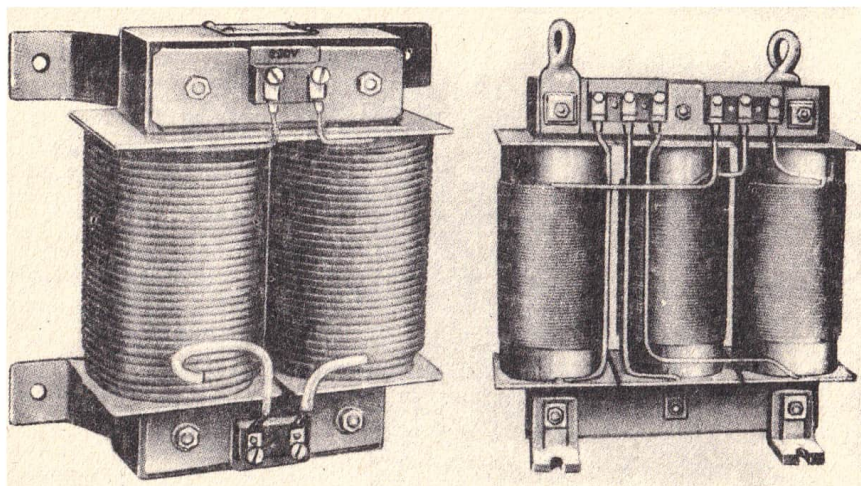


Bild 36. Trockentransformatoren

durch die Gefäßwände hindurchgeführt werden. Man braucht also *Durchführungen*.

Transformatoren-Durchführungen müssen folgende Forderungen erfüllen:

Sie müssen

- a) durch- und überschlagsfest,
- b) druck- und biegefest,
- c) ölfest und öldicht sowie
- d) wetterfest sein.
- e) Sie müssen diese Eigenschaften dauernd beibehalten.

Porzellan ist ein Isolierstoff, der bei richtiger Bemessung diese fünf Forderungen erfüllt.

Bei der sprunghaften Entwicklung der Hochspannungstechnik hat es in den ersten Jahren naturgemäß auch in der Konstruktion der Durchführungen zahlreiche Schwierigkeiten gegeben, die heute überwunden sind. Das Problem der Abdichtung bestand noch bis in die jüngste Zeit. Die Durchführungen wurden früher in gußeiserne Flansche eingekittet, die auf dem Deckel verschraubt wurden. Die verwendeten Spezialkitte hielten jedoch den Temperaturschwankungen und dem zersetzenden Einfluß des Öles auf die Dauer nicht stand. Erst nachdem es möglich geworden ist, die Porzellanhohlkörper maßhaltiger herzustellen und nachträglich Dichtungsflächen anzuschleifen, werden heute allgemein *kitlose Durchführungen* verwendet, bei denen der Porzellan-

überwurf mittels mehrerer Preßschrauben auf die ebene Flanschfläche des Gefäßdeckels aufgedrückt wird. Sie erkennen in Bild 37 deutlich den Aufbau der kittlosen Durchführungen und die Einführung der Wicklungsenden in den Hohlraum der Durchführungen.

Die ringförmigen Dichtflächen zwischen Porzellan und Eisen werden mit öl-festem Material gedichtet, wofür sich am besten Korkplatten, Klingerit oder auch wirklich ölfester Gummi eignen. Die Konstruktion der Durchführungen ist verschieden. Durchführungen für große Stromstärken mit starken Bolzen- oder Schienenausleitungen stellen andere Anforderungen an die Konstruktion als Durchführungen für hohe Spannungen (s. Kraftwirkungen des elektrischen Stromes in [10]). Auf Spezialkonstruktionen für Höchstspannungen von 100 kV und 200 kV, die in absehbarer Zeit auf 400 kV erweitert werden, sei hier nicht eingegangen.

Die in Bild 37 sichtbaren Durchführungen werden mit Öl gefüllt. Das Öl steigt beim Öffnen einer Entlüftungsschraube am Durchführungskopf in dem Durchführungshohlraum hoch. Die Hohlraum-

Durchführung, deren Ölfüllung mit dem Öl des Gefäßes in Verbindung steht, stellt gewissermaßen einen Teil des Transformatorengefäßes dar. Wenn eine solche Durchführung zerschlagen wird, dann läuft Öl heraus. Das kann vermieden werden durch Verwendung von *Mehrrohr-Durchführungen*, die aus mehreren ineinandergeschobenen und zusammengebrannten Porzellanrohren bestehen. Solche Durchführungen beanspruchen jedoch im Innern des Transformatorengefäßes mehr Platz.

Für die Beherrschung des Spannungsgefälles zwischen dem Durchführungsbolzen und dem Durchführungsflansch treten bei hohen Spannungen die gleichen Probleme auf wie im Innern des Transformators. Durch Hartpapierrohre über den Durchführungsbolzen erreicht man eine Verbesserung der Isolation. Sie können auch das auf engem Raum zusammengedrückte Spannungsgefälle

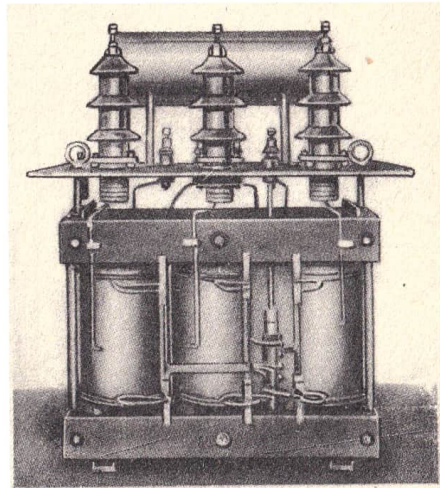


Bild 37. Aus dem Ölkessel gehobener Drehstrom-Transformator

ausgleichen durch Zwischenschalten leitender Einlagen — also durch eine Reihenschaltung von Kondensatoren. Diese Durchführungen werden *Kondensator-Durchführungen* genannt.

Da die Transformatoren-Durchführungen besonders in Industriegebieten einer starken äußeren Verschmutzung ausgesetzt sind, müssen sie in ihrer elektrischen Sicherheit sehr viel höher bemessen werden, als es der Innenisolation des Transformators entspricht. Andererseits ist es jedoch erwünscht, daß bei auftretenden Überspannungen der Überschlag außen eher erfolgen soll als innen. Um nun das richtige Verhältnis der äußeren zur inneren Festigkeit wiederherzustellen, bedient man sich der in Bild 38 und 39 sichtbaren Parallelfunkenstrecken. Diese werden auf eine genau festgelegte Schlagweite eingestellt und halten gleichzeitig den Überschlagslichtbogen von den empfindlichen Porzellanschirmen fern. An Hochspannungsleitungen haben Sie sicher schon solche Funkenstrecken parallel zu den Isolatorenketten gesehen.

Wenn Sie vom Gebiet der hohen Spannungen auf das Gebiet der großen Stromstärken übergehen, so müssen Sie sich dort mit den Erscheinungen und Auswirkungen der Stromverdrängung und der Wirbelströme beschäftigen. Für alle diese Hochspannungs- und Hochstromprobleme, die in diesem Abschnitt nur angedeutet wurden, ist eine eingehendere Behandlung späteren Einzeldarstellungen vorbehalten. Es kommen ferner hinzu die zweckgebundenen Spezialkonstruktionen für die Wicklungsausleitung und für die Durchführung bei vollkommen gekapselten Transformatoren mit Kabelendverschlüssen. Sie haben weiter die Vielgestaltigkeit der Isolierkörper bei den Meßwandlern zu beachten, die zu so eigenartigen Konstruktionen führt, daß das äußere Bild des Transformators völlig umgestaltet wird. Von dem Dreigespann „Eisen-Kupfer-Isolator“ steht z. B. bei Höchstspannungs-Meßwandlern der Isolator im Vordergrund und gestaltet die äußere Form des Wandlers zugleich als Durchführung und Gehäuse. Kern und Wicklung des Wandlers verschwinden völlig im ölgefüllten Hohlraum des Isolators wie der Nußkern in der Schale. Über die Prüfung der Isolation werden Sie in späteren Lehrbriefen Näheres vorfinden. In dem VDE (0532, §§ 56 bis 61) werden die Bestimmungen dazu behandelt.

Zusammenfassung

Zur Windungsisolation wird vorwiegend Papier verwendet. Da dieses jedoch Wasser absorbiert, muß eine Tränkung der Wicklungen bei Lufttransformatoren mit Isolierlack vorgenommen werden.

Bei Öltransformatoren übernimmt das Öl die Stelle des Isolierlackes und gleichzeitig die Isolation gegen das Gehäuse.

Die Anforderungen an das Öl sind in dem VDE unter der Nummer 0370 festgelegt. Die Anordnung der Durchführungen der Anschlußleitung richtet sich nach der Höhe der Spannung und des Stromes, für die der Transformator vorgesehen ist. Zum Schutz gegen Überspannungen sind an den Durchführungen Parallelfunkenstrecken angebracht.

Übungen

7. Warum wird der Eisenkern des Transformators aus isolierten Blechen zusammengesetzt?
8. Warum werden die Eisenbleche mit Silizium legiert?
9. Warum werden die Säulen- und Jochbleche miteinander verschachtelt?
10. Welche zwei Hauptformen der Wicklungsanordnungen kennen Sie?
11. Nennen Sie die Ausführungsarten der Zylinderwicklung!
12. Welchen Betriebsbedingungen muß der Wicklungsaufbau genügen?
13. Woraus besteht Hartpapier?
14. Welche Vorteile besitzt die Ölisolation gegenüber der Luftisolation?
15. Welchen doppelten Zweck erfüllt das Transformatorenöl?

5. Kapitel: Kühlung

[14] Erwärmung und innerer Wärmekreislauf. Warum müssen Transformatoren gekühlt werden? Sie wissen, daß der Transformator zwei Wärmequellen besitzt: Einmal ist es der Eisenkern, dessen Ummagnetisierungsarbeit sich in den Leerlaufverlusten auswirkt, zum anderen ist es die Wicklung, deren von der Belastung abhängige Stromwärmeverluste als Wicklungsverluste bezeichnet werden. Die Summe der beiden Verluste ist das Maß für die abzuführende Wärmemenge.

Um Ihnen ein Bild von der Größenordnung der auftretenden Wärmemenge zu geben, sollen aus dem später zu behandelnden Abschnitt über die Verluste einige Zahlen vorweggenommen werden.

Ein 30-kVA-Transformator hat etwa 3,5 % Gesamtverluste, also reichlich

1 kW,

ein 100-kVA-Transformator hat etwa 3 % Gesamtverluste, also etwa

3 kW

ein 1000-kVA-Transformator hat etwa 2 % Gesamtverluste, also etwa

20 kW;

ein 10000-kVA-Transformator hat etwa 1 % Gesamtverluste, also etwa

100 kW;

Die Umrechnung elektrischer Leistung in Wärme ist gegeben durch die Gleichung

$$1 \text{ kWh} \sim 860 \text{ kcal}$$

so daß Sie die stündlich erzeugte Wärmemenge in kcal durch Multiplikation der Gesamtverluste in kW mit 860 erhalten. Eine Vorstellung der Verlustwärme bietet Ihnen der Vergleich mit einem elektrischen Heizofen; bei einer Leistungsaufnahme von 1000...3000 W können Sie bekanntlich ein kleines Zimmer erwärmen.

Die Grenzen der zulässigen *Erwärmung des Transformators* sind durch die „Regeln für Transformatoren“ (VDE 0532) genau festgesetzt und müssen unbedingt eingehalten werden. In den §§ 45 bis 55 sind die einzelnen Bestimmungen niedergelegt. So richtet sich z. B. die Erwärmung eines Transformators nach der Betriebsart. § 24 behandelt die einzelnen Betriebsarten. Man unterscheidet:

1. **Dauerbetrieb (DB).** Die Einschaltzeit ist so lang, daß bei Nennbetrieb die Grenztemperatur erreicht wird.
2. **Kurzzeitiger Betrieb (KB).** Die Einschaltzeit ist so kurz, daß die Grenztemperatur bei Nennlast nicht erreicht wird. Die Schaltpause ist so groß, daß der Transformator die Umgebungstemperatur annimmt.
3. **Dauerbetrieb mit kurzzeitiger Belastung (DKB).** Die Belastungszeit ist so kurz, daß die Endtemperatur nicht erreicht wird. Im Leerlauf sinkt die Temperatur auf die Endtemperatur bei Leerlauf.
4. **Aussetzender Betrieb (AB).** Die Einschaltzeiten wechseln mit spannungslosen Pausen ab, deren Dauer jedoch nicht genügt, so daß die Abkühlung bis zur Umgebungstemperatur absinkt.
5. **Dauerbetrieb mit aussetzender Belastung (DAB).** Die Belastungszeiten wechseln mit Leerlaufpausen ab. Die Pausendauer genügt jedoch nicht, so daß der Transformator die Endtemperatur bei Leerlauf erreicht.

Statt Endtemperatur kann man auch Beharrungstemperatur sagen. § 46 wendet bei dem Probelauf die genannten Betriebsarten an und baut darauf die weiteren Prüfungen auf.

Von den für den Aufbau des Transformators verwendeten Stoffen hat die Drahtisolation zweifelsfrei die geringste thermische Festigkeit. Wenn in einem mit Papier oder auch mit einem anderen Faserstoff isolierten Wickeldraht eine Temperatur von 105° C dauernd überschritten wird, dann verkohlt langsam die Isolation. Diese Tatsache ist der Ausgangspunkt für die Festlegung der zulässigen Temperaturgrenzen.

Die Temperaturdifferenz zwischen dem Wicklungskupfer und dem Öl über die Windungsisolation hinweg, die wir sinngemäß als *Temperatursprung* oder innere Übertemperatur *E* bezeichnen, richtet sich nach der Art und der Dicke der Isolation. Sie beträgt im Vollast-Dauerbetrieb etwa 10...20° C. Die Ölttemperaturen liegen also entsprechend niedriger. Für die Berechnung der

Grenzerwärmungen wird eine höchste Kühlmittel-Temperatur von 35°C bei Luftkühlung vorausgesetzt.

Somit ergibt sich z. B. für alle mit Faserstoff isolierten Wicklungen unter Öl eine Grenzerwärmung von 70°C und für das Öl in der obersten Schicht eine Grenzerwärmung von 60°C .

Wenn die Umgebungsluft des Transformators (die Kühlmittel-Temperatur) in seiner Zelle oder bei starker Sonnenbestrahlung den zulässigen Grenzwert von 35°C erreicht, dann können Sie im Transformatoröl oben in der heißesten Schicht unter dem Deckel Temperaturen bis zu 95°C feststellen. Die Ölgrenztemperatur von 95°C dürfen Sie nun nicht etwa als Maßstab für mögliche Überlastungen ansehen. Es ist also nicht ohne weiteres zulässig, die Belastung zu steigern, bis die Ölgrenztemperatur erreicht ist. Der Grund für dieses Verbot liegt in dem bereits erwähnten Temperatursprung zwischen Wicklung und Öl, der nur bei Nennleistung den geringen Rechnungswert von 10°C aufweist. Bei Überbelastung steigt er jedoch im quadratischen Verhältnis an, so daß wesentlich größere Temperaturdifferenzen zwischen Wicklung und Öl entstehen. Bei dem hohen Ausnutzungsgrad des Materials muß aber jede Überbelastung als schädlich und gefährlich angesehen werden.

Zur Abführung der Verlustwärme aus dem Eisenkern und aus der Wicklung stehen naturgemäß keine anderen Stoffe zur Verfügung als die beiden Isoliermittel Luft und Öl. Auf Grund Ihrer physikalischen Kenntnisse werden Sie einwenden, daß Luft und Öl schlechtere Wärmeleiter sind als alle anderen elektrischen Isolatoren: Das stimmt, aber gute Wärmeleiter sind andererseits schlechte Isolatoren, die erst recht nicht zu gebrauchen sind. Das Transformatoröl hatten Sie bereits in [12] als den hochwertigeren Isolierstoff kennengelernt. Auch als Kühlmittel besitzt es wesentliche Vorteile gegenüber der Luft. Das Öl hat eine größere Wärmeleitfähigkeit (s. „Grundlagen der Elektrotechnik“ Lehrbrief 3) als die Luft und auch eine größere Wärmespeichermöglichkeit, deren ausgleichende Wirkung Sie später kennenlernen werden.

Wie ist nun die Wechselwirkung zwischen Erwärmung und Abkühlung zu erklären? Sie müssen sich das folgendermaßen vorstellen:

Überall im aktiven Eisen und Kupfer entsteht ein *Wärmestrom*. In jedem Metallteilchen liegt eine Wärmequelle, und unter dem Druck des treibenden Temperaturgefälles strömt die Wärme nach außen zur kühleren Umgebung. Die erwärmten Luft- oder Ölteilchen dehnen sich aus, werden leichter und steigen nach oben, kälteren Teilchen Platz machend. So vollzieht sich der natürliche Wärmekreislauf. Beim frei stehenden Trockentransformator steht immer wieder von neuem kühlere Frischluft zur Verfügung. Beim Öltransformator breitet sich das erwärmte Öl auf der Oberfläche aus, gibt seine

Wärme an die Gefäßwandungen ab und sinkt — sich abkühlend — langsam zu Boden, um seinen Kreislauf von neuem zu beginnen.

Die stehende Bauweise des Transformators ist dem senkrecht aufsteigenden Wärmestrom sehr förderlich. Die Kühlkanäle im Eisenkern und die zylindrischen Isolierkanäle zwischen den Wicklungen haben alle die gleiche senkrechte Auftriebsrichtung. Bei der Konstruktion des Wicklungsaufbaues müssen Sie darauf achten, daß auch wirklich alle Wicklungsteile von dem Ölstrom erfaßt werden. Wenn Wicklungen auf Zylinder aufgewickelt werden, wie es in [9] und [10] gezeigt wurde, dürfen Sie zwischen der untersten Windungslage und dem Isolierzylinder die Kühlkanäle nicht vergessen. Sie erinnern sich, daß diese durch Auflage von schmalen Hartpapierstreifen auf den Zylinder hergestellt werden. *Das Öl muß ungehindert in alle Kanäle unten eindringen und oben wieder abfließen können.* Diese Forderung widerspricht bei Hochspannungstransformatoren bisweilen den Grundsätzen der Wicklungsisolierung; Isolierzylinder müssen demzufolge oben und unten offenbleiben. Wickelringe dürfen den Ölstrom nicht abdrosseln. Es muß auch Vorsorge getroffen werden, daß innerhalb des Wicklungsaufbaus im Laufe der Zeit keine Formänderungen stattfinden können, welche die Kühlkanäle allmählich verengen. Die reichliche Verwendung von Weichpapier bei der Lagenwicklung bringt z. B. diese Gefahr mit sich.

