Kapitel 1

Einleitung

There is no science without measurements, no quality without testing, and no global markets without standards. (Commission of the European Union, [23])

Leistungstransformatoren stellen in den Transport-, Übertragungs- und Verteilnetzen der Energieversorgungsunternehmen weltweit die aufwändigsten und wirtschaftlich wertvollsten Betriebsmittel dar. Durch sie wird ein ökonomisch und technisch sinnvoller Austausch elektrischer Energie zwischen der Erzeugung, potentieller großtechnischer Speicherung und den Verbrauchern über das Netz auf verschiedenen Spannungsebenen erst ermöglicht. Auch für die, durch die in den vergangenen Jahren begonnene Energiewende forcierte, Integration dezentraler Erzeugung elektrischer Energie aus konventionellen und regenerativen Quellen und den notwendigen Anlagen zur klein- und großtechnischen Speicherung elektrischer Energie in bestehende Netzstrukturen ist der Einsatz von Leistungstransformatoren unverzichtbar. Da die Verfügbarkeit dieser Betriebsmittel in ihrer Funktion als Maschinentransformator, Netzkuppeltransformator, Stromrichtertransformator oder Sondertransformator im Rahmen eines störungsfreien Netzbetriebs stets gewährleistet sein muss, wird der elektrischen Prüfung der Transformatoren bei Fertigstellung, nach Reparatur oder bei Unregelmäßigkeiten, die im Betrieb oder durch die Anwendung diagnostischer Methoden erkannt wurden, ein hohes Gewicht beigemessen. Kostenminimierung und Erhöhung der Effizienz durch höhere Auslastung und Steigerung der Betriebsdauer stehen im Kontrast zur Gefahr eines Ausfalls mit verbundenem wirtschaftlichen Schaden und drohender Beeinträchtigung von Mensch und Umwelt.
Verlässliche Aussagen über den Zustand der Leistungstransformatoren helfen den Energieversorgungsunternehmen bei der Organisation der Instandhaltung, bei der Einschätzung des Fehlerrisikos und gegebenenfalls bei der Investitionsplanung zur Neubeschaffung von Transformatoren im Netz. Das Spektrum der etablierten Methoden der Diagnostik an Leistungstransformatoren umfasst, neben der Untersuchung der Wicklung auf eventuell vorhandene Schäden und der Zustandsbetrachtung der Anbauteile wie Stufenschalter und Durchführungen, die Untersuchung des Isolationssystems und dessen thermische Beanspruchung. Hierzu werden Messungen der Kapazität und des zugehörigen Verlustfaktors $\tan \delta$ zwischen den Wicklungen und zwischen Wicklung und Kessel, Messungen des Isolationswiderstands, Polarisations-Depolarisationsstrommessungen (PDC-Methode), Gas-in-Öl-Analysen und die dielektrische Analyse des Isolationssystems eingesetzt, um Aufschluss über Alterung und Feuchtigkeitsgehalt der Isolation zu geben. Die wichtigsten Verfahren zur Zustandsbeurteilung des Isolationssystems bilden die Gas-in-Öl-Analyse, die Frequenzbereichsspektroskopie (engl. *frequency domain spectroscopy (FDS)*) und die Messung der Teilentladung (TE). Die Messung der Teilentladung an Transformatoren kann im Zuge einer langfristigen Monitoring-Maßnahme oder einer einzelnen Online-Messung bei einer Speisung aus dem Netz bei Bemessungsfrequenz und Bemessungsspannung erfolgen. Soll die Messung der Teilentladung im Rahmen einer Prüfung mit induzierter Wechselspannung offline bei deutlich erhöhtem Spannungspegel durchgeführt werden, so

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

muss die Frequenz der speisenden Spannung ebenfalls deutlich über der Bemessungsfrequenz liegen, um die Sättigung des Kerns und somit hohe Magnetisierungsströme zu vermeiden.

