

2 Aufbau des Dreiphasentransformators

2.1 Ausführungsformen der magnetischen Kreise des Dreiphasentransformators

Einrichtungen zur Energieumwandlung in dreiphasigen Elektroenergiesystemen entstehen aus der Zusammenfügung und Zusammenschaltung von drei einphasigen Komponenten. So lässt sich ein Dreiphasentransformator aus drei Einphasentransformatoren aufbauen. Eine solche Anordnung wird Transformatorbank genannt. Dieses System ist magnetisch vollständig symmetrisch. Die bewickelten Schenkel können außerdem beliebige Flusswerte annehmen. Diese Eigenschaft wird mit freiem magnetischen Rückschluss bezeichnet. Ein Vorteil, der sich noch später zeigen wird.

Die magnetischen Kreise dieser Einphasentransformatoren lassen sich auf unterschiedliche Weise vereinigen. Beim Manteltransformator ist ein Zusammenfügen übereinander sinnvoll, wie Bild 2.1 zeigt. Er wird allerdings wegen seines komplizierten Kernaufbaus heute kaum noch hergestellt.

Diese Bauform besitzt ebenfalls freien magnetischen Rückschluss gegenüber der Transformatorbank, aber eine geringe magnetische Unsymmetrie. Offensichtlich ist zur Erzeugung eines gewünschten Flusses Φ im Mittelschenkel b eine kleinere magnetische Durchflutung erforderlich als zur Erzeugung des gleichen Flusses in den Schenkeln a und b.

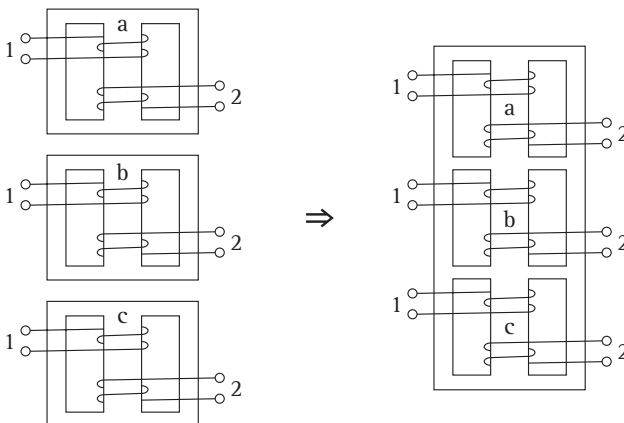


Bild 2.1 Entwicklung des Dreiphasen-Manteltransformators

Werden drei Einphasen-Kerntransformatoren zusammengefügt, und zwar zunächst in sternförmiger Anordnung nach Bild 2.2a, entsteht die sogenannte Tempeltype. Eine heute kaum noch anzutreffende Bauform, die erst seit kurzem wieder Bedeutung erlangt. Für die Schenkelflüsse gilt unter Berücksichtigung der Quellenfreiheit des magnetischen Feldes

$$\underline{\Phi}_m = \underline{\Phi}_a + \underline{\Phi}_b + \underline{\Phi}_c \quad (2.1)$$

wenn mit Φ_m der Fluss im gemeinsamen Mittelschenkel bezeichnet wird. Wird der Transformator von einem symmetrischen Dreiphasensystem erregt und symmetrisch belastet, dann liegen für alle Ströme, Spannungen und Schenkelflüsse symmetrische Dreiphasensysteme vor. Unter diesen Bedingungen wird $\Phi_m = 0$, wie aus dem Zeigerdiagramm nach Bild 2.2b hervorgeht. Der Mittelschenkel kann daher entfallen. Diese Form des magnetischen Kreises wird symmetrischer Dreiphasen-Kerntransformator oder auch Tempeltype genannt. Der allgemein übliche Kerntransformator entsteht, wenn die drei bewickelten Schenkel in nur eine Ebene gelegt werden. Der magnetische Aufbau wird dadurch etwas unsymmetrisch. Die Lage des magnetischen Verkettungspunkts der drei Schenkel liegt hier ungefähr in der Mitte des Jochs. Wie erkennbar, ist damit der Weg für den magnetischen Fluss zwischen den Verkettungspunkten A und B für den mittleren Kern kürzer als für die beiden äußeren Kerne. (Auf die daraus resultierenden unterschiedlichen Magnetisierungsströme der drei Wicklungsstränge wird noch im Kapitel 3 eingegangen.) Der magnetische Aufbau wird dadurch unsymmetrisch, was aus der Lage des magnetischen Verkettungspunkts der drei Schenkel hervorgeht.