[15] Kühlungsarten und Gefäßformen. Beim Trockentransformator ist das Kühlungsproblem mit dem inneren Wärmekreislauf erschöpft. Kleine Transformatoren strahlen ihre Verlustwärme von der Oberfläche unmerklich ab. Bei größeren Leistungen bis zu einigen 100 kVA bildet sich im natürlichen Zug oder Wärmeartrieb ein warmer Luftstrom. Bei Aufstellung in einem großen Raum schafft sich der Trockentransformator die benötigte Frischluft selbst von unten heran, wie Sie das an jedem Heizofen beobachten können. Man bezeichnet diese Kühlungsart als **Selbstkühlung TS**. Die Abkürzung TS ist die in den „Regeln für Transformatoren“ festgelegte Bezeichnung für Trockentransformator mit Selbstkühlung.

Bei ungünstiger Aufstellung des Transformators in einem engen Raum oder bei Einhüllung in einen Schutzmantel muß die Kühlluft eventuell durch einen Lüfter oder durch künstliche Zugluft bewegt werden. Diese Kühlungsart wird entsprechend den VDE-Regeln für Transformatoren als **Fremdlüftung TF** bezeichnet.

Beim Öltransformator kommt zu dem inneren Wärmekreislauf noch ein äußerer Kreislauf hinzu. Sie hatten kennengelernt, wie durch Vermittlung des Öles die Verlustwärme aus dem Transformatoreninnern heraustransportiert und an die Gefäßwände abgegeben wird. Von da aus muß sie an die äußere Umgebung

weitergeleitet werden. Eine kleine Rechnung soll Ihnen zeigen, inwieweit das möglich ist. Vergleichen Sie einen 30-kVA- mit einem 1600-kVA-Transformator, die beide in glattwandige Ölgefäße gestellt sind. Unter Berücksichtigung der erforderlichen Spannungsabstände der Wicklungen von den Kesselwänden erhalten die Gefäße etwa folgende lichte Maße:

	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]
30 kVA	770	460	700
1600 kVA	1700	800	2000

Die Gesamtfläche der Gefäßwände ohne Deckel beträgt hiernach beim 30-kVA-Transformator rd. $1,75 \text{ m}^2$, beim 1600-kVA-Transformator rd. $10,0 \text{ m}^2$. Auf Grund von Erfahrungswerten kann man damit rechnen, daß jedes Quadratmeter der freistrahenden Wandfläche eine Verlustwärme von etwa $10 \text{ W/}^\circ\text{C}$ abführt. Bei einer Erwärmung des Öles um 60°C (entsprechend der Grenzerwärmung nach VDE) ergibt sich also eine Wärmeabgabe von etwa 600 W/m^2 .

Das kleine Ölgefäß könnte bei dieser Berechnung rd. $1,0 \text{ kW}$ Verlustwärme abführen, das größere rd. 6 kW . Beim 30-kVA-Transformator entspricht die abgeführte Wärme praktisch den Gesamtverlusten. Sie sehen also, daß für diesen Transformator die Kühlfläche des Glattblechkessels ausreicht.

Beim 1600-kVA-Transformator betragen jedoch die Gesamtverluste rd. 27 kW , wovon die Leerlaufverluste allein $5,7 \text{ kW}$ ausmachen. Die Kühlfläche des Glattblechkessels würde also nur für die Verlustwärme des leerlaufenden Transformators ausreichen. Was ist hier zu tun? Wenn Sie ein größeres Ölgefäß nehmen, bedeutet das zugleich die unerwünschte Zunahme der kostbaren Ölfüllung. Sie brauchen ein Ölgefäß mit stark vergrößerter Kühloberfläche bei nur geringer Zunahme seines Ölinhaltes. Für die Ausbildung solcher Ölgefäße gibt es drei Möglichkeiten:

1. Die Seitenwände des Gefäßes werden aus Wellblech angefertigt.
2. In das Gefäß werden oben und unten Kühlrohre eingeschweißt.
3. An das Gefäß werden Radiatoren angeflanscht.

Man unterscheidet also sinngemäß Wellblechkessel, Röhrenkessel und Radiatorenkessel. In Bild 38, 39 und 41 sehen Sie drei dieser Kesselbauformen.

Beim Wellblechkessel (Bild 38) sehen Sie, wie die einzelnen Wellen stark zusammengedrückt sind, so daß nur schmale Kühlrippen entstehen, die, von innen betrachtet, auch als Kühltaschen bezeichnet werden. Wellblechkessel werden bei Transformatoren von 50...1600 kVA angewendet.

Bei größeren Leistungen bis zu mehreren 1000 kVA bietet der in Bild 39 dargestellte Röhrenkessel beachtliche Vorteile gegenüber dem dünnwandigen

Wellblechkessel. Seine Wände bestehen aus stärkerem Kesselblech, die Kühlrohre werden einzeln öldicht eingeschweißt. Der sehr stabile Kessel zeigt sich auch schwierigsten Landtransporten gewachsen.

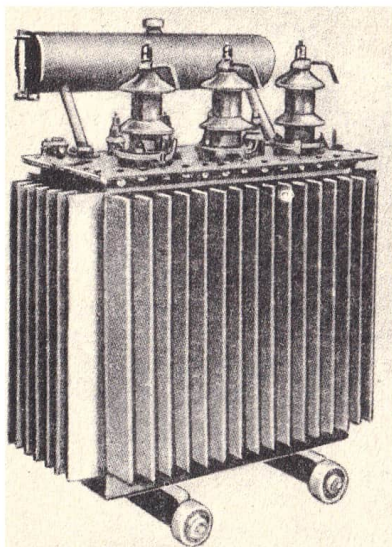


Bild 38. Drehstrom-Öltransformator 20/0,4 kV
mit Wellblechkessel

Wenn bei großen Verlustleistungen die Kühlrohre dieser Kesselform in vier oder fünf Reihen übereinander angeordnet werden müssen, so haben die inneren Rohre nicht mehr die gleiche Kühlwirkung wie die äußeren, einmal, weil sie von den darüberliegenden Rohren in ihrer Wärmeabgabe behindert werden, zum anderen, weil sie nicht das volle Temperaturgefälle der Ölsäule erfassen. Dieser Nachteil wird ausgeglichen, wenn die einzelnen Kühlrohre harfenförmig zusammengefaßt werden. Solche **Rohrharfen** besitzen oben und unten je ein gemeinsames Sammelrohr. Diese Sammelrohre werden an den Stellen der größten Temperaturdifferenz (1 bis 10) in die Kesselwand eingeführt. Bild 40 stellt die grundsätzliche Anordnung der

Kühlrohre eines Röhrenkessels vergleichend dem Rohrharfenkessel gegenüber. Die in Bild 41 sichtbaren Radiatoren sind Strahlkörper aus Stahlblech, die im Prinzip den Rohrharfen ähneln. Sie bieten noch größere Kühlflächen und sind wie die Rippenheizkörper einer Warmwasser-Heisanlage parallelgeschaltet. Sie werden an der Kesselwand angeflanscht, wobei zweckmäßig ein Absperrschieber eingebaut wird, so daß die Radiatoren am Aufstellungsort des Transformators einzeln angesetzt werden können. Das ist natürlich auch bei Reparaturen sehr vorteilhaft.

Allen drei Kesselformen ist gemeinsam, daß sich an ihrer stark vergrößerten Oberfläche ein natürlicher Luftzug ausbildet, durch den die erwärmten Luftteilchen laufend abgehoben und nach oben geführt werden. Im Innern der Kühlrippen oder Kühlrohre sinkt das im Gegenstrom abgekühlte Öl nach unten. Der ganze Kühlprozeß vollzieht sich selbständig (ÖS). Die Abkürzung ÖS ist die in den „Regeln für Transformatoren“ festgelegte Bezeichnung für

einen Öltransformator mit Selbstkühlung, die als wichtiges Charakteristikum auch auf dem Leistungsschild des Transformators vermerkt werden muß. Die Kühlwirkung der selbständigen Ölkessel kann erheblich vergrößert werden durch stark bewegte Zugluft, d. h. also durch Anblasen der Kühlflächen in der Wärmeauftriebsrichtung. Zur Luftbewegung dienen entweder mehrere Einzelventilatoren, die unterhalb der Rohrbündel oder Radiatoren angeordnet werden, oder es wird vorzugsweise bei Rohrkesseln ein als Windkessel wirkender Düsenkranz verwendet, der nur von einem größeren Lüfter gespeist wird. Man nennt diese Kühlungsart Fremdlüftung und benützt hierfür die Bezeichnung OF (Öltransformator mit Fremdlüftung).

Die größeren Umspannwerks-Transformatoren mit Leistungen über 10000 kVA werden heute für diese Kühlungsart von vornherein so berechnet, daß sie sich bis zu ungefähr 60 % ihrer Nennleistung ohne Zusatzlüftung selbst kühlen. Ein Beispiel soll das näher erläutern:

Wenn der Transformator für eine Nennleistung von 16000 kVA bei Kühlungsart

OF berechnet wurde, so leistet er 9600 kVA bei Kühlungsart OS, und die Lüfter braucht man erst bei höheren Belastungen einzuschalten. Diese 66 %ige Leistungssteigerung beim Übergang von Selbstkühlung OS auf Fremdlüftung OF ist sehr beachtlich und überraschend.

Sie dürfen nun nicht annehmen, daß auch bei vorhandenen älteren selbstkühlenden Transformatoren durch Anbau von Lüftern nachträglich eine gleich hohe Leistungssteigerung erreicht werden kann. Sie müssen sich aber überzeugen, daß das in dem Umfang nicht möglich ist. Denken Sie an die Grenz-

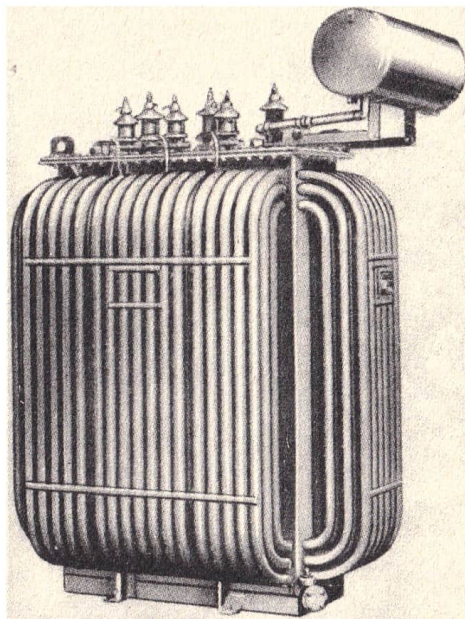


Bild 89. Drehstrom-Öltransformator mit Röhrenkessel
20/4 kV

erwärmung und den Temperatursprung zwischen Wicklung und Öl sowie an seine quadratische Zunahme bei Überlastung! Der Konstrukteur des selbst-

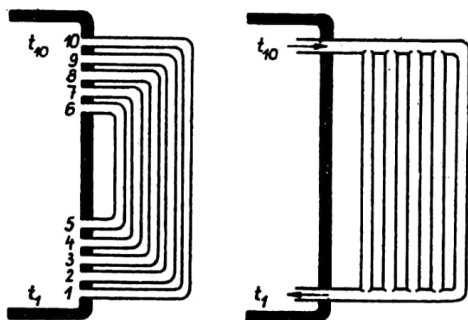


Bild 40. Gegenüberstellung von Röhrenkessel und Rohrhafenkessel

kühlenden Transformators hat schließlich in wirtschaftlicher Berechnungsweise die zulässigen Erwärmungsgrenzen soweit als möglich ausgenützt, so daß eine nachträgliche Leistungssteigerung durch künstliche Herabsetzung der Wicklungstemperatur von Fall zu Fall genau überprüft werden muß. Ohne allzu großen Aufwand für die Einrichtung der Zusatzkühl-

anlage ist im allgemeinen eine Leistungssteigerung nur bis 25 % möglich. Sie erkennen aus diesen Zusammenhängen erneut die bereits früher hervorgehobene Bedeutung des Wärmestromes und seinen großen Einfluß auf die Belastbarkeit des Transformators.

Bisher wurde die Kühlwirkung im Transformator durch Beschleunigung des äußeren Wärmekreislaufs gesteigert. Dasselbe können Sie auch mit dem inneren Kreislauf tun, indem Sie den Ölstrom rascher umlaufen lassen. Mit Hilfe einer Ölpumpe ziehen Sie auf der Stirnseite des Kessels oben (unter dem Deckel) das warme Öl ab und drücken es durch einen Kühler hindurch und auf der anderen Seite unten wieder in den Kessel. Innerhalb des Kessels durchströmt das Öl, zwangsweise beschleunigt, von unten nach oben den Wicklungsaufbau des Transformators. In

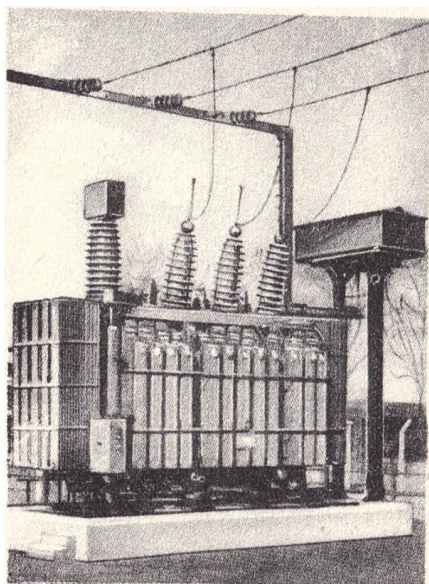


Bild 41. Drehstrom-Öltransformator mit Radiatorenkessel 20 MVA 105/10,5 kV und Spannungsregelung

dem außerhalb des Kessels liegenden Kühler wird das durchströmende Öl entweder durch Abstrahlung und natürlichen Zug oder durch künstliche Zugluft gekühlt.

Die Kühlungsart eines Transformators mit Ölumlaut und äußerer Selbstkühlung wird durch die Buchstaben OSA bezeichnet, mit Ölumlaut und äußerer Fremdlüftung durch die Buchstaben OFA. Die Kühler werden nach dem Prinzip der OS- und OF-Kühlung aus Radiatoren oder Rohren zusammengesetzt und einzeln oder in Gruppen belüftet. Wie bei der Kühlung OS/OF besteht auch hier die Kombinationsmöglichkeit von OSA und OFA.

Noch intensiver wird die Kühlwirkung, wenn für die Rückkühlung des Öles statt der Luft als Kühlmittel Wasser verwendet wird. In Anlagen, bei denen reichlich fließendes Wasser zur Verfügung steht, ist die Kühlungsart mit Ölumlaut und äußerer Wasserkühlung OWA die wirksamste und zugleich die billigste. Der Kühler besteht dann lediglich aus mehreren im Wasserbottich liegenden Kühltischen, die vom Öl durchflossen werden. Wenn Druckwasser verfügbar ist, kann auch die sehr gedrängte Bauform eines im Gegenstrom wirkenden Röhrenkühlers verwendet werden, der sich durch geringsten Platzbedarf auszeichnet. In früheren Zeiten wurde von der Ölkühlung durch Wasser reichlicher Gebrauch gemacht als heute. Es entstanden damals (besonders in der Schweiz) zahlreiche Ausführungsformen, bei denen die gesamte Kesseloberfläche mit Wasser berieselt wurde oder bei denen eine wasserdurchflossene Kühltische in den oberen Teil des Kessels eingebaut wurde. Solche Einrichtungen bedingen jedoch ständig eine sehr sorgfältige Wartung, um die Sicherheit des Betriebes nicht zu gefährden.

Die Ölgefäße der Transformatoren mit Kühlungsart OFA und OWA bestehen aus glatten Kesseln mit großer Wandstärke, die lediglich an den Stirnseiten oben und unten Ventilflansche besitzen zum Anschluß der Ölumlautleitungen nach den getrennt aufgestellten Kühlerbatterien. Ölumlautkühlung kommt praktisch nur für Großtransformatoren in Kraftwerken oder in Überlandzentralen in Frage, also für ortsgebundene Anlagen, die erst am Aufstellungsort fertig montiert werden. Der glattwandige Kessel gestattet es dem Konstrukteur, das Eisenbahnprofil in seiner vollen Höhe und Breite auszunützen und ein Maximum an Leistung in dem verfügbaren Hohlraum unterzubringen. Dabei ist die 100000-kVA-Grenze bereits erreicht worden.

Bild 42 zeigt eine Gruppe Transformatoren, ausgeführt als Kraftwerkstransformatoren mit Ölumlautkühlung für Einzelleistungen von 50000...70000 kVA und einer Übersetzung von 6300 V auf 115000 V. Sie haben ein Transportgewicht von rd. 100 t und können bei abgenommenen Durchführungen auf einem Spezial-Tiefladewagen transportiert werden.

In Bild 43 sehen Sie einen Transformator mit einer Maximalleistung von 115 MVA, der zur Kupplung eines 220-kV-Netzes mit einem 110-kV-Netz dient. Das Transportgewicht dieses Transformators ist 160 t. Die an den Kessel angebaute Trägerkonstruktion kann mit zwei vielachsigen Fahrgestellen zu

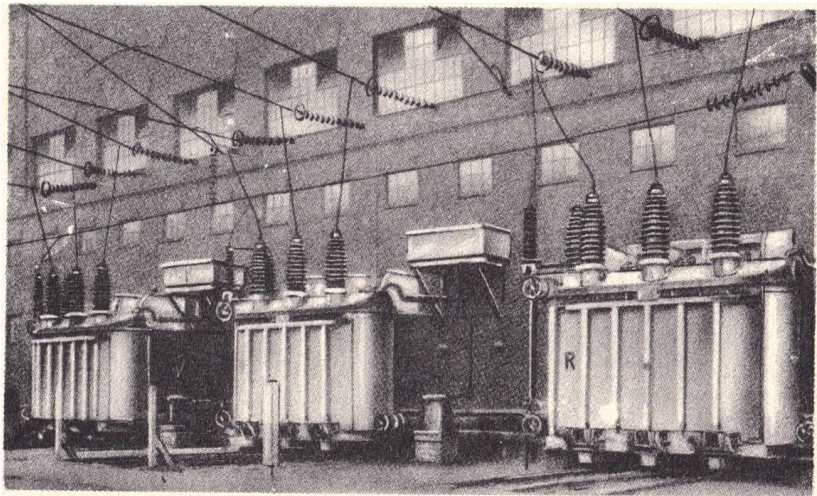


Bild 42. Transformatoren mit Ölumlaufkühlung 50/70 MVA 6,3/115 kV

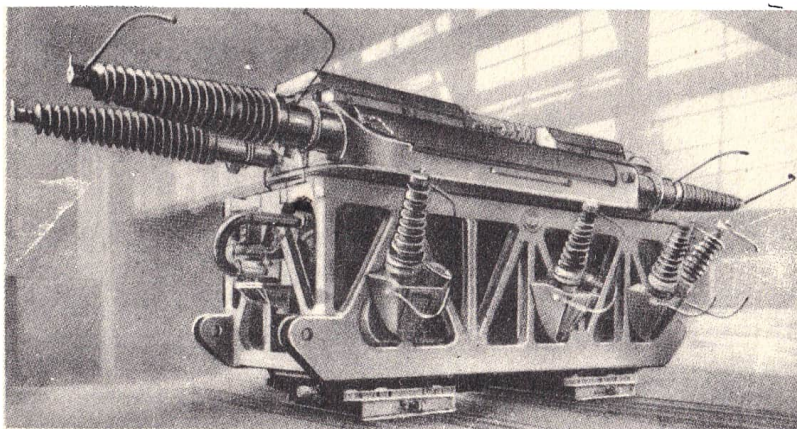


Bild 43. Wander-Transformator 220/110/10 kV 115/115/38 MVA

einem Tiefladewagen zusammengesetzt werden. Damit ist das Transportproblem der Transformatoren angeschnitten, worüber in späteren Einzeldarstellungen mehr zu sagen sein wird.