1.1 Problemstellung

Bei Stück-, Typ- und Sonderprüfungen an flüssigkeits- oder trockenisolierten Leistungs-, Verteil- oder Regeltransformatoren werden unter anderem leistungsstarke Wechsel- oder Drehspannungsquellen zur Speisung des Prüfkreises benötigt. Bisher werden Prüfungen, die den Einsatz von Quellen mit ein- oder dreiphasiger sinusförmiger Augsangsspannung notwendig machen, weitgehend mit rotierenden Umformern ausgeführt. Bei Messungen, die bei Bemessungsfrequenz des Transformators vorgenommen werden, kann der Prüfkreis bei entsprechender Netzfrequenz über Stelltransformatoren direkt aus dem speisenden Netz des Prüffelds gespeist werden. Begünstigt durch den raschen Fortschritt auf dem Gebiet der Leistungselektronik, ist es in den vergangenen Jahren gelungen, bei Neuausrüstung oder Modernisierung bestehender Prüffelder, Frequenzkonverter auf Basis leistungselektronischer Elemente zu etablieren, mit denen sich nicht nur Messungen mit netzfrequenten Prüfspannungen sondern auch Prüfungen mit Prüfspannungen durchführen lassen, deren Frequenz von der Netz- und der Bemessungsfrequenz des zu prüfenden Transformators abweicht. So muss bei der Prüfung mit induzierter Spannung die Frequenz der sinusförmigen Prüfspannung erhöht werden, um eine erhöhte Stromaufnahme zu vermeiden. Bei der Auslegung der stationären wie auch der mobilen Prüfsysteme ist, unabhängig von der Speisung durch statische Frequenzumrichter oder durch Motor-Generator-Sätze, zunächst unklar, wie hoch der Bedarf an Wirk- und Blindleistung seitens des zu prüfenden Transformators ist, die durch das Prüfsystem zur Verfügung gestellt werden muss. Gerade bei Prüfungen vor Ort sollten die Komponenten des Gesamtsystems, wie die Spannungsquelle zur Speisung des Prüfkreises, der Anpasstransformator und auch eine mögliche Kompensationseinheit, wohl dimensioniert und auf einander abgestimmt sein. Einfache Überlegungen und vorausgehende Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass sich die Leistungsaufnahme eines Transformators bei der Prüfung mit induzierter Spannung abhängig von der Amplitude und der gewählten Frequenz der Prüfspannung verändert. Es wäre nun erstrebenswert, die Prüfung mit induzierter Spannung im Bereich einer Frequenz durchzuführen, bei der die durch das Prüfsystem aufzubringende Leistung minimal wird, sofern dabei die geltenden Normen, weitere geltende Bestimmungen und Absprachen zwischen Hersteller und Kunde eingehalten werden. Jedoch ist zunächst vor Beginn der Prüfung nicht klar, ob eine solche Frequenz unter den geltenden Rahmenbedingungen gefunden werden kann. Es fehlen Informationen über die Lage und Breite eines solchen Frequenzbereichs minimaler Leistungsaufnahme sowie über die Änderung der Lage und Breite in Abhängigkeit von der Amplitude der Prüfspannung.

1.2 Motivation und Ziele

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll ein Verfahren entwickelt werden, um mittels Simulation den Leistungsbedarf für ein- und dreiphasige Transformatoren bei der Prüfung mit induzierter Spannung abzuschätzen. Hierzu muss aus der Vielzahl bestehender Methoden und Klassifikationen zur Modellierung von Transformatoren ein geeigneter Ansatz ausgewählt, implementiert und für den spezifizierten Anwendungsfall weiterentwickelt und angepasst werden. Anhand ausgewählter Beispiele soll durch den Vergleich von Simulationsergebnissen mit experimentell ermittelten Daten die Funktionstüchtigkeit des Berechnungsmodells für ein- und dreiphasige Transformatoren nachge-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wiesen, aber auch Einschränkungen und Unexaktheiten des Verfahrens aufgezeigt werden. Durch vorausgehende Forschungsarbeiten konnte bei Betrachtungen zu einphasigen Transformatoren auf einen einphasigen statischen Frequenzumrichter und die Netzspannung als Speisung zurückgegriffen werden. Für die Untersuchungen an dreiphasigen Transformatoren wurde im ersten Ansatz ein Laborsystem auf Basis eines statischen Frequenzumrichters aus der Antriebstechnik mit ungeregelter Ausgangsspannung errichtet und dessen Eignung für den Einsatz als Prüfsystem für Verteiltransformatoren evaluiert. Ausschlaggebend für die Qualifizierung war die Qualität der Prüfspannung bei Messungen mit Bemessungsspannung und -frequenz sowie die Qualität der Prüfspannung bei Messungen mit erhöhten Werten der Spannung und der Frequenz. Für die Untersuchung an Leistungstransformatoren kleiner und mittlerer Bemessungsleistung war die Auslegung und der Aufbau eines einfachen und robusten statischen Frequenzumrichters mit höherer Ausgangsleistung und geregelter Ausgangsspannung notwendig.