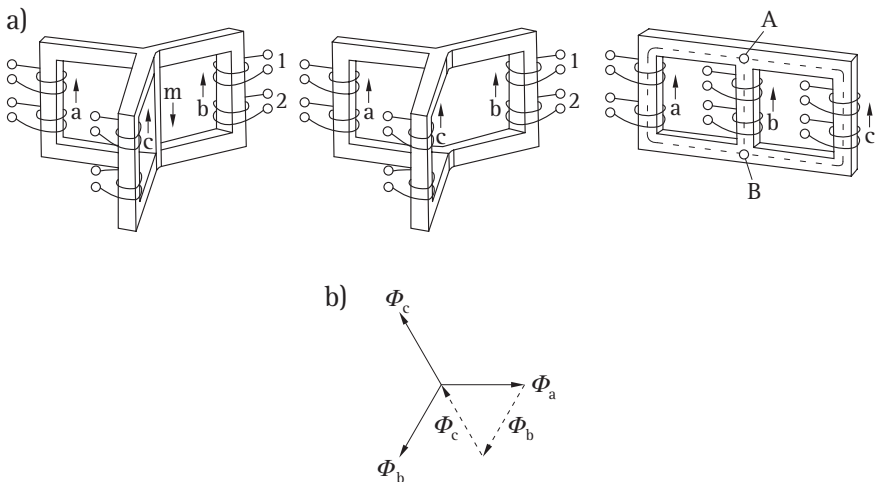


Bild 2.2 Entwicklung des Dreiphasen-Kerntransformators [5]

(Auf den daraus folgenden Unterschied der Leerlaufströme der drei Stränge wird später noch einzugehen sein.)

Weder der symmetrische noch der unsymmetrische Kerntransformator besitzen einen freien magnetischen Rückschluss. Die Flüsse der drei Schenkel erfüllen die Bedingung

$$\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = 0 \quad (2.2)$$

Anderenfalls entsteht zwangsläufig ein Luftfluss, der sich von Joch zu Joch schließt, also außerhalb des magnetischen Kreises. Dem bieten sich dann wegen des geringen magnetischen Widerstands vor allem Konstruktionsteile aus Eisen an, z. B. Spannbolzen des Magnetgestells, aber auch die Kesselwandung bei Öltransformatoren. Um die dadurch entstehenden Eisenverluste zu vermeiden, müssen diese Flüsse unterbunden werden. Der fehlende magnetische Rückschluss bei Dreiphasen-Kerntransformatoren führt aber auch zu unterschiedlichen Magnetisierungserscheinungen gegenüber der Transformatorbank und dem Dreiphasen-Manteltransformator. (Bei der späteren Behandlung der unsymmetrischen Belastung des Transformators wird die Ausbildung von Flüssen des Nullsystems von wesentlicher Bedeutung sein.)

Bei Transformatoren großer Leistung (etwa ab 50 MVA aufwärts) werden neben den drei wicklungstragenden Schenkeln in derselben Ebene zwei unbewickelte Schenkel angeordnet. Sie umgeben die Wicklung in der Art eines Manteltransformators nach Bild 2.3. Diese Bauform wird Fünfschenkeltransformator genannt. Sein Jochquerschnitt kann durch diese Bauweise gegenüber dem dreischenkligen Transformator auf etwa 60 % verkleinert werden.