Zusammenfassung

In den „Regeln für Transformatoren“ (VDE 0532/I. 47 § 22) sind die Kühlungs- und Lüftungsarten wie folgt festgelegt:

I. Trockentransformatoren

1. mit Selbstkühlung (TS). Der Transformator wird durch Strahlung und natürlichen Zug gekühlt;
2. mit Fremdlüftung (TF). Die Kühlluft wird durch einen Lüfter oder künstlichen Zug bewegt;
3. mit Wasserkühlung (TW). Einzelne Teile werden durch Wasser gekühlt.

II. Öltransformatoren

1. mit Selbstkühlung (OS). Der Ölkasten wird durch Strahlung und natürlichen Zug gekühlt;
2. mit Fremdlüftung (OF). Der Ölkasten wird durch Luft gekühlt, die durch einen Lüfter oder künstlichen Zug bewegt wird;
3. mit Ölumlaufl und Fremdlüftung (OFU). Der Ölkasten wird durch Luft gekühlt, die durch einen Lüfter oder künstlichen Zug bewegt wird. Der Ölumlaufl erfolgt zwangsweise;
4. mit Ölumlaufl und innerer Wasserkühlung (OWI). Das Öl wird durch einen Wasserkühler im Innern des Ölkastens gekühlt;
5. mit Ölumlaufl und äußerer Wasserkühlung (OWA). Das Öl wird in einem Wasserkühler außerhalb des Ölkastens gekühlt. Der Ölumlaufl erfolgt zwangsweise;
6. mit Ölumlaufl und äußerer Selbstkühlung (OSA). Das Öl wird in einem Luftkühler außerhalb des Ölkastens durch Strahlung und natürlichen Zug gekühlt. Der Ölumlaufl erfolgt zwangsweise;
7. mit Ölumlaufl und äußerer Fremdkühlung (OFA). Das Öl wird in einem Luftkühler außerhalb des Ölkastens gekühlt. Die Kühlluft wird durch einen Lüfter oder künstlichen Zug bewegt. Der Ölumlaufl erfolgt zwangsweise.

Übungen

16. Welche Ursachen bewirken die Erwärmung des Transformators?
17. Welche Grenzerwärmungen sind gemäß VDE im Transformator zugelassen?
18. Welche Kühlmittel werden zur Abführung der Verlustwärme verwendet?
19. Welche Vorteile bietet die Ölkühlung gegenüber der Luftkühlung?

20. Durch welche konstruktiven Mittel wird bei selbstkühlenden Transformatoren (Kühlart OS) die Kühlwirkung erhöht?
21. Welche anderen Möglichkeiten gibt es, um die Kühlwirkung zu erhöhen? Kühlarten?

6. Kapitel: Betriebseigenschaften

[16] Leerlauf, Belastung. Aus dem 1. bis 5. Kapitel haben Sie sich ein Bild machen können, wie der Transformator im Innern beschaffen ist. Nun sollen Sie ihn in Betrieb nehmen und sehen, wie er arbeitet und wie er sich den gestellten Anforderungen gegenüber verhält. Den weiteren Betrachtungen ist dabei ein gewöhnlicher Leistungstransformator zugrunde gelegt.

Nach den „Regeln für Transformatoren“ (VDE 0532 § 3) versteht man unter „Leistungstransformatoren“ (LT) Transformatoren, bei denen die Leistung nur induktiv übertragen wird, gegenüber den Spartransformatoren, bei denen die Leistung zum Teil induktiv, zum Teil unmittelbar übertragen wird.

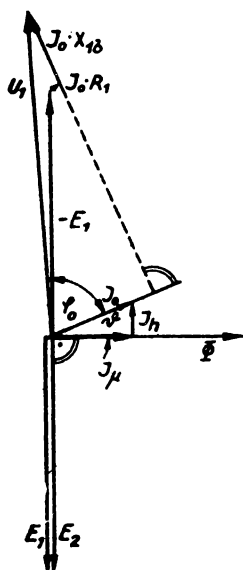


Bild 44. Leerlaufdiagramm

a) Leerlauf

Sie haben in den Lehrbriefen „Grundlagen der Elektrotechnik“ die Vorteile des Diagramms kennengelernt. Die einzelnen Vorgänge werden dadurch anschaulich und vereinfachen die Arbeitsweise bei komplizierten Rechenvorgängen. Da nun ein magnetischer Fluß Φ vorhanden ist, beginnt man bei der Aufstellung des Diagramms mit dem Fluß und zeichnet ihn waagrecht (Bild 44). Dieser Fluß erzeugt in der Primär- (1) sowie in der Sekundärwicklung (2) je eine EMK, nämlich E_1 und E_2 , die gegenüber dem Fluß um 90° nacheilen. Es soll angenommen werden, daß die Windungszahlen gleich groß sind, so daß E_1 gleich E_2 ist. In gleicher Richtung mit dem Fluß Φ liegt der Magnetisierungsstrom I_μ . Der Magnetisierungsstrom I_μ ist jedoch gegenüber dem Verluststrom I_h , d. h. dem Strom, der die Eisenverluste (Hysteres- und Wirbelstromverluste) zu decken hat, um 90° phasenverschoben. I_0 ist somit der tatsächlich fließende Leerlaufstrom. Sie wissen,

daß die Spannung E_1 der angelegten Spannung U_1 (Primärspannung) entgegengesetzt gerichtet ist; also kann man E_1 nach oben antragen, jedoch mit entgegengesetztem Vorzeichen ($-E_1$). Den Winkel θ bezeichnet man

als Verlustwinkel. Der Verluststrom I_h läßt sich ermitteln aus den Eisenverlusten N_{ve} in Watt und der Primärspannung U_1

$$I_h = \frac{N_{ve}}{U_1} [\text{A}] \quad (5)$$

Um die Klemmenspannung U_1 zu erhalten, müssen noch die einzelnen Spannungsverluste ermittelt werden.

Zur Überwindung des Wirkwiderstandes der Primärwicklung wird eine Wirkspannung benötigt, die den Leerlaufstrom durch die Spulen treibt. Dieser Wirkspannungsabfall $E_{1R} = I_0 \cdot R_1$ liegt demzufolge in gleicher Richtung wie der Leerlaufstrom I_0 .

Da bei jedem magnetischen Fluß Streuung auftritt, d. h. ein Teil des Flusses sich nicht über den gewünschten Eisenweg schließt, muß dieser Streufluß $\Phi_{1\sigma}$ mit berücksichtigt werden. Der Fluß $\Phi_{1\sigma}$ ändert sich wie der Hauptfluß mit der Frequenz. Er induziert demnach in der Primärwicklung eine EMK. Diese Streu-EMK ist, wie schon gesagt, abhängig von dem Streufluß und demzufolge abhängig von dem Blindwiderstand $X_{1\sigma}$

$$E_{1\sigma} = I_0 \cdot X_{1\sigma} [\text{V}] \quad (6)$$

Die Streu-EMK steht senkrecht auf dem Wirkspannungsanteil. Verbinden Sie den Anfangspunkt des Diagramms mit dem Endpunkt der Streuspannung, so erhalten Sie die angelegte Spannung (Klemmenspannung) U_1 . Die Spannung U_1 muß demnach folgende Spannungsabfälle decken:

1. die Selbstinduktionsspannung $-E_1$,
2. den Wirkspannungsabfall E_{1R} ,
3. den Blindspannungsabfall $E_{1\sigma}$.

Lehrbeispiel 1

Bei einem Versuch wurden an einem Transformator folgende Werte gemessen:

Leerlaufleistung $N_0 = 95 \text{ W}$

Primärspannung $U_1 = 220 \text{ V}$

Leerlaufstrom $I_0 = 0,7 \text{ A}$

Wie groß ist

- 1. der Phasenverschiebungswinkel φ_0 zwischen U_1 und I_0 ,*
- 2. der Verluststrom,*
- 3. der Magnetisierungsstrom?*

Lösung:

$$1. \quad \cos \varphi_0 = \frac{N_0}{U_1 \cdot I_0} = \frac{95 \text{ W}}{220 \text{ V} \cdot 0,7 \text{ A}} = 0,617 \quad \varphi_0 = \underline{\underline{51^\circ 54'}}$$

2. Um den Verluststrom zu berechnen, benötigen Sie den Verlustwinkel ϑ . Den Verlustwinkel können Sie beim leerlaufenden Transformator mit großer Annäherung schreiben

$$\vartheta = 90^\circ - \varphi_0$$

Nach den Regeln der Trigonometrie ist jedoch

$$\sin \vartheta = \cos \varphi_0$$

oder

$$\sin \vartheta = \frac{I_h}{I_0}$$

$$I_h = I_0 \cdot \sin \vartheta = I_0 \cdot \cos \varphi_0$$

$$I_h = 0,7 \text{ A} \cdot 0,617 = \underline{\underline{0,43 \text{ A}}}$$

3. Der Magnetisierungsstrom ist somit

$$I_\mu = I_0 \cdot \cos \vartheta = I_0 \cdot \sin \varphi_0$$

$$I_\mu = 0,7 \text{ A} \cdot 0,787 = \underline{\underline{0,551 \text{ A}}}$$

b) Belastung

Wird auf der Sekundärseite ein Verbraucher angeschlossen, so treibt die Spannung E_2 einen Strom durch die Wicklung. Es sind nicht nur Primär-Aw vorhanden, sondern auch Sekundär-Aw, die zusammen den Gesamtfluß ergeben. Der Strom I_2 wird je nach Belastung $0 \dots 90^\circ$ der Spannung E_2 nacheilen. Gegenüber I_1 ist demnach I_2 entgegengesetzt, und zwar abhängig von der Belastungsart. Die Sekundär-Aw wirken somit den Primär-Aw entgegen, so daß E_1 kleiner wird. Die Differenz zwischen U_1 und E_1 wird größer, und das hat eine Stromzunahme primärseitig zur Folge. I_1 steigt so weit an, bis sich E_1 wieder von U_1 um den Wert E_{1R} und $E_{1\sigma}$ unterscheidet. Außer bei Kleintransformatoren ändern sich die Spannungsabfälle bei Belastung sehr wenig gegenüber denen bei Leerlauf, so daß man den Verlust- und den Magnetisierungsstrom als konstante Größen ansehen kann.

Sie können zum Verständnis folgende Überlegung anstellen: Wenn auf der Sekundärseite eine Leistung entnommen wird, so muß primärseitig eine größere Leistung aufgenommen werden gegenüber der im Leerlauf.

In Bild 45 ist der Transformator durch einen Wirkwiderstand und einen induktiven Widerstand belastet. Die Windungszahlen sind gleich groß (s. Leerlaufdiagramm), so daß E_1 gleich E_2 ist. Außerdem muß der Phasenverschiebungswinkel φ_2 bekannt sein. Stellen wir jetzt das Belastungsdiagramm auf (Bild 45):

ϕ und das Stromdreieck I_μ, I_h, I_o sind gleich (wie in Bild 44 dargestellt), genauso E_1 und E_2 . Es tritt auf der Sekundärseite ebenfalls ein Wirkspannungsabfall

$$U_{2R} = I_2 \cdot R_2 \text{ [V]} \quad (7)$$

auf und ein Streuspannungsabfall

$$U_{2\sigma} = I_2 \cdot X_{2\sigma} \text{ [V]} \quad (8)$$

Der Wirkspannungsabfall hat die gleiche Richtung wie I_2 , während der Streuspannungsabfall senkrecht darauf steht (s. Diagramm in Bild 45). I_2 wird in gleicher Richtung und Größe an I_h angesetzt. Der Strom I_1 ist dann die Verbindungslinie vom Nullpunkt zum Endpunkt von I_2 . Der Streuspannungsabfall $U_{1\sigma}$ ist wieder senkrecht auf I_1 aufzutragen und U_{2R} parallel zu I_2 . Man kann auch die Sekundärseite nach oben umklappen und kommt zu dem in Bild 46 dargestellten Diagramm. Nimmt man an, daß der Leerlaufstrom sehr klein gegenüber dem Nennstrom ist (dies ist der Fall bei größeren Transformatoren), so liegen I_1 und I_2 in gleicher Richtung. Sie kommen damit zu dem für die Praxis vereinfachten Diagramm in Bild 47. U_k ist der gesamte Streuspannungsabfall $U_{1\sigma}$ und $U_{2\sigma}$. Das gleiche gilt für den Gesamtwirkspannungsabfall ($U_R = U_{1R} + U_{2R}$). U_k ist somit der Gesamtspannungsabfall des Transformators.

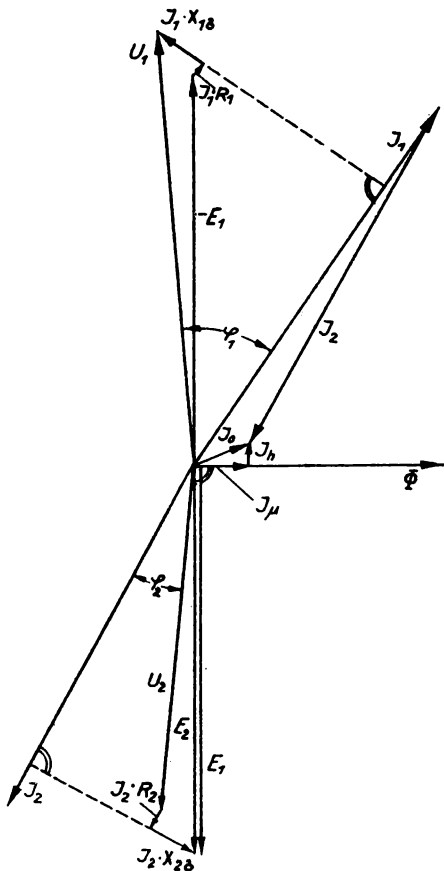


Bild 45. Diagramm bei induktiver Last und Wirklast

Untersuchen Sie dieses eigenartige Dreieck!

Aus dem Diagramm ist zu ersehen, daß der Streuspannungsverlust U_s einen um so größeren Spannungsabfall verursacht, je größer die Phasenverschiebung im sekundären Stromkreis ist. Ist die Phasenverschiebung gleich Null, wie das bei rein OHMScher Belastung durch Glühlampen der Fall ist, so spielt der induktive Spannungs-

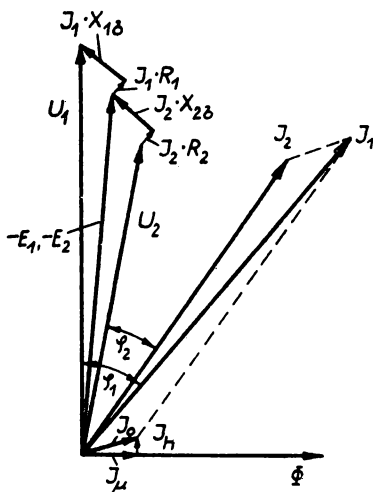


Bild 46. Belastungsdiagramm
(Bild 45 I_2 U_2 um 180° gedreht)

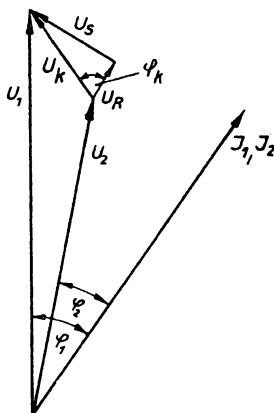


Bild 47. Vereinfachtes Diagramm

verlust eine geringe Rolle. Wenn hingegen durch Belastung mit Asynchronmotoren eine induktive Phasenverschiebung verursacht wird, so entsteht ein erheblicher Spannungsabfall.

Wenn Sie sich dieses einfache, von GIBERT KAPP entwickelte Transformatorendiagramm noch etwas genauer ansehen, und zwar besonders das auf der Spitze der sekundären Spannung U_2 angeschlossene rechtwinklige Dreieck, so stellen Sie fest:

Der OHmsche Spannungsabfall U_R erscheint als die eine Kathete, der induktive Spannungsabfall U_s als die andere. Die Hypotenuse U_k steht zu beiden Katheten in der pythagoreischen Beziehung

$$U_k^2 = U_R^2 + U_s^2$$

oder

$$U_k = \sqrt{U_R^2 + U_s^2} [\text{V}]$$

(9)

U_k wird als **Kurzschlußspannung** bezeichnet. Wie kommt sie zu diesem Namen? Die „Regeln für Transformatoren“ im VDE definieren sie wie folgt:

Die Kurzschlußspannung ist die Spannung, die bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung an die Primärwicklung gelegt werden muß, damit sie den Nennprimärstrom aufnimmt.

Diese Definition findet gleichfalls ihre Bestätigung in dem Diagramm. Bei sekundärem Kurzschluß wird der Vektor $U_2 = 0$, und das Kurzschlußdreieck vergrößert sich bis herunter zum Nullpunkt. Weiterhin werden Sie aus dem Diagramm ableiten können, daß beim leerlaufenden Transformator das Kurzschlußdreieck zusammenschrumpft, so daß letzten Endes die beiden Spannungsvektoren U_1 und U_2 prozentual gleich groß werden.

Das Diagramm in Bild 47 ist nicht maßstabgetreu. Die Vektoren der Spannungsabfälle sind zwecks übersichtlicher Darstellung relativ größer gezeichnet als die Vektoren der Klemmenspannungen. Wenn Sie sich das Vektorendiagramm maßstabgerecht aufzeichnen, dann können Sie die Spannungsabfälle des Transformators aus der Zeichnung direkt abgreifen. Oft werden die Spannungen nicht in Volt, sondern in % angegeben.