Die folgende Abhandlung beschäftigt sich in Kapitel 2 zunächst mit grundlegenden Betrachtungen zu den für diese Arbeit relevanten Themen: Neben den allgemeinen Grundlagen zum Transformator als wichtigem Betriebsmittel der elektrischen Energietechnik wird der Werkstoff Transformatorenblech als kornorientiertes ferromagnetisches Material vorgestellt. Dabei wird näher auf die Grundlagen des Ferromagnetismus, die Zustandsgrößen des magnetischen Felds und die Verlustarten im Material eingegangen. Hiernach wird ein kurzer Überblick über die Prüfungen an Leistungstransformatoren gegeben, denen im Rahmen dieser Arbeit eine besondere Bedeutung zukommt: der Prüfung mit induzierter Spannung und der Messung der Leerlaufverluste und des Leerlaufstroms.

Im folgenden Kapitel wird ein Laborprüfsystem für Verteiltransformatoren vorgestellt, bei dem ein statischer Frequenzumrichter aus der Antriebstechnik mit ungeregelter Ausgangsspannung als Spannungsquelle verwendet wird. Die Eignung dieser Anordnung als Prüfsystem für Wechselspannungsprüfungen und Leistungsmessungen an Transformatoren wurde experimentell untersucht. Hierbei konnten Einschränkungen bei der Verwendung zur Messung der Leerlaufverluste und des Leerlaufstroms und der Verwendung zur Prüfung mit induzierter Spannung aufgezeigt werden. Für die im Labor und vor Ort als Testobjekt ausgewählten Transformatoren wurden zusätzlich experimentelle Untersuchungen zur Leistungsaufnahme bei Leerlauf in Abhängigkeit von der Frequenz und der Amplitude der speisenden Spannung vorgenommen.

Kapitel 4 stellt die Auslegung und Realisierung eines dreiphasigen Frequenzumrichters mit geregelter Ausgangsspannung vor, dessen Aufbau es ermöglichen soll, mit einer akzeptablen Qualität der Spannung fortan experimentelle Untersuchungen an Leistungstransformatoren kleiner und mittlerer Bemessungsleistung durchführen zu können. Die Wirksamkeit der realisierten Regelung der Ausgangsspannung kann durch den Vergleich mit signifikanten Werten der im vorausgehenden Kapitel präsentierten Messergebnisse validiert werden.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Messung und Modellierung hystereseförmiger Magnetisierungkennlinien von Transformatorenblech. Auf den Erläuterungen in Kapitel 2 basierend wird das Verfahren nach Jiles und Atherton sowie das Preisach-Modell zur Modellierung hystereseförmiger Magnetisierungkennlinien von Transformatorenblech vorgestellt. Als Vergleichsbasis für die Modellierung der Hysteresekennlinien dienen Messwerte, die mittels Epsteinrahmen und Einzelblatttester ermittelt werden konnten.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Die in Kapitel 5 vorgestellten Methoden zur Modellierung von Hystereseschleifen werden im darauf folgenden Kapitel 6 in Modelle für ein- und dreiphasigen Transformatoren übernommen, die so angelegt sind, dass sich die vom Transformator aufgenommene Wirk- und Scheinleistung bei Speisung mit sinusförmigen Spannungen unterschiedlicher Amplitude und Frequenz aus gegebenen Geometriedaten, Informationen zu dem im Kern verwendeten Elektroblech und der Messung der wirksamen Kapazitäten, der Wicklungswiderstände und der Streureaktanzen bestimmen lassen. Exemplarisch erfolgt die Modellierung eines einphasigen und eines dreiphasigen Transformators, deren Ergebnisse diskutiert und mit den Resultaten entsprechender experimenteller Untersuchungen verglichen werden.