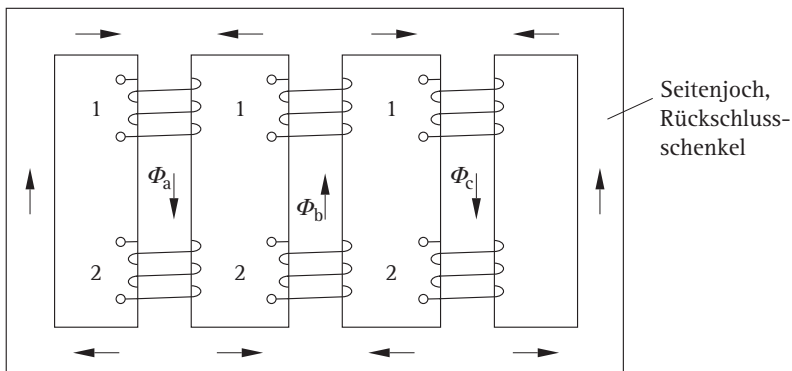


Bild 2.3 Fünfschenkeltransformator

2.2 Kernaufbau

Um den Einfluss der Wirbelströme und die damit verbundenen Verluste zu verringern, wird der reale magnetische Kreis aller elektrischer Maschinen mit zeitlich wechselnder Induktion bekanntlich als Blechpaket ausgebildet. Der Werkstoff der Eisenkerne des Transformators ist das sogenannte Transformatorblech. Widerstandsvergrößernde Legierungsanteile, hochohmige beidseitige Blechisolierung (Phosphatschicht auf Glasfilm) und geringe Blechdicken (mit $\leq 0,3$ mm) reduzieren deutlich die Wirbelstromverluste und unterbinden auch die Verdrängung des Magnetflusses aus dem Innern des Kerns. Eine Verringerung der Wirbelstromverluste wird auch durch eine Abstandsverkleinerung der magnetischen „Weiß’schen Bezirke“ erzielt, was mit einem mechanischen Anritzen der Blechoberfläche oder einer Laserbehandlung erreichbar ist. Um eine gute Magnetisierbarkeit und geringe Hystereseverluste zu erzielen, finden heute für die geschichteten Kerne von Verteiltransformatoren nur noch siliziumlegierte, kornorientierte, kaltgewalzte Transformatorbleche Anwendung. Bei Magnetisierung der kornorientierten Bleche in Walzrichtung zeigen sich besonders gute Eigenschaften hinsichtlich der Verluste des Magnetisierungsbedarfs und der Geräuschentwicklung (Abschnitt 11.4). Die Schichtung der Bleche erfolgt in Richtung des Magnetflusses, und zwar am häufigsten durch Parallelblechung. (Angewendet wird auch noch die Radial- und Evolventenblechung.)

Bei der Verbindung des Schenkels mit dem Jochbalken sollten möglichst keine zur Magnetflussrichtung senkrechte Luftspalte entstehen. Sie vergrößern den magnetischen Widerstand, verstärken die Geräusche (Magnetostriktion), erhöhen die notwendige Magnetisierungsleistung und verhindern die Nutzung der genannten Vorzüge der Bleche. Diese Nachteile entstehen durch einen stumpfen Stoß, wenngleich diese Verbindung die fertigungstechnisch einfachste Lösung darstellt. Der Kompromiss zwischen Verringerung der Magnetisierungsleistung und Fertigungskosten führt zur Anwendung des verzapften Stoßes. Die Verzapfung bestimmt in hohem Maße die spezifischen Verluste, aber auch den Leerlaufstrom und die Transformatorgeräusche. Für die gebräuchlichen Drei-Schenkelkerne haben sich der 45° -Schnitt für die Verzapfung der Außenschenkel mit dem Joch und der 90° -Dachwinkel für den Mittelschenkel als vorteilhafteste Lösung herausgestellt.

Kriterium bilden dabei die am Kern feststellbaren Eigenschaften (Bild 2.4). Bei früheren Ausführungen wurden die Bleche mit einer einfachen Überlappung (zwei verschiedene Blechpositionen) geschichtet (Bild 2.5). Heute wird ausschließlich die sogenannte Step-Lap-Schichtung verwendet. Dabei wird der Übergang mit einer Staffelung (5 bis 7 verschiedenen Blechpositionen und ein Blech pro Step) ausgeführt (Bild 2.6). Zwangsläufig reduziert sich bei diesem Verfahren die Induktionserhöhung in der Nachbarschaft der Stoßstellen. Ein besonderer Vorteil liegt in der Verlustsenkung (4 % bis 6 %) und in der Geräuschreduktion, allerdings nur im

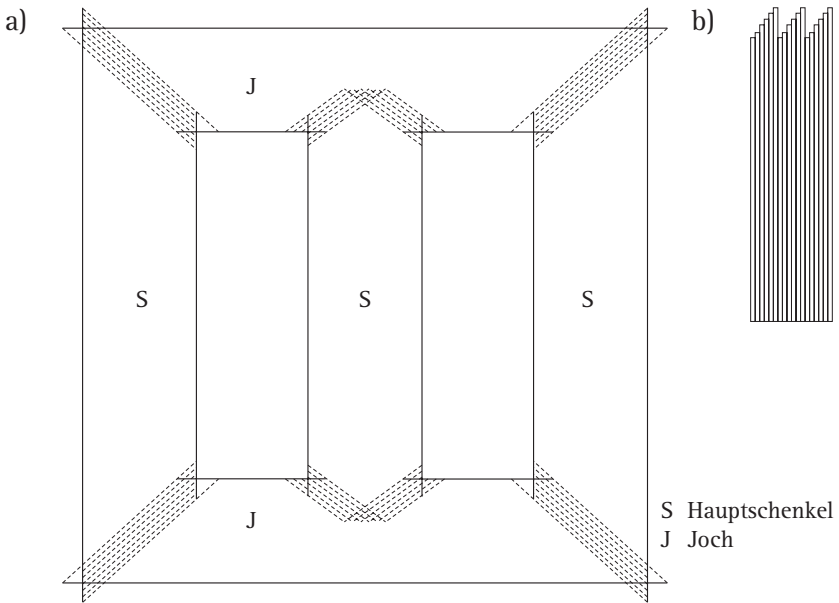


Bild 2.4 Dreischenkliger Eisenkern in Step-Lap-Ausführung mit Staffelung der Stoßstellen von Schenkeln und Jochen [6]
 a) Blechebene
 b) Seitenansicht des Blechpaketes eines Schenkels