Betrachten Sie nochmals das KAPPSche Dreieck! Sie können die Spannungsabfälle U_s und U_R bestimmen, wenn Sie auf der Sekundärseite die Klemmen kurzschließen und die Primärspannung so regeln, daß in den Spulen die Nennströme I_1 und I_2 fließen. Dann ist die Spannung U_1 gleich der Kurzschlußspannung U_k . Messen Sie dazu noch die aufgenommene Wirkleistung, die Spannung U_1 und den Strom I_1 bei

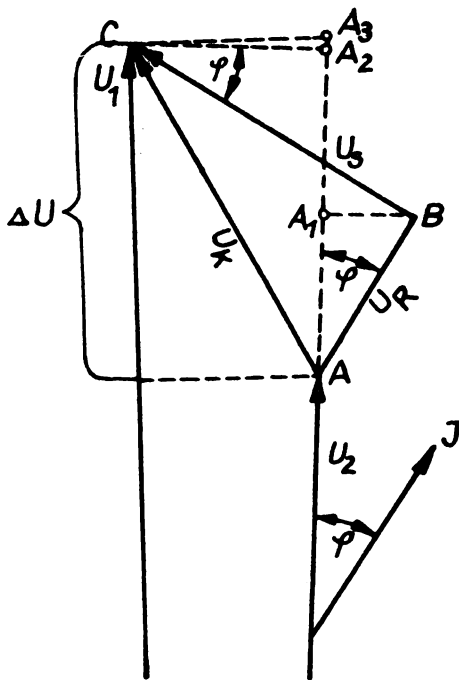


Bild 48. Kurzschlußdreieck aus dem Transformatorendiagramm

$$\overline{AA_1} = U_R \cdot \cos\varphi; \overline{AA_2} = U_s \cdot \sin\varphi; \overline{AA_3} = \Delta U$$

diesem Versuch, so läßt sich der Winkel φ_k ermitteln sowie U_s und U_R . Es ist dann

$$\cos \varphi_k = \frac{N_k}{U_k \cdot I_1} \quad (10)$$

$$U_R = U_k \cdot \cos \varphi_k [\text{V}] \quad (11)$$

$$U_s = U_k \cdot \sin \varphi_k [\text{V}] \quad (11 \text{ a})$$

Wie groß ist jedoch die Spannungsdifferenz zwischen U_1 und U_2 ?

In Bild 48 ist das rechtwinklige Kurzschlußdreieck noch einmal besonders herausgezeichnet. Die algebraische Differenz zwischen \overline{OC} und \overline{OA} entspricht der gestrichelten Linie in der Verlängerung des sekundären Spannungsvektors U_s von A bis A_3 . Sie erkennen aus dem Diagramm, daß der Spannungsabfall ΔU in der Kurzschlußspannung seinen größten Wert erreicht. Dieser Maximalwert stellt sich dann ein, wenn der Vektor U_k in die Verlängerung des Spannungsvektors U_s zu liegen kommt. Der Spannungsabfall wird am geringsten, wenn der Vektor U_R in der Verlängerung von \overline{OA} liegt, also bei $\cos \varphi_2 = 1$.

Was Sie aus der Zeichnung abgreifen, können Sie natürlich auch errechnen. Auf die Verlängerung des Spannungsvektors U_s über A hinaus werden die Punkte B und C projiziert. Der Abschnitt A bis A_1 entspricht dann $U_R \cdot \cos \varphi$, der Abschnitt A_1 bis A_2 entspricht $U_s \cdot \sin \varphi$. Die Summe der beiden Abschnitte ist zwar ein wenig kürzer als die gesamte Spannungsdifferenz von A bis A_3 , aber sie kann mit großer Annäherung für die Berechnung der Spannungsabfälle benützt werden. Es gilt also die Näherungsgleichung

$$\Delta U = U_R \cdot \cos \varphi + U_s \cdot \sin \varphi [\text{V}] \quad (12)$$

Ein 1600-kVA-Transformator 20/0,4 kV besitzt eine Kurzschlußspannung $U_k = 6\%$ und einen Ohmschen Spannungsabfall $u_R = 1,43\%$. Sein Streuspannungsabfall beträgt demnach

$$U_s = \sqrt{U_k^2 - U_R^2} = \sqrt{6^2 - 1,43^2} = \sqrt{33,9} = \underline{\underline{5,82\%}}$$

Bei $\cos \varphi = 0,8$ — entsprechend $\sin \varphi = 0,6$ — errechnet sich die gesamte Spannungsdifferenz

$$\Delta U = 1,43 \cdot 0,8 + 5,82 \cdot 0,6 = \underline{\underline{4,64\%}}$$

Aus dem Kurzschlußdiagramm und aus den Berechnungen haben Sie die Kurzschlußspannung als den Maximalwert der Spannungsänderung bei gleich-

bleibender Primärspannung kennengelernt. Ihre besondere Bedeutung besitzt die Kurzschlußspannung für die Ermittlung des Dauerkurzschlußstromes, der bei einem Sammelschienenkurzschluß, also praktisch bei Klemmenkurzschluß des Transformators, die Wicklungen durchfließen kann. Wenn die Primärspannung gleichbleibt, so ergibt sich der Dauerkurzschlußstrom aus der einfachen Beziehung

$$I_k = I_n \cdot \frac{100}{U_k} [\text{A}] \quad (13)$$

wobei U_k in % angegeben und I_n der primäre Nennstrom ist. Der Wert für den Dauerkurzschlußstrom entspricht beispielsweise bei

$U_k = 3,5\%$ dem 28,5fachen,

$U_k = 6\%$ dem 16,6fachen,

$U_k = 12\%$ dem 8,3fachen Wert des primären Nennstromes.

In der ersten Entwicklungszeit der Hochspannungstechnik bemühte man sich um eine möglichst gleichmäßige Spannungshaltung. Die Transformatorenwicklungen wurden so berechnet und konstruiert, daß sie möglichst geringe Streuungen aufzuweisen hatten. Man war bestrebt, zu den unvermeidlichen Spannungsverlusten in den Fernleitungen nicht noch zusätzliche Spannungsverluste innerhalb der Transformatoren zu erhalten. Es wurden „harte“ Transformatoren gebaut mit Kurzschlußspannungen in der Größenordnung von $3 \cdots 4\%$, und man hat diese harte Bauweise sogar auf Großtransformatoren angewendet. Das ging so lange gut, wie die Kraftwerksleistungen noch klein waren und solange die Kraftwerke noch nicht miteinander im Verbundbetrieb arbeiteten. Im Verbundbetrieb treten durch das Zusammenarbeiten mehrerer Kraftwerke und Transformatoren zu hohe Kurzschlußströme auf, so daß man auf größere Kurzschlußspannungen übergeht.

Heute werden allgemein bereits von 315 kVA aufwärts „weiche“ Transformatoren mit Kurzschlußspannungen von 6 % bis zu 12 % bei den größten Leistungen verwendet. Kleine Kurzschlußspannungen von 3 % sind nur noch bei Ortsnetztransformatoren gebräuchlich. Die weiche, nachgiebige Netzkupplung erhöht die Betriebssicherheit der gesamten Hochspannungsübertragung. Sie bringt allerdings den Nachteil größerer Spannungsgefälle mit sich, die durch zusätzliche Spannungsregelung ausgeglichen werden müssen. Über die dazu erforderlichen Konstruktionen erfahren Sie noch Näheres.

Der oben betrachtete Transformator sei z. B. schon längere Zeit in Betrieb. Sie sollen annehmen, es sei ein selbstkühlender Transformator mit Kühlungsart OS, der gemeinsam mit zwei anderen, gleich großen Transformatoren ein

größeres Versorgungsgebiet speist. Die Gesamtbelastung möge 80 % betragen. Plötzlich fällt aus irgendeinem Grunde einer der beiden anderen Transformatoren aus. Vielleicht ist es ein innerer Fehler im Transformator oder ein äußerer Fehler in der Zuleitung, der das Auslöserelay des Schalters ansprechen läßt. Automatisch gibt er seine Last an die in Betrieb gebliebenen Transformatoren ab, d. h. also, jeder der beiden übriggebliebenen Transformatoren muß 40 % mehr Leistung übernehmen, und der Strommesser zeigt bei beiden Transformatoren eine Überlastung von 20 % über den Nennstrom hinaus an. Der Betriebsleiter des Umspannwerkes muß sich jetzt schnellstens entscheiden, ob er diese Zusatzbelastung seinen Transformatoren zumuten kann oder nicht.

Was ist dabei zu beachten? Zuerst der Blick auf das Thermometer. Es zeigt etwa 70° C Öltemperatur. Also hätten Sie noch 25° C Reserve bis zur Ölgrenztemperatur von 95° C. Das erscheint viel. Es wäre aber falsch abzuwarten, bis diese Temperatur erreicht ist. In [14] hatten Sie bereits erfahren, warum das nicht zulässig ist. Aus den dort angegebenen Gründen müssen Sie vielmehr vor Erreichen der Grenztemperatur die Überlast zurücknehmen. Wann das zu geschehen hat, erkennen Sie aus der nachfolgenden Tabelle, aus der Sie die zulässige Überlastungsdauer des Transformators ablesen können. Um die Tabelle richtig anwenden zu können, brauchen Sie die Vorbelastung des Transformators bzw. seine Öltemperatur zu Beginn der Überlastung.

Tafel 1
Überlastbarkeit von Öltransformatoren

Vorangehende Dauerleistung in % der Nennleistung	Ausgangs-Öltemp. in °C bei Kühlart			Zulässige Überlastungsdauer für Überlastung in % der Nennleistung bei				
	OS	OFA	OWA	10%	20%	30%	40%	50%
50	55	49	41	3 h	1,5 h	1 h	30 min	15 min
75	68	60	50	2 h	1 h	30 min	15 min	8 min
90	78	68	58	1 h	30 min	15 min	8 min	4 min

Sie sehen aus dieser Tabelle, daß der selbstkühlende Öltransformator bei 70° C Ölausgangstemperatur die geforderte Überlastung von 20 % ungefähr eine knappe Stunde lang übernehmen kann, ohne daß seine Wicklungsisolation gefährdet wird. Eine längere Überlastungszeit ist nicht zulässig. Die Tabelle für die Überlastbarkeit der Öltransformatoren wurde nach sorgfältigem Berechnungsvergleich aller Transformatorenfabriken als Normblatt DIN 42549 aufgestellt und gilt selbstverständlich nur für ölfüllte Transformatoren. Am

Ende der jeweils angegebenen Überlastungszeiten erreicht die Wicklungstemperatur bereits den zulässigen Grenzwert von 105° C bei OS bzw. 95° C bei OWA, während das Öl (besonders bei hohen Überlastungen) unter den zulässigen Werten von 95° C bei OS bzw. 85° C bei OWA bleibt, weil die Temperaturunterschiede zwischen Wicklung und Öl quadratisch mit der Überlastung ansteigen.

[17] **Verluste und Wirkungsgrad.** Es ist bereits des öfteren von den Verlusten des Transformators gesprochen worden, besonders im Zusammenhang mit der Erwärmung des Transformators in [14]. Die Verluste entstehen einmal bei der Ummagnetisierung des Eisenkernes, das sind die „Leerlaufverluste“. Man nennt sie so, weil sie bereits beim leerlaufenden Transformator auftreten. Sie sind vorhanden, solange der Transformator eingeschaltet ist, im Gegensatz zu den Verlusten, die durch die Wicklungsbelastung entstehen. Diese Verluste bezeichnet man als „Wicklungsverluste“. Aus früheren Zeiten haben sich auch noch die Bezeichnungen „Eisenverluste“ und „Kupferverluste“ erhalten. Diese sind aber nicht ganz korrekt. Sie wissen, daß die Leerlaufverluste außer den reinen Eisenverlusten auch noch geringe Zusatzverluste enthalten, entsprechend der Stromwärmeleistung des Leerlaufstromes. Die Bezeichnung „Kupferverluste“ entspricht besonders in der heutigen Zeit nicht immer dem verwendeten Wicklungsmaterial. Die „Regeln für Transformatoren“ im VDE definieren daher die Transformatorverluste allgemein und eindeutig als *Leerlaufverluste* und *Kurzschlußverluste* mit den Abkürzungen N_0 und N_k . Unter den Kurzschlußverlusten ist die gesamte Stromwärmeleistung zu verstehen, die bei **Nennstrom und Nennfrequenz in allen Wicklungen und Ableitungen** — also zwischen den Anschlußklemmen des Transformators — im betriebswarmen Zustand verbraucht wird. Der betriebswarme Zustand des Transformators wird festgelegt durch eine Wicklungstemperatur von 75° C.

Durch diese Definition der Kurzschlußverluste werden die OHMSchen Leitungsverluste innerhalb der Wicklung ebenso erfaßt wie die Zusatzverluste, die durch Wirbelstrombildung entstehen. Der Streufluß durchdringt ja nicht nur den Raum zwischen den Wicklungen, sondern auch die Spulen und Stromleiter selbst und erzeugt frequenzabhängige Wirbelstromverluste, die sich als Zusatzverluste zu den OHMSchen Verlusten addieren.

Die Bezeichnung „Kurzschlußverluste“ ist aus der Art der meßtechnischen Ermittlung dieser Verluste abgeleitet. Die Kurzschlußverluste werden bei der Prüfung der Transformatoren ermittelt, indem bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung der Nennstrom eingestellt wird. Hierzu ist auf der Primärseite eine Spannung notwendig, die Sie im vorigen Abschnitt als Kurzschlußspannung kennengelernt haben. Betrachten Sie noch einmal das in Bild 48 dargestellte

Kurzschlußdreieck. Die eine Kathete stellt den Ohmschen Spannungsabfall U_R in Volt oder u_R in % dar, der sich bei Vollast und $\cos \varphi = 1$ ergibt. (Es tritt jedoch auch hier ein Stromstreuspannungsabfall auf.) Dieser Wert ist zahlenmäßig identisch mit dem prozentualen Kurzschlußverlust des Transformators. Wenn Sie also nur den Wert des prozentualen Spannungsabfalls bei Vollast und $\cos \varphi = 1$ kennen ($N_s = N_w$), so läßt sich hieraus der Kurzschlußverlust in Watt errechnen durch Multiplikation der Nennleistung in kVA (kW bei $\cos \varphi = 1$) mit dem 10fachen Wert des prozentualen Ohmschen Spannungsabfalls.

$$N_k = \frac{N \cdot 1000 \cdot u_R}{100} [\text{W}] \quad (14)$$

Bei dem im vorigen Abschnitt angeführten Berechnungsbeispiel hat der 1600-kVA-Transformator mit $u_R = 1,43\%$ einen Kurzschlußverlust von

$$N_k = \frac{N \cdot 1000 \cdot u_R}{100} = \frac{1600 \cdot 1000 \cdot 1,43\%}{100\%} \approx \underline{\underline{22900 \text{ W}}}$$

Die Kurzschlußverluste stellen eine Stromwärmeleistung dar und stehen im quadratischen Abhängigkeitsverhältnis zur Stromstärke. Wenn unser 1600-kVA-Transformator nur zur Hälfte belastet ist, reduziert sich sein Kurzschlußverlust auf ein Viertel des Vollastwertes, also auf 5,7 kW. Die Leerlaufverluste bleiben jedoch immer konstant, sofern sich die Primärspannung nicht verändert.

Wenn Sie die Summe von Leerlaufverlusten und Kurzschlußverlusten als Gesamtverluste des Transformators in Beziehung bringen zu seiner Leistung, so erhalten Sie den **Wirkungsgrad** des Transformators.

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis der abgegebenen Leistung zur zugeführten Leistung.

Die zugeführte Leistung ist um den Betrag der Verluste größer als die abgegebene Leistung. Es gilt also die Gleichung

$$\eta = \frac{N_2}{N_2 + V} \cdot 100 \quad \text{oder} \quad \boxed{\eta = \frac{N_2}{N_1} \cdot 100 [\%]} \quad (15)$$

Dabei ist N_1 die zugeführte, N_2 die abgegebene Leistung.

Die Gleichung $\eta = \frac{N_2}{N_2 + V} \cdot 100$ läßt sich auch in anderer Form schreiben

$$\eta = \frac{N_2}{N_2 + V} \cdot 100 = \frac{(N_2 + V) - V}{N_2 + V} \cdot 100 = \left(1 - \frac{V}{N_2 + V}\right) \cdot 100$$

Sie erhalten dadurch die in der Praxis übliche Form

$$\eta = 100 - 100 \cdot \frac{V}{N_2 + V} [\%] \quad (15a)$$

oder in Worten:

$$\eta = 100 - \frac{100 \cdot \text{Gesamtverluste in kW}}{\text{Wirkleistung in kW} + \text{Gesamtverluste in kW}}$$

Den Wirkungsgrad gibt man bei Nennleistung und $\cos \varphi = 1$ an. Mit Hilfe der Formel (15a) sollen Sie den Wirkungsgrad des 1600-kVA-Transformators berechnen.

Lehrbeispiel 2

Bei einem Übersetzungsverhältnis 20/0,4 kV hat der Transformator 4900 W Leerlaufverluste und 1,43 % Spannungsabfall bei Vollast und $\cos \varphi = 1$.

Wie groß sind die Kurzschlußverluste?

Lösung:

Die Leerlaufverluste bleiben konstant, also 4900 W. Die Kurzschlußverluste ergeben nach Seite 58:

bei $\frac{1}{4}$ -Last:

$$N_{K\frac{1}{4}} = \frac{1600 \cdot 1000 \cdot 1,43 \%}{100 \%} \approx \underline{\underline{22900 \text{ W}}}$$

bei $\frac{2}{4}$ -Last:

$$\frac{N_{K\frac{1}{4}}}{16} \cdot 9 = \frac{22900 \text{ W} \cdot 9}{16} \approx \underline{\underline{12900 \text{ W}}}$$

bei $\frac{3}{4}$ -Last:

$$\frac{N_{K\frac{1}{4}}}{16} \cdot 4 = \frac{22900 \text{ W} \cdot 4}{16} \approx \underline{\underline{5700 \text{ W}}}$$

bei $\frac{1}{4}$ -Last:

$$\frac{N_{K\frac{1}{4}}}{16} \cdot 1 = \frac{22900 \text{ W}}{16} \approx \underline{\underline{1430 \text{ W}}}$$

Die Gesamtverluste sind die Summe von

Leerlaufverlusten und Kurzschlußverlusten.