Im letzten Kapitel wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf noch offene Fragestellungen bezüglich der Untersuchung der frequenzabhängigen Leistungsaufnahme unbelasteter Transformatoren abgeschlossen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Transformatoren

2.1.1 Ausführungsformen von Transformatoren in der elektrischen Energietechnik

Bei einem Transformator handelt es sich um ein statisches Gerät, das durch elektromagnetische Induktion Wechselspannung und -strom zwischen zwei oder mehr Wicklungen bei gleicher Frequenz und gewöhnlich unterschiedlichen Werten der Spannung und des Stromes überträgt [136]. Das Aufkommen des Leistungstransformators gegen Ende des 19. Jahrhunderts ermöglichte es fortan in der Geschichte der elektrischen Energieversorgung, immer mehr Verbraucher mit elektrischer Energie zu versorgen, die sich nicht unmittelbar am Ort der Erzeugung befanden [49]. Somit konnten sich über die Zeit die Netze zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie entwickeln, wie wir sie heute kennen. Strukturiert in Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze unterschiedlicher Nennspannungen ermöglichen die Transport- und Verteilnetze einen Transport elektrischer Energie vom Erzeuger zum Verbraucher. Leistungstransformatoren ermöglichen nun den Austausch elektrischer Energie zwischen Stromkreisen unterschiedlicher Spannung über ein magnetisches Feld [67]. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Volltransformatoren mit getrennten Wicklungen, bei denen die transformatorisch gekoppelten Stromkreise galvanisch getrennt sind und Spartransformatoren, bei denen mindestens zwei Wicklungen einen gemeinsamen Teil aufweisen, der somit eine galvanische Verbindung zwischen den angeschlossenen Stromkreisen herstellt [96]. Hierbei ist als Wicklung die Gesamtheit aller Windungen eines der elektrischen Kreise anzusehen [51]. Spartransformatoren werden in dieser Arbeit nicht gesondert betrachtet. Leistungstransformatoren lassen sich nach Aufgabe und Auslegung in folgende Gruppen einteilen: Maschinentransformatoren (engl. *generator step-up transformers*) mit Grenzleistungen bis ca. 1500 MVA [38], über welche die Leistung der Synchrongeneratoren in Kraftwerken ins elektrische Netz eingespeist wird, Netzkuppeltransformatoren, über die Netze unterschiedlicher Spannung verbunden werden und Verteiltransformatoren im Leistungsbereich zwischen 100 kVA bis 2000 kVA, die zur Versorgung lokaler Bereiche auf der Niederspannungsebene aus dem Mittelspannungsnetz eingesetzt werden. Regeltransformatoren besitzen Wicklungen mit Anzapfungen; durch unter Last durchführbare Umschaltungen kann die Übersetzung in Betrag und Phase geändert werden um somit als Längs-, Quer oder Schrägregler Wirk- und Blindleistungsflüsse zu beeinflussen.
Zu den genannten Transformatoren kommen noch Gruppen von Sondertransformatoren wie Stromrichtertransformatoren, Fahrzeugtransformatoren, Anlasstransformatoren, Prüftransformatoren, Ofentransformatoren, gasgefüllte Leistungstransformatoren und Transformatoren für Windenergieanlagen-Anwendungen, die von einer weiteren Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit jedoch ausgeschlossen sind.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