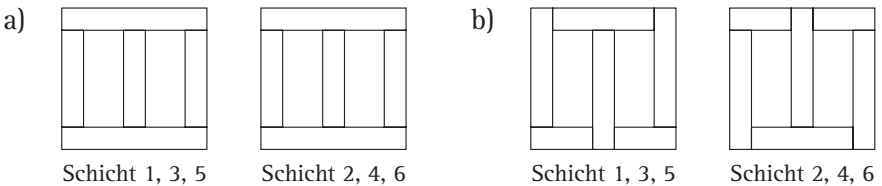


Bild 2.5 Blechschichtung bei Parallelblechung
 a) für stumpfen Stoß
 b) für verzapften Stoß

mittleren Induktionsbereich (1,40 T bis 1,65 T). Die Technologie der Positionierung der einzelnen Bleche für komplette Säulen und Joche erfordert rechnergesteuerte Querteilanlagen mit integrierter Schichtvorrichtung [16].

Bei Kerntransformatoren werden im Allgemeinen Wicklungen mit kreisförmigen Spulen bevorzugt. (Kernquerschnitte kleiner Transformatoren sind aus Gründen der Einfachheit quadratisch.) Um den kreisförmigen Querschnitt der Wicklung optimal mit Eisen zu füllen, muss der Querschnitt des Schenkels mehrfach abge-

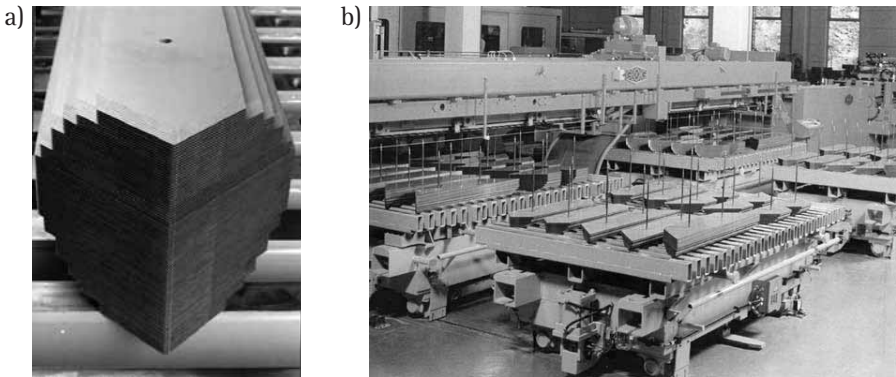


Bild 2.6 a) Beispiel einer „Step-Lap“-Blechbeschichtung; Werkfoto: SBG Neumark
 b) Technologische Einrichtungen zur Blechpositionierung; Werkfoto: SBG Neumark

a) Kernquerschnitte ohne Kühlschlitze b) Kernquerschnitte mit Kühlschlitze

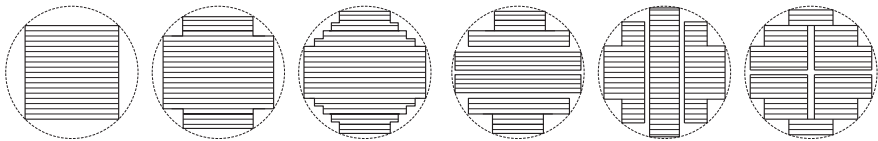


Bild 2.7 Querschnittsformen parallel geblechter Kerne

stuf werden, auch aus Gründen der besseren Beherrschung der bei Kurzschluss auftretenden radialen Wicklungskräfte. Mit feiner werdender Stufung verringern sich im gleichen Maße die Abmessungen des Transformators, und bei steigender Leistung nähert sich der Kernquerschnitt der Kreisform (Füllfaktoren $> 90\%$). Die Joche werden genau so gestuft wie die Kerne. Ausgeführt werden aber auch ovale Kerne. Bei großen Kernquerschnitten (Transformatorleistungen > 16 MVA) werden im Innern des Kerns Kühlkanäle angeordnet. Kühlkanäle parallel zur Blechebene stellen die technisch einfachste Lösung dar. Senkrecht zur Blechebene sind Kühlkanäle am wirksamsten (Bild 2.7).

2.3 Wicklungsaufbau

Bezeichnet werden die Wicklungen eines Transformators nach dem Verlauf des Energieflusses, der Höhe der Spannung, der Wicklungsanordnung und dem Spulenaufbau. Primärwicklung heißt die Wicklung, der elektrische Energie zugeführt wird (N_1 oder N_P); der Sekundärwicklung (N_2 oder N_S) wird elektrische Energie entnommen. N bezeichnet die Anzahl der Windungen. Da in Abhängigkeit vom