Die Werte werden in einer Tafel zusammengestellt, so daß man eine bessere Übersicht hat:

Belastung	$\frac{1}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$
Leerlaufverluste [W]	4900	4900	4900	4900
Kurzschlußverluste [W]	22900	12900	5700	1430
Gesamtverluste [W]	27800	17800	10600	6330

Bei $\cos \varphi = 1$ können Sie die Wirkleistung in kW gleichsetzen mit der Nennleistung in kVA. Wenn Sie die Gesamtverluste in die vorher angeführte Formel einsetzen, ergeben sich also für die verschiedenen Belastungen folgende Wirkungsgrade:

$$\eta_{1/4} = 100\% - \frac{100\% \cdot 27,8 \text{ kW}}{1600 \text{ kW} + 27,8 \text{ kW}} = 100 - 1,71 = \underline{\underline{98,29\%}}$$

$$\eta_{1/2} = 100\% - \frac{100\% \cdot 17,8 \text{ kW}}{1200 \text{ kW} + 17,8 \text{ kW}} = 100 - 1,46 = \underline{\underline{98,54\%}}$$

$$\eta_{3/4} = 100\% - \frac{100\% \cdot 10,6 \text{ kW}}{800 \text{ kW} + 10,6 \text{ kW}} = 100 - 1,31 = \underline{\underline{98,69\%}}$$

$$\eta_{100\%} = 100\% - \frac{100\% \cdot 6,33 \text{ kW}}{400 \text{ kW} + 6,33 \text{ kW}} = 100 - 1,56 = \underline{\underline{98,44\%}}$$

Bei anderen Leistungsfaktoren muß die entsprechend kleinere Wirkleistung eingesetzt werden. Haben Sie die Wirkungsberechnung mit $\cos \varphi = 1$ bereits ausgeführt, so können Sie mit genügender Genauigkeit den Differenzbetrag durch den vorliegenden $\cos \varphi$ dividieren. Wenn Sie mit einem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,8$ rechnen, würde sich für den Wirkungsgrad dieses Transformators z. B. bei $3/4$ -Last ergeben

$$\eta_{3/4} = 100\% - \frac{1,46\%}{0,8} = 100 - 1,83 = \underline{\underline{98,17\%}}$$

Wenden Sie diese Differenzrechenmethode auf einige andere Beispiele an! Sie erkennen aus dem durchgerechneten Lehrbeispiel unseres 1600-kVA-Transformators, daß der Wirkungsgrad bei Vollast nicht am höchsten ist. Der zahlenmäßige Höchstwert wird vielmehr infolge der heute üblichen Verlustaufteilung zwischen Eisenkern und Wicklung mit dem ungefähren Verhältnis 1 : 4 erreicht (etwa bei Halblast). Wenn das Verlustaufteilungsverhältnis kleiner wird, verschiebt sich der maximale Wirkungsgrad nach dem Vollastpunkt, um diesen beim Verlustverhältnis 1 : 1 zu erreichen. Sie erkennen weiter, daß die zahlenmäßigen Unterschiede der Wirkungsgrade zwischen $1/4$ - und $3/4$ -Last relativ sehr gering sind. Absolut betrachtet ist der Transformatorenwirkungsgrad im Vergleich zu anderen elektrischen Maschinen so überragend hoch, daß er von keinem anderen Übertragungsorgan erreicht wird. Sie haben bereits erfahren, daß die Wirkungsgrade der Großtransformatoren zwischen 99,0 und 99,5 % liegen.

Bild 49 zeigt Ihnen den Wirkungsgradverlauf eines Transformators.

Bei energiewirtschaftlichen Betrachtungen ist zuweilen auch vom Jahreswirkungsgrad der Transformatoren die Rede. Unter dem Jahreswirkungsgrad

versteht man das Verhältnis der im Laufe des Jahres dem Transformator entnommenen zu den zugeführten Kilowattstunden. Das Verhältnis wird um so ungünstiger, je länger der Transformator im Leerlauf betrieben wird. Der höchste Jahreswirkungsgrad wird erzielt bei Dauerbetrieb mit gleichbleibender Belastung.

[18] Schaltungen und Parallellauf. Der Ausgangspunkt all dieser Betrachtungen ist immer wieder der Einphasen-Transformator, aus dessen einfacher Bauform die Mehrphasen-Transformatoren, insbesondere der Drehstrom-Transformator, entwickelt worden sind. Über Einphasenschaltungen ist nichts Besonderes zu sagen. Die Wicklungsanfänge und -enden eines Einphasen-Transformators stellen zugleich die Anschlußklemmen dar.

Bei Mehrphasen-Transformatoren dagegen können die Wicklungsenden der Primär- und der Sekundärwicklung ganz verschieden geschaltet werden, wobei sich abweichende Strom- und Spannungsverhältnisse in den einzelnen Phasen ergeben und auch gegenseitige Beeinflussungen auftreten. Von den Mehrphasenschaltungen sollen Sie im Rahmen dieses Abschnittes nur die Dreiphasenschaltung kennenlernen.

Bei der Dreieckschaltung werden die Enden der drei Schenkelwicklungen entsprechend dem gezeichneten Schaltbild (Tafel 2) verbunden. Die Stromzuführung und -ableitung erfolgt jeweils an den drei Ecken des Dreiecks.

Bei der Sternschaltung sind die Enden der drei Schenkelwicklungen zu einem gemeinsamen Punkt zusammengeschlossen, der als Sternpunkt oder als Nullpunkt bezeichnet wird. Der Leitungsanschluß erfolgt an den freien Wicklungsenden.

Bei den Kurzbezeichnungen an Drehstrom-Transformatoren sind einmal die VDE-, zum anderen die IEC-Abkürzungen für die einzelnen Schaltarten (s. Tafel 2) zu unterscheiden. Die IEC-Abkürzungen haben den Vorteil, daß die einzelnen Buchstaben die Schaltart angeben, so z. B.

- D Dreieckschaltung,
- Y Sternschaltung,
- Z Zickzackschaltung.

Die Großbuchstaben gelten für die Oberspannungs- und die Kleinbuchstaben für die Unterspannungsseite. Weiter ist noch eine Zahl angefügt, welche die sogenannte Schaltgruppe angibt. Wichtig ist, daß Sie bei der Parallelschaltung nur Transformatoren verwenden können mit gleicher Phasenlage, d. h. mit gleicher Schaltgruppe.

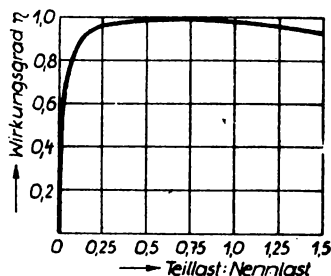


Bild 49. Wirkungsgradlinie

Tafel 2

Schaltgruppe	Schaltung		Vektorbild		Schaltbild		Sekundärer Nulleiter
	VDE	IEC	Oberspg.	Unterspg.	Oberspg.	Unterspg.	
A bzw. 0	A 1	Dd 0					nicht vorhanden
	A 2	Yy 0					wenig belastbar
	A 3	Dz 0					voll belastbar
B bzw. 6	B 1	Dd 6					nicht vorhanden
	B 2	Yy 6					wenig belastbar
	B 3	Dz 6					voll belastbar
C bzw. 5	C 1	Dy 5					voll belastbar
	C 2	Yd 5					nicht vorhanden
	C 3	Yz 5					voll belastbar
D bzw. 11	D 1	Dy 11					voll belastbar
	D 2	Yd 11					nicht vorhanden
	D 3	Yz 11					voll belastbar

Schaltungen und Schaltgruppen von Drehstrom-Transformatoren nach dem
Vorschriftenwerk deutscher Elektrotechniker

So wird z. B. von der Schaltgruppe A bzw. 0 die Spannung mit unveränderter Phasenlage übertragen. Bei Schaltgruppe B bzw. 6 findet eine Phasendrehung von 180° statt, wie die Vektorenbilder zeigen. Schaltgruppe C bzw. 5 dreht um 150° zurück und Schaltgruppe D bzw. 11 um 30° vorwärts. Tafel 2 zeigt Ihnen das Vektorbild, das Schaltbild sowie die Belastungsart des sekundären Nulleiters.

Aus der einfachen Sternschaltung wird die **Doppelsternschaltung** oder **Zickzackschaltung** abgeleitet. Die Wicklungen jedes Schenkels werden in zwei Hälften unterteilt, und die obere Wicklungshälfte eines Schenkels wird mit der unteren Wicklungshälfte des Nachbarschenkels zur Sternschaltung verbunden. Dabei ist der Richtungssinn entsprechend den gezeichneten Schaltbildern genauestens zu beachten.

Da die IEC-Schaltgruppenbezeichnungen noch nicht allzulange (erst seit 1940) von Deutschland übernommen worden sind, müssen Sie sich auch die bisherigen VDE-Bezeichnungen in der ersten Spalte der Schaltungstafel einprägen. Bei der langen Lebensdauer unserer Transformatoren werden Sie noch viele Jahre die alten Bezeichnungen auf den Leistungsschildern unserer Transformatoren finden.

Sie werden fragen, warum eigentlich so viele verschiedene Schaltungen erforderlich sind.

Die Sternschaltung hat den Vorteil, daß sie den Netznullpunkt bildet, der zum Anschluß eines Nulleiters im Drehstromverteilungsnetz oder zum Anschluß von Erdschlußspulen gebraucht wird. Eine Belastung des Nullpunktes ist allerdings nur bis zu 10 % des Nennstromes möglich und dies auch nur bei Kerntransformatoren, bei Manteltransformatoren nicht; denn der Spannungsabfall wird sonst in der belasteten Phase zu groß, und die Klemmenspannungen in den unbelasteten Phasen steigen stark an. Zur Speisung von Netzen mit Nulleiter ist also nur eine Schaltung geeignet, die auch bei einphasiger Belastung gegen Null auf der Zubringerseite die Symmetrie des Spannungs-dreiecks nicht beeinflußt.

Diese ausgleichende Wirkung bei einphasiger Wicklungsbelastung geht von der *Dreieckschaltung* aus oder auch von der *Zickzackschaltung*. Bei diesen Schaltungen wird der im Nullpunkt eintretende einphasige Belastungsstrom jeweils auf zwei Schenkel verteilt. Alle Transformatoren, bei denen eine Dreieckswicklung oder eine Zickzackwicklung mit einer Sternwicklung kombiniert ist, besitzen volle Nullpunktbelastbarkeit. Wie bereits erwähnt, werden von der reichen Auswahl aber nur die Schaltungen der C-Gruppe verwendet. Dieselbe ausgleichende Wirkung bei einphasiger Wicklungsbelastung erzeugt auch die sogenannte *Dreiecksausgleichswicklung*, die besonders bei größeren Transformatoren gern als dritte Wicklung eingebaut wird.

Konstruktive und wirtschaftliche Gründe haben im Laufe der Entwicklung zu der nachfolgend skizzierten zweckmäßigen Anwendung der vier Hauptschaltungen geführt:

Verwendung als	Schaltung
kleine Ortsnetz-Verteilungstransformatoren bis etwa 315 kVA	$Y z 5 = C 3$
größere Verteilungstransformatoren ab 315 kVA aufwärts	$D y 5 = C 1$
Netztransformatoren höherer Spannungen und Kupplungstransformatoren von Hochspannungs- netzen bei gering belastetem Nullpunkt	$Y y 0 = A 2$
Netztransformatoren und Kupplungstransforma- toren bei vollbelastetem Nullpunkt	$Y y 0 = A 2$ mit Dreieckausgleichs- wicklung
Maschinentransformatoren in Kraftwerken	$Y d 5 = C 2$

Im Interesse rationeller Fertigung und Betriebsführung wäre es zweifellos sehr erwünscht, wenn eine Beschränkung auf diese Schaltungen zustande käme. Leider bestehen aber oft Hemmungen durch die Rücksichtnahme auf vorhandene Transformatoren, mit denen die neuzubeschaffenden parallel arbeiten sollen.

Tafel 2, in der die Schaltungen zusammengestellt sind, enthält vier verschiedene Schaltgruppen (A — B — C — D). Innerhalb jeder einzelnen Schaltgruppe können Sie die eingezeichneten Vektorenbilder auf der Oberspannungs- und auf der Unterspannungsseite völlig zur Deckung bringen. Das gelingt jedoch nicht zwischen den verschiedenen Schaltgruppen. Wenn Sie z. B. die Schaltbilder von A und B aufeinanderlegen, dann werden Sie feststellen, daß die Anschlußklemmen der Unterspannungsseite um 180° verkehrt liegen. Ähnlich ist es beim Vergleich zwischen den anderen Schaltgruppen. Sie können in keinem Falle zur Deckung gebracht werden. Nur zwischen den Schaltgruppen C und D läßt sich eine Übereinstimmung herstellen durch zyklische Vertauschung der Anschlußklemmen nach folgendem Vertauschungsschema:

	Oberspannung	Unterspannung
Sammelschienen	R S T	r s t
Schaltgruppe C	U V W	u v w
Schaltgruppe D wahlweise	U W V	w v u
	W V U	v u w
	V U W	u w v

Eine vollkommene Übereinstimmung der vektoriellen Lage der Klemmenspannungen auf beiden Seiten des Transformators ist die erste Voraussetzung für die Möglichkeit des Parallelbetriebes zwischen mehreren Transformatoren. Was ist, unter „Parallelbetrieb“ zu verstehen, und welche Bedingungen sind zu erfüllen?

Parallelbetrieb von Transformatoren ist gegeben, wenn diese auf der Oberspannungsseite und auf der Unterspannungsseite parallelgeschaltet sind und wenn die Lastverteilung auf die Transformatoren ihren Nennleistungen entspricht.

Wenn die Bedingungen für den einwandfreien Parallellauf von Transformatoren formuliert werden sollen, so ist es notwendig, daß sich die Spannungsvektoren in ihrer Richtung und Größe decken und ebenso die Kurzschlußdreiecke. Bekanntlich setzen sich diese aus den Ohmschen und den induktiven Spannungsabfällen des Transformators zusammen mit der Kurzschlußspannung als Hypotenuse.

Diese Bedingungen bedeuten in der Praxis:

1. gleiche Schaltung,
2. gleiche Übersetzung,
3. gleiche Kurzschlußspannung.

Die erste Bedingung ist eine kategorische Forderung, von der keine Abweichung zulässig ist.

Zur Erfüllung der zweiten Bedingung ist es erforderlich, die parallellaufenden Transformatoren auf die gleichen Windungsanzapfungen einzustellen, die bei allen Netztransformatoren grundsätzlich auf der Oberspannungsseite vorgesehen werden (Bild 50).

Über Regeltransformatoren s. [20]. Geringe prozentuale Unterschiede in den Übersetzungsverhältnissen verursachen besonders bei kleinen Kurzschlußspannungen erhebliche Ausgleichsströme. Die dritte Bedingung, gleiche Kurzschlußspannung soll nach Möglichkeit unter Berücksichtigung der gegebenen Verhältnisse erfüllt werden. Bei Abweichungen von mehr als $\pm 10\%$ vom Mittelwert der Kurzschlußspannung der bereits vorhandenen Transformatoren entstehen genau wie bei verschiedenen Übersetzungsverhältnissen Ausgleichsströme, mit denen sich die parallelgeschalteten Transformatoren gegenseitig belasten. Eine Vorbelastung ist aber sehr unerwünscht, denn es soll ja die Transformatorenleistung voll ausgeschöpft werden.

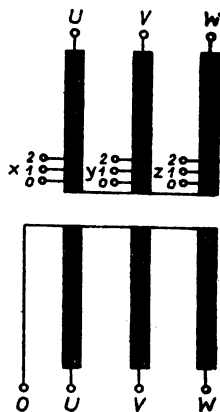


Bild 50. Wicklungsanzapfung

Beim Sammelschienenparallellauf von Transformatoren mit verschiedenen großer Kurzschlußspannung belasten sich die Transformatoren im umgekehrten Verhältnis ihrer Kurzschlußspannungen.

Das bedeutet: Der Transformator mit der größeren U_k entlastet sich, und der Transformator mit der kleineren U_k überlastet sich. Warum ist das so? Denken Sie an die Definition der Kurzschlußspannung in [16]!

Haben z. B. zwei gleiche Transformatoren je 100 kVA mit 3 bzw. 4 % U_k , so verteilt sich die Gesamtlast im Verhältnis 3 : 4. Wenn der Transformator mit der kleineren U_k bereits 100 kVA abgibt, leistet der andere mit der größeren U_k erst 75 kVA. Die Gesamtleistung von 200 kVA kann also gar nicht ausgenützt werden, es sei denn, der erste Transformator wird überlastet.

Bei verschieden großen Leistungen ist es zweckmäßig, für den kleinen, schwächeren Transformator die größere Kurzschlußspannung zu wählen (wenn man die Wahl hat). Dem stärkeren Transformator kann man eher eine größere Last zumuten. Bei einem Leistungsunterschied größer als 3 : 1 wird empfohlen, auf einen Dauerparallellauf zu verzichten. Das Lastverhältnis wird zu ungleich. Alle diese Erscheinungen werden wesentlich gemildert, wenn die Transformatoren nicht auf Sammelschienen, sondern nur im Netz parallel arbeiten, weil durch die zwischen den Transformatoren liegenden Netzstrecken ein Ausgleich geschaffen wird.

[19] Transformatorenschutz. Die Sorge um Pflege und Erhaltung der Transformatoren ist von jeher in den Vordergrund gestellt worden. Das beweisen die zahlreichen Einrichtungen und Geräte, die speziell zum Schutz der Transformatoren entwickelt worden sind. In der heutigen Zeit ist die Anwendung dieser Schutzgeräte zur volkswirtschaftlichen Notwendigkeit geworden, einmal um die in den Transformatoren investierten Vermögenswerte zu erhalten, zum anderen um die technische Sicherheit der Energieübertragung zu gewährleisten.

Nach dem Verwendungszweck werden unterschieden: Geräte zur *Schadenverhütung* und Geräte zur *Schadenbegrenzung*.

Bei der Schadenverhütung kommt es grundsätzlich darauf an, die Lebensbedingungen des Transformators, d. h. seinen Isolationszustand, so gut und so lange wie möglich zu erhalten. Im 4. Kapitel haben Sie die Schwächen der in der Transformatorentechnik verwendeten Isolierstoffe kennengelernt. Ihre schlimmsten Feinde sind Feuchtigkeit und Temperaturen über 105° C. Wenn Sie zuerst den Trockentransformator betrachten, so stellen Sie fest, daß er reichlich ungeschützt ist. Das ist ja auch der Grund für seine begrenzte Anwendbarkeit, die sich auf trockene Räume beschränken muß. Die Schutzeinrichtungen für Transformatoren erstrecken sich vor allem auf Temperatur-

kontrolle und auf Überstromschutz. Die Überstromrelais sollen beim Erreichen der Nennleistung des Transformators warnend ansprechen oder bei Überlastung abschalten. Überlastungen sind bekanntlich nicht zulässig.

Bei Öltransformatoren ist die Messung der Öltemperatur die einzige Möglichkeit der Wärmekontrolle. Die wirklichen Höchsttemperaturen im Innern der Wicklung lassen sich leider mit einfachen Mitteln nicht beobachten. Sie müssen sich mit den indirekt über das Öl ermittelten Durchschnittswerten begnügen.

Die ständige *Temperaturkontrolle* wird bei OS-Transformatoren in einer Tauchhülse unter dem Gefäßdeckel, bei OFA- oder OWA-Transformatoren zusätzlich am Öleinlauf- und Ölauslaufventil mit einfachen Thermometern oder mit Kontaktthermometern durchgeführt. Bei Großtransformatoren benutzt man Flüssigkeits-Fernthermometer, die ein verlängertes Kapillarrohr besitzen, oder elektrische Widerstands-Fernthermometer für Fernanzeige auf der Schaltwarte, wie sie in den Kraftwerken auch für die Temperaturüberwachung der Generatoren verwendet werden. Bei kleineren Transformatoren ist der Thermogefahrmelder sehr beliebt, der als Bimetall-Thermostat zur direkten elektrischen Kontaktgabe geeignet ist und bei Erreichen einer einstellbaren Grenztemperatur ein Warnsignal auslöst oder bei vollautomatischen Anlagen eine Zusatzkühlung einschaltet. Sein Einbau erfolgt ebenfalls in der heißesten Ölschicht unter dem Gefäßdeckel.