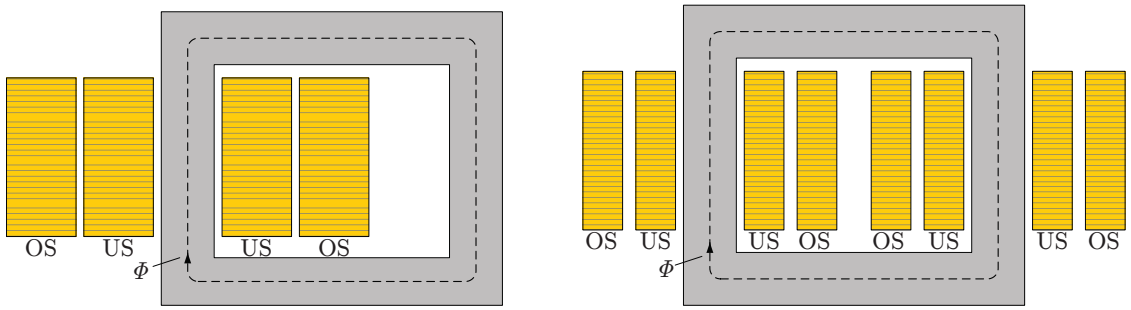
In Europa kommen fast ausschließlich Drehstromtransformatoren zum Einsatz, bei denen drei einphasige Anordnungen durch einen gemeinsamen Eisenkern gekoppelt sind. Einphasige Leistungstransformatoren finden sich in Netzen zur Bahnstromversorgung oder werden zu Drehstrombänken verschaltet, wenn besonders große Einheitenleistungen realisiert werden müssen [38]. Mehrwicklungstransformatoren ermöglichen es, mehr als zwei Netze unterschiedlicher Spannungsebenen zu koppeln: Maschinentransformatoren sind üblicherweise als Zweiwicklungstransformatoren, Netzkuppeltransformatoren als Dreiwicklungstransformatoren ausgeführt [67].
Ab einer Bemessungsleistung von $S_\mathrm{r} = 40$ MVA werden Leistungstransformatoren üblicherweise in Kesselbauform mit einer Öl-Papier-Pressboard-Isolation ausgeführt. Für Transformatoren mit kleinerer Bemessungsleistung oder für besondere Einsatzgebiete stehen zusätzlich Trockentransformatoren zur Verfügung. Insbesondere bei brandgefährdeten Anlagen kommen im Mittelspannungsbereich Transformatoren mit einer Gießharz-Feststoffisolation zum Einsatz.

2.1.2 Aufbau von Leistungstransformatoren

Herzstück jedes Transformators bildet der Aktivteil, der wiederum im Wesentlichen aus dem Eisenkern, den Wicklungen und der Feststoffisolation besteht. Diese Komponenten befinden sich bei Öltransformatoren zusammen mit dem Isolieröl auf Mineralöl- oder Esterbasis in einem geschweißten Stahlkessel, der Anschluss an den Aktivteil wird von außen über Durchführungen realisiert.
Um eine möglichst gute Kopplung zwischen Primär-, Sekundär- und gegebenfalls Tertiärwicklung herzustellen und den Teil des magnetischen Felds zu minimieren, der, als Streufeld ausgeprägt, sich nicht über andere Wicklungssysteme schließt, wird der magnetische Fluss, der vom Magnetisierungsstrom I_μ des Transformators hervorgerufen wird, in einem Eisenkern hoher Permeabilität geführt. Die senkrechten Segmente des Eisenkerns bezeichnet man als Schenkel, die waagrechten Segmente als Joche. Die Wicklungen werden bei Leistungstransformatoren ausschließlich konzentrisch um die Schenkel angeordnet. Eisenkerne einphasiger Transformatoren bestehen entweder aus zwei Schenkeln (Kerntyp), von denen, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, ein oder beide Schenkel bewickelt werden. Alternativ weisen Eisenkerne einphasiger Transformatoren drei Schenkel auf, von denen der mittlere Schenkel die Wicklungen trägt (Manteltyp), siehe Abbildung 2.2. Der resultierende magnetische Fluss im Mittelschenkel kann sich über die beiden äußeren Schenkel schließen. Da man bei einer symmetrischen Anordnung davon ausgehen kann, dass sich der magnetische Fluss hierbei etwa gleich auf die Außenschenkel aufteilt, können diese mit etwa halber Querschnittsfläche ausgeführt werden. Auch ist es möglich einen vierschenkligen Eisenkern zu wählen und die Wicklungen auf die beiden mittleren Schenkel zu verteilen [93].