Bei Transformatoren in Kraftwerkanlagen oder in weitläufigen Großumspannwerken ist es zweckmäßig, auch den äußeren Wärmekreislauf in das Überwachungssystem einzubeziehen. Es muß also signalisiert werden, wenn der Öl- oder Wasserumlauf bzw. der Kühlluftstrom unterbrochen ist, denn Sie wissen ja, daß die Kesselwände eines Großtransformators seine Verluste nur zu einem Bruchteil abführen können. Auch hierfür besitzen wir kontaktgebende Geräte, Rückschlagklappen usw.

Das war eine Zusammenfassung der vorbeugenden Schutzmaßnahmen gegen den zerstörenden Einfluß hoher Temperaturen auf die aus Papier bestehende Windungsisolaton. Aber auch dem Öl müssen Sie besondere Aufmerksamkeit widmen. Das Transformatorenöl ist, wie Sie wissen, sehr empfindlich gegen Feuchtigkeit und in heißem Zustand auch gegen Luft, an deren Berührungsfläche es sich durch Sauerstoffaufnahme zersetzt. Der Verschluß des Transformatorengefäßes durch einen Deckel nützt sehr wenig, denn das Öl kommt unter dem Deckel stets mit Luft und Kondensfeuchtigkeit in Berührung, die sich in der „Atemluft des Transformators“ niederschlägt. Das Volumen seiner Ölfüllung ändert sich ständig zwischen Erwärmung und Abkühlung, so daß ein Luftaustritt bzw. -eintritt in das Gefäß stattfindet. Diese Atemluft kann

Luftfeuchtigkeit in den Kessel bringen, so daß eine Verschlechterung der Durchschlagsfestigkeit eintritt. Bei einem Temperaturunterschied von 100°C beträgt die Volumenvergrößerung etwa 0,7 %.

Wie können Sie das Öl vor Verschlechterung bewahren? Wie können Sie es konservieren? Bei jedem modernen Transformator ist seitlich über den Niederspannungsdurchführungen eine horizontale Trommel aufgebaut (bei Großtransformatoren auf besonderem Konsol ein viereckiger Kasten). Dieser Behälter, durch ein Rohr mit dem Transformatorengefäß verbunden, ist der Ölkonservator, der auch **Ölausdehnungsgefäß** genannt wird. Das Transformatorengefäß kann durch den Aufbau dieses zusätzlichen Ölbehälters jetzt völlig mit Öl gefüllt werden bis zu der „kalten“ Ölstandsmarke im Ausdehnungsgefäß. Das darin befindliche Öl nimmt weder an der Zirkulation noch an der Erwärmung teil und schließt elastisch den Ölinhalt des Transformatorengefäßes von den Einflüssen der Außenwelt konservierend ab.

Die verkleinerte, kühlbleibende Öloberfläche im Ausdehnungsgefäß wird von der Luft weniger angegriffen. Überdies kann die Berührungsfläche weiter verringert werden durch einen schwimmenden Zwischendeckel, der die Ölstandsschwankungen mitmacht. Die grundsätzliche Anordnung und Bauart ersehen Sie aus der schematischen Darstellung in Bild 51.

Das Ausdehnungsgefäß muß natürlich oben offen sein. Unvermeidliches Kondenswasser sinkt im Öl zu Boden. Wichtig ist, daß das Verbindungsrohr

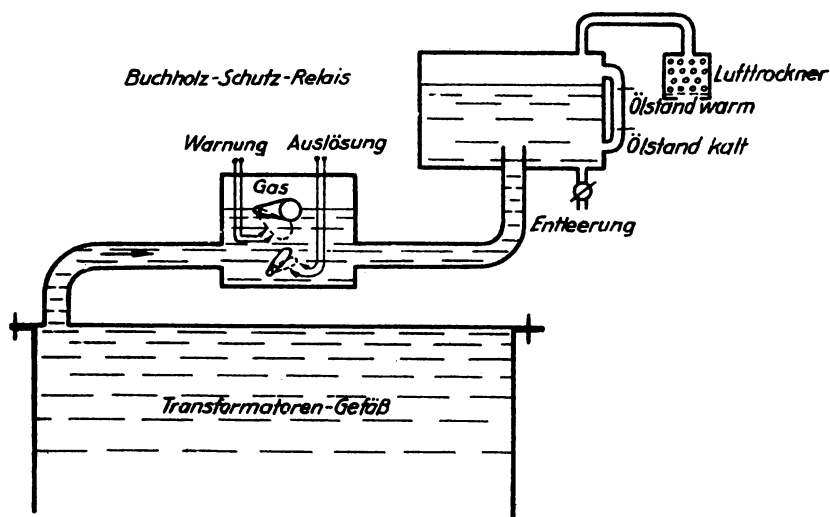


Bild 51. Ölverlauf, Transformator und Ausgleichgefäß

zum Transformatorengefäß einige Zentimeter über den Boden des Ausdehnungsgefäßes hinausragt, damit das feuchte Öl aus dem Ölsumpf nicht zurückfließen kann. Es soll vielmehr von Zeit zu Zeit aus einem Entleerungshahn abgelassen werden.

Unsere Vorsorge für den Transformator erstreckt sich zuletzt sogar auf seine Atemluft. Um zu verhüten, daß durch das Entlüftungsventil Staub und Feuchtigkeit in das Innere des Transformators eintreten können, wird ein Staubfilter mit Luftentfeuchter vorgeschaltet, den die eingesaugte Luft unbedingt passieren muß. Er ist mit einer hygroscopischen Trockensubstanz gefüllt, die bei Durchfeuchtung ihre Farbe ändert. Sie läßt sich durch Trocknen leicht regenerieren.

Man müßte meinen, daß bei dieser Vielzahl von vorsorglichen Schutzeinrichtungen nur selten Defekte eintreten können. In der Tat ist auch die Fehlerquote bei Transformatoren sehr gering, wenn die betriebliche Überwachung konsequent durchgeführt wird. Bei gleichmäßiger Beanspruchung ist auch die Lebensdauer der Transformatoren entsprechend lang. Davon zeugen zahlreiche Transformatoren, die schon mehr als 30 und 40 Jahre Dienst getan haben.

Transformatorenschäden können ihre Ursache haben in allmählicher Verbrennung und Zermürbung der Isolation durch Dauerüberlastung bei unzureichender Ölzirkulation oder in mechanischen Schäden, die durch gegenseitige Bewegung von Wicklungsteilen bei mangelhafter Verspannung bzw. durch Druck und Quetschungen bei Belastungsstößen entstehen. Solche Fehlerstellen entziehen sich der äußeren Kontrolle.

Für die *Anzeige eines in der Entstehung begriffenen Schadens* kommt der chemische Vorgang der *Gasbildung* sehr zustatten. Gas entwickelt sich als Zersetzungsprodukt aus Öl bei jedem Spannungsdurchschlag. Die entstehenden Gasblasen steigen im Öl nach oben, gleiten unter dem glatten Gefäßdeckel entlang und finden ihren Weg in das Verbindungsrohr zum Ölausdehnungsgefäß. In diesem Engpaß werden sie aufgefangen und zur Bedienung eines Relais benutzt, das ein Warnsignal betätigt oder die Abschaltung des Transformators bewirkt. Dieses sinnvoll gebaute Gasrelais wird nach seinem Erfinder BUCHHOLZ-Relais genannt. Seine Wirkung geht aus der schematischen Darstellung des Bildes 51 hervor, während Bild 52 die praktische Bauform eines solchen Relais im Schnitt zeigt. Die Gasblasen sammeln sich in dem oberen Teil des zylindrischen Behälters, wo sie durch ein Schauglas sichtbar werden. Beim allmählichen Absinken des Ölspiegels infolge der Verdrängung durch das Gas sinkt auch der obere Schwimmkörper nach unten und gibt mit seinem Quecksilberkippschalter Kontakt für das Warnsignal. Mit Hilfe eines Gasprüfgerätes kann

man nun feststellen, ob das angesammelte Gas brennbares Zersetzungsgas ist oder ob es sich nur um Luft handelt. Bei einem umlaufgekühlten Transformator kann beim Undichtwerden der Ölpumpe Luft eintreten. Bisweilen bleiben auch bei ungenügender Evakuierung Luftreste im Transformator zurück. Durch die

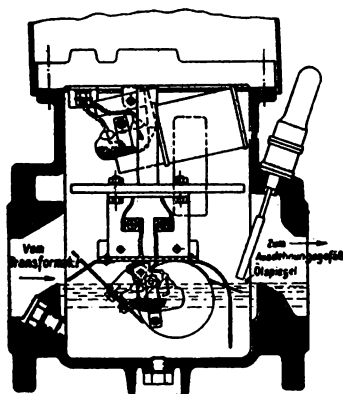


Bild 52. Schnitt durch das BUCHHOLZ-Schutzrelais

Prüfung der Zersetzungsgase können wertvolle Hinweise auf die Lage der Fehlerstelle im Innern des Transformators gefunden werden. Wennsichinfolge Windungsschlusses die Fehlerstelle schnell vergrößert, tritt eine stürmische Gasentwicklung ein, die eine Druckwelle auslöst. Die beschleunigte Ölströmung nach dem Ausdehnungsgefäß trifft bei ihrem Durchgang direkt auf den unteren Schwimmkörper des BUCHHOLZ-Relais, der durch seine Kippbewegung unverzüglich den Auslösekontakt für die Abschaltung des defekten Transformators schließt. Wenn der untere Schwimmer des BUCHHOLZ-Relais anspricht, ist somit ein Windungsschluß bzw. Phasenkurzschluß oder ein Erdschluß vor-

handen. Solche Schäden werden bei Großanlagen auch von dem Differentialschutz angezeigt, der ganz allgemein zum Schutz von Kraftwerks- und Übertragungsanlagen verwendet wird.

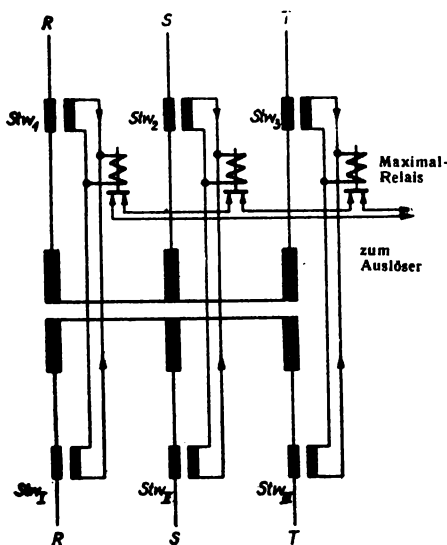


Bild 53. Differentialschutz

In Bild 53 sind die Ströme der Stromwandler gegeneinander gerichtet. Die Sekundärströme von Stw_1 und Stw_1 sind im normalen Betriebszustand der Anlage gleich groß. Tritt auf einer Seite des Transformators ein Fehlerstrom auf, hervorgerufen durch Windungsschluß oder ähnliche Fehler, so führt einer der Stromwandler einen größeren Strom als der andere, und es entsteht ein Differenzstrom, der ein Maximal-Relais zum Ansprechen bringt und den Transformator durch einen Schalter (Auslöser) von der

Anlage trennt. Wichtig ist, daß die Stromwandler genau abgeglichen sind und gleiche Charakteristik besitzen, damit keine Fehlauslösungen auftreten.

Zusammenfassung

In dem VDE 0532 §§ 62 bis 66 sind Wirkungsgrad und Verluste von Transformatoren festgelegt. Die einzelnen Werte bei Leerlauf bzw. bei Belastung werden in Diagrammen dargestellt, um damit eine Beurteilung des Transformators zu geben.

Das KAPPSche Dreieck stellt das Spannungsverlustdreieck dar. Bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung und bei Nennstrom lassen sich aus Leistungs-, Strom- und Spannungsmessung die einzelnen Spannungsabfälle ermitteln. In diesem Fall ist $U_k = U_1$. Für Leistungen über 315 kVA benutzt man Transformatoren mit großer Kurzschlußspannung, sogenannte „weiche“ Transformatoren.

Nach der Größe der Transformatoren richtet sich die Kühlart (VDE 0532 § 22). Bei Parallelschaltung von Transformatoren müssen diese

- a) gleiche Schaltung,
- b) gleiche Übersetzung,
- c) gleiche Kurzschlußspannung

besitzen.

Wichtig als Transformatorenschutz sind der BUCHHOLZ-Schutz sowie der Differentialschutz.

Übungen

- 22. *Wodurch entsteht der Spannungsabfall bei Belastung des Transformators?*
- 23. *Ein 50-kVA-Transformator 10/0,4 kV hat 1350 W Kurzschlußverluste bei einer prozentualen Kurzschlußspannung von 3,8%.*
 - a) *Wie groß ist sein Spannungsabfall bei $\cos \varphi = 1$?*
 - b) *Wie groß ist sein Spannungsabfall bei $\cos \varphi = 0,7$?*
 - c) *Wie groß ist der Dauerkurzschlußstrom bei Klemmenkurzschluß des Transformators?*
- 24. *Aus welchen Einzelverlusten setzt sich der Gesamtverlust zusammen?*
- 25. *Ein 500-kVA-Transformator 10/0,4 kV hat 1900 W Leerlaufverluste und 9240 W Kurzschlußverluste. Wie groß ist sein Wirkungsgrad*
 - a) *bei $\frac{1}{4}$ -, $\frac{3}{4}$ -, $\frac{2}{4}$ -Last und $\cos \varphi = 1$,*
 - b) *bei Halblast und $\cos \varphi = 0,8$,*
 - c) *bei Dreiviertellast und $\cos \varphi = 0,7$?*

26. Wie wird bei Drehstromtransformatoren die volle Nullpunktsbelastbarkeit hergestellt?
27. Welche gebräuchlichen VDE- und IEC-Schaltgruppen besitzen die volle Nullpunktsbelastbarkeit?
28. Was verstehen Sie unter Parallelbetrieb von Transformatoren?
29. Welche Bedingungen sind für den einwandfreien Parallelbetrieb der Transformatoren zu erfüllen?
30. Wie belasten sich zwei Transformatoren im Sammelschienenparallellauf bei verschieden großer Kurzschlußspannung?
31. Welchem Zweck dient das Ölausdehnungsgefäß?
32. Warum muß die im Transformator herrschende Temperatur überwacht werden?
33. Wozu dient das BUCHHOLZ-Relais?

7. Kapitel: Sonderausführungen

[20] Der Spartransformator. Das Charakteristikum des Leistungstransformators besteht darin, daß die Leistung von der Primärwicklung zur Sekundärwicklung ausschließlich induktiv übertragen wird. Im Spartransformator haben Sie dagegen einen Transformator vor sich, bei dem die Leistung nur zum Teil

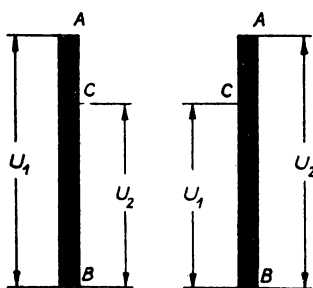


Bild 54. Schaltung von Spartransformatoren

induktiv, zum anderen Teil unmittelbar übertragen wird. Sie sehen das aus den grundsätzlichen Schaltbildern solcher Transformatoren, wie sie in Bild 54 gezeichnet sind.

Die Primär- und die Sekundärwicklung des Leistungstransformators sind beim Spartransformator zu einer einzigen Wicklung vereinigt, so daß Sie sich eine fortlaufende Wicklung denken können von A bis B, die in dem linken Schema von der angelegten Netzspannung U_1 erregt wird. Aus der

Wicklung ist der Punkt C herausgezogen, und es läßt sich an Bund C die Sekundärleistung entnehmen. Den Punkt C können Sie nach Belieben wählen. Er teilt die Spannung AB im Verhältnis von AC zu CB genauso wie ein Widerstandsspannungsteiler, den Sie bereits in „Grundlagen der Elektrotechnik“ Lehrbrief 2 kennengelernt haben. Beim „induktiven“ Spannungsteiler haben Sie jedoch im Gegensatz zum Widerstandsspannungsteiler den Vorteil, daß Sie die Spannung U_1 nicht nur durch Teilung auf die Spannung U_2 erniedrigen können. Sie haben auch die Möglichkeit, die Spannung U_1 auf U_2 zu erhöhen. Die niedrigere

Spannung U_1 wird an der Anzapfung C angelegt, wie es im rechten Schema gezeigt ist. Günstig ist bei dem induktiven Spannungsteiler gegenüber dem Widerstandsspannungsteiler, daß die Ausgangsspannung nahezu unabhängig von der Belastung ist.

Auch für die induktive Spannungsteilung gelten die im ersten Kapitel aufgestellten transformatorischen Grundgesetze. Wenn die Spannung U_1 an die ganze Wicklung AB angelegt wird, so verhalten sich die Teilspannungen AC zu CB wie die entsprechenden Windungszahlen. Wenn von dem Wicklungsteil CB ein Stromverbraucher gespeist wird, so entsteht ein sekundärer Belastungsstrom, dessen Phase um 180° gegen die des primären Stromes im Wicklungsteil AC verschoben ist. Die Ströme verhalten sich umgekehrt wie die entsprechenden Windungszahlen.

Die praktische Ausführung des Spartransformators, der im Ausland auch „Autotransformator“ genannt wird, ist äußerlich von einem gewöhnlichen Leistungstransformator kaum zu unterscheiden. Die auf dem gleichen Schenkel

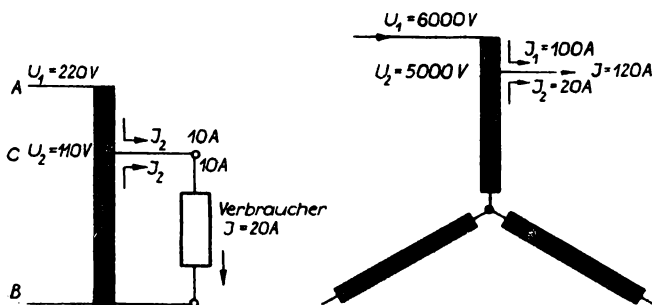


Bild 55a. Einphasen-Spartransformator Bild 55b. Drehstrom-Spartransformator

befindlichen Wicklungsteile AC und CB liegen entgegen dem in Bild 54 gezeigten Prinzipschema räumlich nicht nebeneinander, sondern werden übereinandergewickelt als zwei getrennte Röhrenspulen. Die wesentlichste Ersparnis an Wickelmaterial, die dem Spartransformator seinen Namen gibt, wird erzielt durch die Zusammenfassung der Primär- und der Sekundärwicklung. Die Ersparnis ist um so größer, je geringer der Spannungsunterschied zwischen U_1 und U_2 ist.

Betrachten Sie die beiden in Bild 55 nebeneinandergezeichneten Anwendungsbeispiele, aus denen Sie auch den Verlauf der Ströme erkennen. Bild 55a zeigt den Anschluß eines 110-Volt-Verbrauchers an das 220-Volt-Einphasennetz. Die vom Verbraucher benötigte Stromstärke $I = 20$ Ampere wird zur Hälfte

direkt aus dem 220-Volt-Netz entnommen, zur anderen Hälfte aus dem sekundären Wicklungsteil des Spartransformators. In Bild 55 b ist eine Netzkupplung dargestellt zwischen einem 6-kV-Drehstromnetz und einem 5-kV-Drehstromnetz. Die zugeführte Spannung $U_1 = 6000$ V wird um 16,6 % verringert auf 5000 V. Die Differenzspannung von 1000 V steht zur reduzierten Spannung von 5000 V im Windungsverhältnis 1 : 5, das in seiner Umkehrung das Verhältnis der Ströme bestimmt: $I_2/I_1 = 100/20$ A. Der obere Wicklungsteil muß also im Querschnitt entsprechend verstärkt werden. Die Summe der beiden Ströme $I_1 + I_2$ ergibt den resultierenden Verbrauchsstrom $I = 120$ A bei 5000 V.

Es soll aus den beiden Beispielen errechnet werden, wieviel kleiner der Spartransformator gegenüber dem entsprechenden Leistungstransformator mit getrennten Wicklungen ist. In diesem Zusammenhang müssen Sie bei Spartransformatoren zwei Leistungsbegriffe unterscheiden: die **Eigenleistung oder Typenleistung** und die **Durchgangsleistung**.

Die *Typenleistung* NT des Spartransformators ergibt sich aus dem unteren Teil des Transformators von der Anzapfung B bis C, also aus der Sekundärleistung:

$$\boxed{NT = U_2 \cdot I_2 [\text{VA}]}$$
 (16)

Die *Durchgangsleistung* ND ergibt sich aus dem Transformatorenteil von der Anzapfung C bis A:

$$\boxed{ND = U_2 \cdot I [\text{VA}]}$$
 (17)

Lehrbeispiel 3

Wie groß ist a) die Typenleistung und b) die Durchgangsleistung des Transformators in Bild 55 a und b?

Lösung:

a) $NT = U_2 \cdot I_2 = 110 \text{ V} \cdot 10 \text{ A} = 1100 \text{ VA}$

$$ND = U_2 \cdot I = 110 \text{ V} \cdot 20 \text{ A} = 2200 \text{ VA}$$

$$\frac{NT}{ND} = \frac{1100}{2200} = \frac{1}{2}$$

Das heißt also, die Typenleistung des Spartransformators ist nur halb so groß wie die Typenleistung des entsprechenden Leistungstransformators.

b) $NT = U_2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{3} = 5000 \text{ V} \cdot 20 \text{ A} \cdot 1,73 = 173 \text{ kVA}$

$$ND = U_2 \cdot I \cdot \sqrt{3} = 5000 \text{ V} \cdot 120 \text{ A} \cdot 1,73 = 1040 \text{ kVA}$$

$$\frac{NT}{ND} = \frac{173}{1040} = \frac{1}{6}$$

Das heißt also, die Typenleistung des Spartransformators beträgt nur 16,6 % von der Typenleistung des entsprechenden Leistungstransformators: Das ist aber das gleiche Verhältnis wie zwischen der Differenzspannung $U_1 - U_2$ und der Gesamtspannung U_1 , also 1000/6000 V.

Sie erkennen aus diesen Beispielen, daß sich die Anwendung des Spartransformators aus Ersparnisgründen dann am meisten lohnt, wenn die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Spannungen U_1 und U_2 klein ist. Bei 10 % Spannungsdifferenz beträgt die Typenleistung des Spartransformators z. B. nur 10 % der Durchgangsleistung des entsprechenden Zweiwicklungstransformators. Die wirtschaftlichen Perspektiven für die Anwendung des Spartransformators erscheinen bei dieser Erkenntnis sehr verlockend, und die Frage ist durchaus berechtigt, warum der Spartransformator nicht allgemein angewendet wird. Man könnte doch z. B. ein 30-kV-Netz und ein 60-kV- oder 100-kV-Netz genauso durch Spartransformatoren miteinander verbinden, wie das im Bereich niedriger Spannungen unter 250 V mit gleichen Verhältniszahlen üblich ist.

Zwei wichtige Gründe sind es, die gegen eine solche allgemeine Anwendung sprechen. Denken Sie daran, daß bei der Sparschaltung die Oberspannungs- und die Unterspannungswicklungen einpolig leitend miteinander verbunden sind, so daß jeder Isolationsfehler im höhergespannten Netz auf das niedergespannte Netz übergreift und dort schwere Schäden auslöst. Die Isolation des 30-kV-Netzes entspricht eben nur den Sicherheiten, welche die Betriebsspannung von 30 kV erfordert. Durch die Spannungserhöhung bei einem Erdschluß im 60-kV-Netz würde die Isolation des 30-kV-Netzes erheblich überbeansprucht werden. Aus diesem Grunde sollen auch — entsprechend den für europäische Verhältnisse gültigen Vorschriften des VDE — Spartransformatoren in Stromkreisen von mehr als 250 V gegen Erde nur bei kleinen Spannungsunterschieden bis zu 25 % zwischen Primär- und Sekundärwicklung angewendet werden. Die Verwendung bei größeren Spannungsunterschieden ist nur zulässig in Drehstromnetzen, deren Nullpunkt fest geerdet ist, in denen also bei Erdschluß eine Spannungserhöhung der anderen Phasen nicht auftritt. Die Nullpunktserdung des Hochspannungsnetzes ist nur in Amerika üblich.

Andere wichtige Gründe, die gegen die Allgemeinanwendung des Spartransformators sprechen, sind die Kurzschlußbeanspruchung des Transformators und des Netzes sowie die Schwierigkeit beim Parallellauf. Dies ergibt sich aus den sehr kleinen Kurzschlußspannungen des Spartransformators. Der zusammengeschrunpfte Wicklungsaufbau ohne wesentliche Streukanäle ergibt Kurzschlußspannungen, die in der Größenordnung von 1 % liegen, so daß sich bei satten Netzkurzschlüssen dynamisch nicht mehr beherrschbare Kurzschlußströme auswirken. Für die als *Zusatztransformatoren* vorwiegend zur Spannungsregelung eingesetzten Spartransformatoren sind aus diesem Grunde stets

besondere Schutzmaßnahmen erforderlich, wenn im Netz Kurzschlußströme von mehr als dem 30fachen des Normalstromes zu erwarten sind. Die Zusatztransformatoren werden deshalb entweder direkt hinter die Haupttransformatoren geschaltet, die durch ihre eigene hohe Kurzschlußspannung den entsprechenden Überstromschutz bieten, oder es werden Drosselspulen zur Kurzschlußbegrenzung vorgeschaltet.

Während sich im Bereich der Hochspannung bei der Energieübertragung die Anwendung der Sparschaltung nur auf Zusatztransformatoren mit und ohne Spannungsregeleinrichtung erstreckt, sind im Bereich der Niederspannung die erörterten Einschränkungen ohne wesentliche Bedeutung. Hier hat die Sparschaltung ein weites und vielseitiges Anwendungsgebiet gefunden beim Bau von Klein- und Kleinsttransformatoren sowie bei Ablaßvorrichtungen für große Drehstrommotoren und rotierende Umformer. Für diese Zwecke wird die Wicklung des Spartransformators mehrfach unterteilt, und die herausgeführten Spannungsanzapfungen werden mit Hilfe eines Stufenschalters abgegriffen. Die Spannung kann dadurch beim Anlassen des Motors — von Null anfangend — bis zum Höchstwert allmählich gesteigert werden. Das führt zum Schluß zur Überbrückung des *Anlaßtransformators*.

Das Gebiet der Spannungsregelung im Niederspannungsnetz wird vom Spartransformator als Grundelement der dafür erforderlichen Einrichtungen genauso beherrscht wie die Spannungsregelung in den Hochspannungsnetzen durch Zusatztransformatoren. Über die zur transformatorischen Spannungsregelung geschaffenen Spezialkonstruktionen werden Sie Näheres in späteren Einzeldarstellungen erfahren.

[21] Der Drehtransformator. Äußerlich und mechanisch betrachtet, ist der Drehtransformator ein *Induktionsmotor* (Drehstrom-Schleifringläufer-Motor), dessen Läufer festgehalten ist und nur um einen bestimmten Winkel verdreht werden kann. Der Drehtransformator ist auch unter den Bezeichnungen *Drehregler* oder *Induktionsregler* bekannt, die auf seine Zweckbestimmung hinweisen.

Die im ersten Augenblick verblüffende Kombination von Transformator und Motor findet ihre natürliche Erklärung in der Tatsache, daß der asynchrone Induktionsmotor im Stillstand nichts anderes ist als ein Transformator mit offener Sekundärwicklung, bei dem jedoch das Wechselfeld durch ein Drehfeld ersetzt ist. Wird die Ständerwicklung des Induktionsmotors an eine Wechselstromquelle mit gleichbleibender Spannung angeschlossen, so wird in der Läuferwicklung ebenfalls eine Spannung induziert, deren Größe dem Übersetzungsverhältnis beider Wicklungen entspricht. Diese Spannung hat — unabhängig von der relativen Lage zwischen Ständer und Läufer — einen

gleichbleibenden Wert. Dreht man den Läufer, dann wird lediglich die Phasenlage zwischen der Ständerspannung und der Läuferspannung um einen bestimmten Phasenwinkel geändert, der ein Bruchteil ist vom mechanischen Drehwinkel des Läufers; 360 Phasengrade entsprechen dem Winkel der doppelten Polteilung.

Die Phasenverschiebung zwischen den vom Drehfeld induzierten Spannungen im Ständer und im Läufer kann man sich auch wie folgt erklären:

Wenn die Achsen der beiden in Nuten gebetteten Wicklungsschleifen zusammenfallen, so kommt das umlaufende Drehfeld gleichzeitig zu den entsprechenden Stromleitern der beiden Wicklungen. Dann sind die Spannungen in der Ständer- und Läuferswicklung gleichphasig.

Wenn der Läufer jedoch im Sinne des Drehfeldes um den Winkel α gegen den Ständer verdreht wird, so gelangt das Drehfeld beispielsweise zuerst zu einem Leiter der Ständerwicklung und erst später, also phasenverschoben, zu dem entsprechenden Leiter der Läuferswicklung.

Welcher Zusammenhang besteht aber nun zwischen der Phasendrehung und der Spannungsänderung? Bei der allgemein verwendeten Zusatz-Sparschaltung

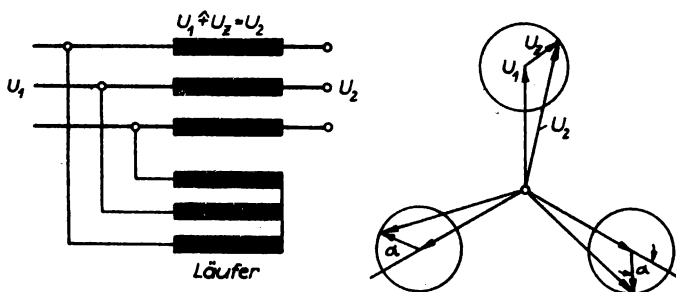


Bild 56. Schaltbild und Spannungsdiagramm eines Drehstrom-Einfach-Drehtransformators

der Drehtransformatoren wird die Läuferwicklung als Primärwicklung mit gleichbleibender Netzspannung gespeist und die Ständerwicklung als sekundäre Zusatzwicklung mit dem Netz in Reihe geschaltet. Die grundsätzliche Schaltung erkennen Sie aus Bild 56 links. Zum leichteren Verständnis des elektrischen Vorganges ist auf der rechten Seite dieses Bildes das Spannungsdiagramm eines Drehstrom-Einfach-Drehtransformators gezeichnet.

Die Netzspannung U_1 liegt am Läufer als Primärwicklung. In der Sekundärwicklung des Ständers wird die Zusatzspannung U_2 induziert, die sich mit ihrem vollen Wert (jedoch mit veränderlicher Phasenlage) geometrisch zu U_1 addiert. Das Resultat ist die Spannung U_2 . Sie sehen aus dem Diagramm, daß

der Endpunkt des Spannungsvektors U_2 im Kreise um den Endpunkt des Spannungsvektors U_1 herumführt. Nur in den beiden äußersten Punkten, in denen die Zusatzspannung mit dem vollen Wert algebraisch addiert oder subtrahiert wird, ist die Phasenlage zwischen U_1 und U_2 gleich. Für alle anderen Stellungen des Läufers tritt eine Phasenverschiebung um den Winkel α ein, die bei der Netzspannungsregelung gleichzeitig zur Blindstromkompensation angewendet werden kann.

Wenn jedoch die geregelte Spannung in jedem Falle mit der zugeführten Spannung phasengleich sein muß, so werden zwei Drehtransformatoren verwendet, wie das in Bild 57 (im Schaltbild für den Doppel-Drehtransformator) dargestellt ist.

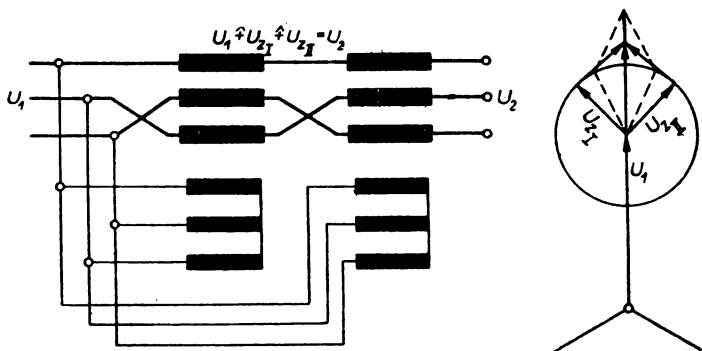


Bild 57. Schaltbild und Spannungsdiagramm eines Drehstrom-Doppel-Drehtransformators

Die Ständerwicklungen werden dabei hintereinandergeschaltet und die Läuferwicklungen parallel. Der Anschluß erfolgt so, daß die primären Drehfelder entgegengesetzten Umlaufsinn haben. Die Wellen der beiden Drehtransformatoren werden direkt gekuppelt. Bei Verdrehung der beiden Läufer erhält die Spannung der einen Ständerwicklung Phasenvoreilung gegenüber der Läuferwicklung, die der anderen ebensoviel Nacheilung. Die beiden aus den Ständerwicklungen entspringenden Zusatzspannungen U_{zI} und U_{zII} addieren sich geometrisch zur Primärspannung U_1 entsprechend dem gezeichneten Spannungsdiagramm, wobei die resultierende Spannung U_2 in jedem Falle in Phase liegt mit U_1 .

Das resultierende Drehmoment an der Welle eines Doppel-Drehtransformators ist gleich Null, da die Drehmomente der beiden Drehtransformatoren einander aufheben. Der geringe Drehwinkel gestattet es, die Verbindung der Läufer mit der Ständerwicklung unter Fortfall von Schleifringen durch biegsame Kabel herzustellen.

Drehtransformatoren werden vorwiegend für niedrige Spannungen gebaut, die in den verwendeten Motorenmodellen isolationsmäßig noch beherrscht werden können. Drehregler für höhere Spannungen werden bisweilen auch in Ölgefäße mit senkrechter Welle eingesetzt, so daß sie dann äußerlich einem ruhenden Transformator ähnlich sind. Bei der direkten Einschaltung drehbarer Zusatztransformatoren in die Versorgungsnetze sind aus Gründen der Betriebssicherheit selbstverständlich die gleichen Sicherungsmaßnahmen und Einschränkungen zu beachten, wie sie für die ruhenden Zusatztransformatoren in [20] erörtert worden sind.

[22] Meßwandler. Zum Schluß sollen Sie noch einen Blick auf eine ganze Gruppe von Sonderausführungen werfen, die unter der Bezeichnung „Meßwandler“ zusammengefaßt werden. Die Meßwandler gehören zwar ihrem Sinn nach zu den Transformatoren. Sie stellen jedoch mit ihren konstruktiven und fabrikatorischen Abweichungen von der Bauart gewöhnlicher Transformatoren gesonderte Gebilde dar, die vor allem in ihrer äußeren Gestalt teilweise kaum noch als Transformatoren zu erkennen sind. Die Meßwandler stellen den Übergang her von der Transformatorentechnik zur Meßtechnik. Ihre Sonderstellung wird bereits durch ihre abweichende Benennung unterstrichen. Sie erinnern sich, daß bei der Definition der Grundbegriffe in [3] die Bezeichnung „Wandler“ eben nur für diese Sonderausführung von Transformatoren gebilligt wurde.

Die Entwicklung der Meßwandler fällt zusammen mit der allgemeinen Entwicklung der Meßtechnik für Hochspannungs- und Starkstromanlagen. Innerhalb des weiten Gebietes der Meßtechnik nehmen die Meßwandler eine sehr wichtige Hilfsstellung ein. Erst durch Zwischenschalten von Wandlern ist es möglich, in den Kraftwerken und Schaltanlagen des Energieversorgungsnetzes hohe Spannungen und die auf dem gleichen Spannungsniveau fließenden Ströme ohne Gefahr für den Beobachter und für die Geräte messen zu können. In diesem Lehrbrief sollen Sie nur die Grundformen der Meßwandler kennenlernen.

Sie haben zu unterscheiden zwischen **Spannungswandlern** und **Stromwandlern**. Der *Spannungswandler* weicht in seiner äußeren Form von dem gewöhnlichen Leistungstransformator für mittelhohe Übertragungsspannungen am wenigsten ab. Spannungswandler werden genau wie Transformatoren einphasig oder auch dreiphasig ausgeführt. Bei den Einphasen-Spannungswandlern werden **Mantelkerne** verwendet, b. Dreiphasen-Spannungswandlern **Dreischenkelkerne** oder auch Fünfschenkelkerne aus Eisenblechen mit hohem Siliziumgehalt. Die Hochspannungs- und die Niederspannungswicklungen sitzen konzentrisch auf dem Eisenkern. Die Enden der Hochspannungswicklung werden mit Hilfe von Durchführungen aus dem ölgefüllten Gehäuse ausgeleitet. Die Niederspannungs-

wicklung wird üblicherweise für 100 V bemessen und mit ihren Enden an ein Klemmbrett auf dem Gefäßdeckel geführt.

Diese klassische Ausführungsform des Spannungswandlers als Ableitung von seinem transformatorischen Vorbild ist durch die Forderung der Schaltanlagentechnik nach möglichst ölarmen Konstruktionen entsprechend modifiziert worden.

Sie sehen in Bild 58 einen modernen Einphasen-Trockenspannungswandler mit Luftisolation in einem zweiteiligen Porzellangehäuse, das mit den Jochen des

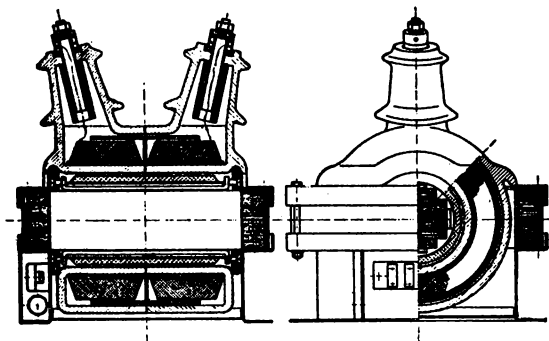


Bild 58. Einphasen-Trockenspannungswandler

Mantelkernes zusammengefügt ist. Trockenspannungswandler können ausgeführt werden für Spannungen bis zur Größenordnung von 30 kV. Bei höheren Spannungen ist die Ölfüllung unerlässlich. Die Spannungswandler werden — entsprechend ihrem Charakter als Meßgeräte — durch Auslegung mit geringer

Sättigung und Stromdichte in fünf verschiedenen Genauigkeitsklassen angefertigt, bei denen die zulässigen Spannungsfehler in % und der Fehlwinkel nach VDE zwischen 0,1% und 3% festgelegt sind. Es leuchtet ein, daß man im Laboratorium oder im Prüffeld präzisere Wandler benötigt als z. B. in einer kleinen Ortsnetzschaltanlage, in der die Meßinstrumente nur zu überschläglicher Kontrolle oder nur zum Anschluß von Relais gebraucht werden.

Für *Stromwandler* gibt es nur Einphasenkonstruktionen. Die Gestalt des Stromwandlers wird überwiegend von der Form seines primären Stromleiters bestimmt. Bei kleinen Stromstärken kann man den primären Stromleiter noch als Spule wickeln und auf einem Mantelkern konzentrisch mit der für 5 A bemessenen Sekundärwicklung zusammenbauen, genauso wie das beim Spannungswandler geschieht.

Auch hier haben die Forderungen der Schaltanlagentechnik nach ölarmen bzw. ölfreien Konstruktionen zu formschönen Lösungen geführt.

Bild 59 zeigt Ihnen z. B. die Konstruktion eines Querlochstromwandlers mit Porzellangehäuse. Stromwandler mit Querlochisoliertkörpern werden für Spannungen bis 30 kV in dieser Trockenbauweise als *Stützwandler* bzw. *Durchführungswandler* ausgeführt. Bei höheren Spannungen ist wiederum Ölfüllung

notwendig. Dabei führt das Bestreben, die Ölfüllung möglichst klein zu halten, zu Bauformen, deren äußere Ansicht nur noch den Porzellanstützer erkennen läßt, in dessen Hohlraum der Stromwandlerkern hineingezogen wird.

Bei großen Stromstärken wird aus der Primärwicklung eine Stromschleife und im extremsten Fall eine gestreckte Schiene. Der von einer Isolierhülse umgebene primäre Stabstromleiter wird durch einen FARADAYSchen Ringkern gesteckt, der die sekundäre 5-A-Meßwicklung trägt. Das ist der *Stabstromwandler*, der in den mannigfaltigsten Ausführungsformen als Einleiter- und Mehrleiterwandler (mit einem Kern oder mit mehreren Kernen und Meßwicklungen), als Schienenwandler (Bild 60), U-Rohrwandler und Anlegewandler, als Durchführungswandler mit Hartpapier-

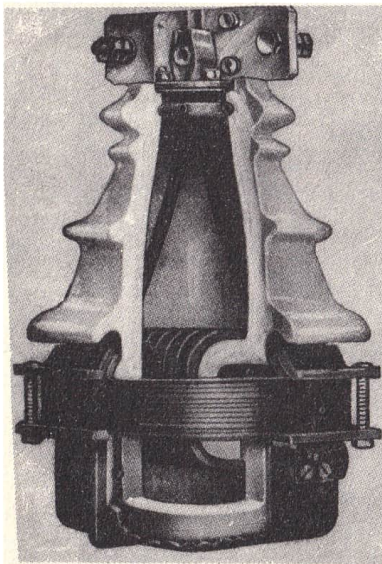


Bild 59. Querloch-Topfwandler, aufgeschnitten

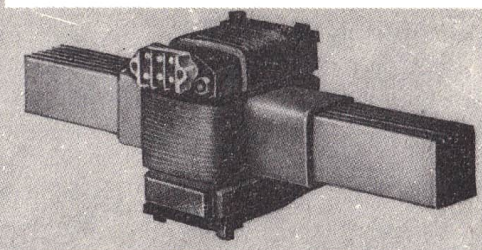


Bild 60. Schienen-Stromwandler

rohren, Porzellandurchführungen oder mit Kondensatordurchführungen für Stromstärken von 20...50000 A gebaut wird.

Auch die Stromwandler werden in verschiedene Genauigkeitsklassen unterteilt, in denen die Stromfehler und Fehlwinkel in Abhängigkeit von der Belastung festgelegt sind. Zu den für die Spannungswandler geltenden Genauigkeitsklassen von 0,1...3 % kommt bei Stromwandlern noch eine 10-%-Klasse hinzu, die wegen ihrer erheblichen Meßungenauigkeit nur für Relaisbetätigung zugelassen ist.

Es ist von einem Fehlwinkel gesprochen worden, und nun ist zu untersuchen, wovon dieser abhängt. Betrachten Sie den Fehlwinkel beim Stromwandler.

Der Stromwandler arbeitet praktisch als kurzgeschlossener Transformator. Sein Strom-Übersetzungsverhältnis wird gleich dem Windungsverhältnis sein, wenn die Sekundärklemmen direkt verbunden sind. Da durch das angeschlossene

Instrument ein zusätzlicher Widerstand in den Stromkreis gelegt ist, bedeutet das eine Minderung des sekundären Kurzschlusses. Dies bedingt eine

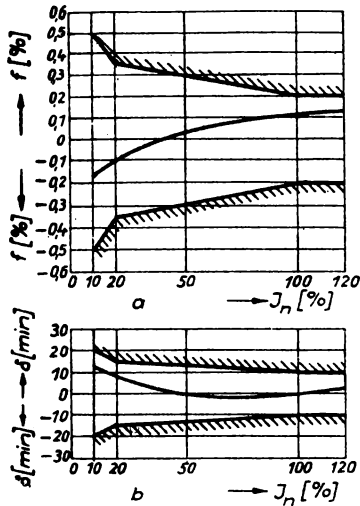


Bild 61. a Fehlergrenze eines Stromwandlers der Klasse 0,2; b Fehlwinkel nach VDE 0414 „Regeln für Wandler“

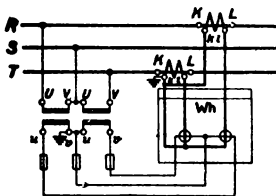


Bild 62. Zweiwattmeter-Schaltung mit Strom- und Spannungswandler

Änderung des Übersetzungsverhältnisses der Ströme. Gleichzeitig wird dadurch die Phase (Fehlwinkel) geändert.

Bild 61a zeigt Ihnen die zulässige Fehlergrenze in % eines Stromwandlers der Klasse 0,2 und Bild 61b den Fehlwinkel nach VDE 0414 „Regeln für Wandler“. Die Grenzen sind gegeben durch schraffierte Linien.

Wird der Stromwandler jedoch mit dem Strommesser geeicht, so tritt der Stromfehler nicht in Erscheinung. Sind Wandler und Instrument nicht aufeinander abgestimmt, so dürfen die Fehlergrenzen nicht überschritten werden.

Bild 62 zeigt Ihnen je zwei Strom- und Spannungswandler zur Leistungsmessung in Zweiwattmeter-Methode. Bei den Strom- sowie Spannungswandlern muß eine Sekundärklemme geerdet sein, damit bei Isolationsschäden der Überspannungswicklung nicht sekundärseitig eine **Überspannung auftreten kann. Eine Absicherung** der Sekundärseite ist jedoch nur bei Spannungswandlern zulässig. Würden Sie den Stromwandler ebenfalls absichern und der sekundärseitige Stromkreis würde durch eine angesprochene Sicherung unterbrochen, so arbeitete der Stromwandler nicht mehr im Kurzschluß. Gefährlich hohe Überspannungen wären die Folge. Also: Stromwandler in Betrieb niemals öffnen!

Zusammenfassung

Der Spartransformator bietet im Vergleich zu dem Leistungstransformator wirtschaftliche Vorteile, Material- und Raumersparnis; jedoch nur bei der Leistungsübertragung mit geringen Spannungsdifferenzen im Niederspannungsbereich. Ober- und Unterspannungswicklung sind einpolig miteinander verbunden, so daß Isolationsfehler im Hochspannungsnetz die Niederspannungs-

seite gefährden. Außerdem haben die Spartransformatoren sehr kleine Kurzschlußspannungen und infolgedessen geringe Kurzschlußfestigkeit.

Die Sparschaltung wird vielseitig angewendet bei Zusatztransformatoren, die zur stufenweisen Spannungsregelung in Hochspannungs- und Niederspannungsnetzen dienen.

Der Drehtransformator gestattet eine stufenlose Spannungsregelung. Gleichzeitig kann dabei eine Verbesserung der Phasenlage des Netzes in gewissen Grenzen erreicht werden. Doppel-Drehtransformatoren regeln die Spannung ohne Phasenverdrehung.

Meßwandler dienen zur Spannungs- und Strommessung. Die Bauformen der Spannungswandler werden von dem isolierenden Porzellankörper und die der Stromwandler von der Gestalt des Stromleiters weitgehend beeinflusst. Fehlergrenzen und Fehlwinkel sind nach VDE Nr. 0414 festgelegt. Die Sekundärseite der Wandler ist einpolig zu erden. Die Sekundärseite eines Stromwandlers darf in Betrieb niemals geöffnet werden!

Übungen

34. *Wie kommt der Spartransformator zu seinem Namen?*
35. *Warum wird der Spartransformator nicht allgemein zur Energieübertragung verwendet?*
36. *Für welchen Zweck wird die Sparschaltung bevorzugt?*
37. *In welchem Verhältnis steht die Typenleistung des Spartransformators zu seiner Durchgangsleistung?*

ANTWORTEN UND LÖSUNGEN

1. Ein Transformator formt eine gegebene Wechselspannung in eine andere gleicher Frequenz um.
2. Der Transformator ist das Bindeglied zwischen den Erzeugungsstätten, dem Verteilungsnetz und den Verbrauchern elektrischer Energie.
3. Die Wirkung des Transformators beruht auf der elektromagnetischen Induktion, die FARADAY im Jahre 1831 entdeckte.

4.
$$E = 4,44 \cdot B \cdot F \cdot f \cdot w \cdot 10^{-8}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1}$$

5. Das Übersetzungsverhältnis des Transformators ist bestimmt durch das Verhältnis seiner Windungszahlen.
6. Nennleistung ist die Scheinleistung, die sich als Produkt aus Nennsekundärspannung, Nennsekundärstrom und Phasenfaktor berechnet.
7. Die isolierten Eisenbleche begrenzen die Ausbildung von Wirbelströmen.
8. Durch Siliziumlegierung werden die Eisenverluste verringert.
9. Durch Verschachtelung wird der Leerlaufstrom verkleinert.
10. Die beiden Hauptformen der Wicklungsanordnung sind: Scheibenwicklung und Zylinderwicklung.
11. Ausführung der Zylinderwicklung als Röhrenwicklung oder als Spulenwicklung.
12. Der Wicklungsaufbau muß überspannungssicher und kurzschlußfest sein.
13. Hartpapier besteht aus harzgetränkten, unter Druck und Wärme zusammengepreßten Papierfolien.
14. Transformatorenöl besitzt die sechsfache Durchschlagsfestigkeit gegenüber Luft und erhält den Isolationszustand der eingetauchten Wicklung (unabhängig von den äußeren Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüssen).
15. Das Öl dient zugleich als Isolierstoff und als Kühlmittel.
16. Erwärmungsursachen:
 - a) der magnetische Wechselfluß im Eisen (Eisenverluste),
 - b) der Stromfluß in der Wicklung (Wicklungsverluste).
17. Grenzerwärmungen gemäß VDE: 70°C in der Wicklung bzw. 60°C im Öl.
18. Als Kühlmittel dienen Luft bei Trockentransformatoren bzw. Öl bei Öltransformatoren.
19. Öl hat größere Wärmeleitfähigkeit als Luft.

20. Die Kühlwirkung bei Transformatoren OS wird erhöht durch Kühltaschen aus Wellblech, durch eingeschweißte Kühlrohre, Rohrrharfen oder Radiatoren.
21. Die Kühlwirkung wird weiter erhöht durch Anblasen der Gefäßoberfläche (Fremdlüftung OF) oder durch Ölumlaufkühlung in getrennten Kühlern mit Wasser oder Luft (OWA und OFA).
22. Der Spannungsabfall bei Belastung des Transformators entsteht durch den Ohmschen Spannungsabfall und durch den induktiven Streuspannungsabfall innerhalb der Wicklung.
23. a) $u_R = 2,7\%$
 b) $U_s = 2,67\%$
 Bei $\cos \varphi = 0,7 = \sin \varphi$ ergibt sich
 $\Delta U = 3,76\%$
 c) $I_k = 26,3 \cdot I_n$
24. Der Gesamtverlust setzt sich zusammen aus den Leerlaufverlusten (Eisenverlusten) und aus den Kurzschlußverlusten (Wicklungsverlusten).
25. Verlustberechnung:

Belastung	$\frac{1}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{3}{4}$
N_0 [W]	1900	1900	1900
N_k [W]	9240	5200	2310
Gesamtverlust [W]	11140	7100	4210

Wirkungsgradberechnung:

a)	$\cos \varphi = 1$	$\eta_{1/4} = 97,82\%$
	$\cos \varphi = 1$	$\eta_{2/4} = 98,14\%$
	$\cos \varphi = 1$	$\eta_{3/4} = 98,34\%$
b)	$\cos \varphi = 0,8$	$\eta_{1/4} = 97,93\%$
c)	$\cos \varphi = 0,7$	$\eta_{1/4} = 97,34\%$

26. Volle Nullpunktsbelastbarkeit wird hergestellt, indem die Wicklung in Dreieck oder in Zickzack geschaltet wird.
27. Volle Nullpunktsbelastbarkeit besitzen die gebräuchlichen Schaltgruppen Y z 5 = C 3 und D y 5 = C 1.

28. Parallelbetrieb von Transformatoren ist gegeben, wenn diese auf der Ober-
spannungsseite und auf der Unterspannungsseite parallelgeschaltet sind
und wenn die Lastverteilung auf die Transformatoren praktisch ihren
Nennleistungen entspricht.
29. Parallelaufbedingungen:
 - a) gleiche Schaltung,
 - b) gleiche Übersetzung,
 - c) gleiche Kurzschlußspannung.
30. Bei Sammelschienenparallelauf belasten sich die Transformatoren im um-
gekehrten Verhältnis ihrer Kurzschlußspannungen.
31. Das Ölausdehnungsgefäß schützt die Isolation vor Feuchtigkeit.
32. Temperaturüberwachung ist erforderlich zum Schutz der Isolation gegen
unzulässige Erwärmung (Wicklung max. 70° C, Öl max. 60° C).
33. Das BUCHHOLZ-Relais dient zur Anzeige von Isolationsfehlern (Erhöhung
der Temperatur) und zur Schadensbegrenzung.
34. Der Spartransformator erhielt seinen Namen wegen der Einsparung von
Wickelmaterial, die sich beim Zusammenziehen der Primär- und der
Sekundärwicklung zu einer einzigen Wicklung ergibt.
35. Seine Allgemeinanzwendung ist nicht möglich, weil infolge der harten
Kupplung zwischen Oberspannungs- und Unterspannungswicklung das
Niederspannungsnetz nicht mehr gegen Hochspannungseinflüsse ge-
schützt ist.
36. Sparschaltung wird bevorzugt zur Spannungsänderung bzw. Spannungs-
regelung mittels Zusatztransformatoren.
37. Die Typenleistung des Spartransformators verhält sich zu seiner Durch-
gangsleistung wie die Differenzspannung zur Gesamtspannung,

$$N T / N^D = (U_1 - U_2) / U_1$$

Formelszusammenstellung

Formel Nr.	Formel	Seite
1	$E_{\text{eff}} = 4,44 \cdot \mathfrak{B} \cdot F \cdot f \cdot w \cdot 10^{-8}$	6
2	$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \ddot{u}$	6
3	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1}$	7
4	$R_1 = R_2 \cdot \ddot{u}^2$	7
5	$I_h = \frac{N_{ve}}{U_1}$	49
6	$E_{1\sigma} = I_0 \cdot X_{1\sigma}$	49
7	$U_{2R} = I_2 \cdot R_2$	51
8	$U_{2\sigma} = I_2 \cdot X_{2\sigma}$	51
9	$U_k = \sqrt{\overline{U_R^2} + \overline{U_s^2}}$	52
10	$\cos \varphi_k = \frac{N_k}{U_k \cdot I_1}$	54
11	$U_R = U_k \cdot \cos \varphi_k$	54
11 a	$U_s = U_k \cdot \sin \varphi_k$	54
12	$\Delta U = U_R \cdot \cos \varphi + U_s \cdot \sin \varphi$	54
13	$I_k = I_n \cdot \frac{100}{U_k}$	55
14	$N_k = \frac{N \cdot 1000 \cdot u_R}{100}$	58
15	$\eta = \frac{N_2}{N_1} \cdot 100$	58
15 a	$\eta = 100 - 100 \cdot \frac{V}{N_2 + V}$	59
16	$NT = U_2 \cdot I_2$	74
17	$ND = U_2 \cdot I$	74

Quellenverzeichnis der Bilder

KÜHNE, *Der Spartransformator in der Praxis*, 1. Auflage. Fachbuchverlag GmbH, Leipzig 1951: Bild 20

VARDUHN/NELL, *Handbuch der Elektrotechnik*, Band I, 2. Auflage. Fachbuchverlag GmbH, Leipzig 1951: Bild 32, Tafel 2

WEICKERT, *Hochspannungsanlagen*, 8. Auflage. Fachbuchverlag GmbH, Leipzig 1952: Bilder 52, 58, 59, 60, 62

Bilder 36a und 36b wurden von der Firma MAX GÖRLER, Dresden, zur Verfügung gestellt.

Bilder 37 und 43 von der TRO Berlin-Oberschöneweide

Bilder 33, 34, 38, 39, 41, 42 vom Sachsenwerk Dresden-Niedersedlitz

Alle Rechte vorbehalten

Nur für den internen Gebrauch im Ingenieur-Fernstudium

Gebühr DM 3,—

Ag 616/ 138 /62

Best.-Nr. 1202-01/62