Fügt man drei Einphasentransformatoren in Kernbauweise in einer sternförmigen Anordnung zusammen, entsteht ein symmetrischer Dreiphasentransformator als Tempeltyp [6]. Bei symmetrischer Speisung und Belastung kann man auf den mittleren, gemeinsamen Schenkel verzichten. Üblicherweise ordnet man die verbleibenden drei bewickelten Schenkel in einer Ebene an, wodurch sich jedoch durch die Lage des magnetischen Verkettungspunkts der drei Schenkel ein unsymmetrischer Aufbau ergibt. Der Bedarf an Magnetisierungsdurchflutung ist für den mittleren Schenkel auf Grund des kürzeren Eisenwegs geringer. Sobald sich die Flüsse der drei bewickelten Schenkel hier nicht zu null addieren, resultiert ein Luftfluss, der sich wegen des geringen magnetischen Widerstands über andere Konstruktionsteile aus Eisen schließt und zusätzliche Eisenverluste hervorruft. Zwei zusätzliche Rückschlussschenkel bieten einen freien magnetischen Rückschluss; somit kann die benötigte Querschnittsfläche der Joche auf etwa 60 % verringert werden [6], womit sich die Transporthöhe des

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



(a) ein bewickelter Schenkel (b) zwei bewickelte Schenkel

Abb. 2.1: Beispiele für zweischenklige Eisenkerne einphasiger Transformatoren, nach [93] und [157]

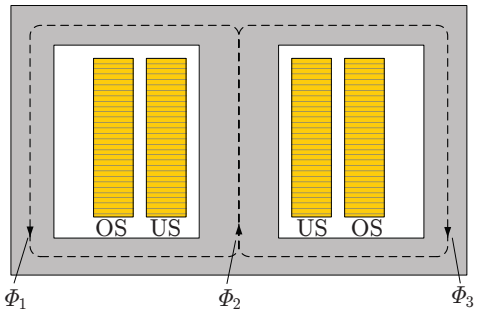
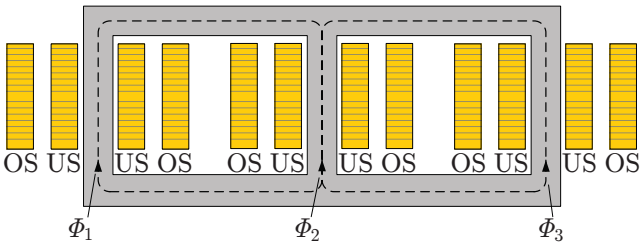


Abb. 2.2: Eisenkern eines einphasigen Transformators mit drei Schenkeln und bewickeltem Mittelschenkel, nach [93] und [157]

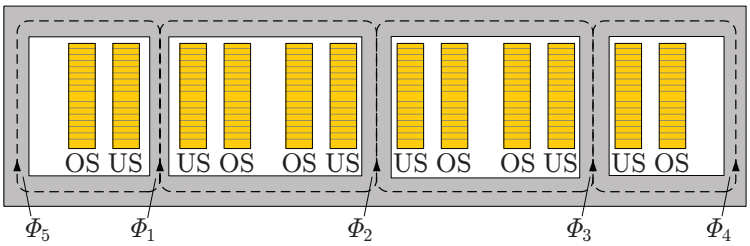
Transformators reduzieren lässt [49]. Sonderanwendungen können Zwischenjoche oder sechsschenklige Anordnungen erfordern. Abbildung 2.3 zeigt Beispiele für Eisenkerne dreiphasiger Transformatoren.

Der reale magnetische Kreis aller elektrischen Maschinen mit zeitlich nicht konstantem magnetischen Fluss wird als Blechpaket ausgeführt [6]. Der Kern eines Transformators entsteht heute üblicherweise durch eine Schichtung von siliziumlegierten, kornorientierten, kaltgewalzten Transformatorenblechen durch Parallelblechung. Radial- und Evolventenblechung spielen lediglich eine untergeordnete Rolle [6]. Zur Verringerung der Wirbelstromverluste und somit der gesamten Leerlaufverluste wird während des Walzprozesses eine sehr dünne hochohmige anorganische Isolierschicht beidseitig auf dem Blech aufgebracht [38]. Die Stärke d_{Fe} der Transformatorenbleche variiert üblicherweise zwischen von 0,23 mm und 0,35 mm [143]: Mit abnehmender Blechdicke und steigendem Siliziumgehalt sinken die spezifischen Wirbelstromverluste. Jedoch steigt der Fertigungsaufwand beim Schneiden und Legen, und die Bleche werden spröder und nicht mehr kaltwalzbar [105]. Kornorientierte Bleche für höhere Induktionen (HiB-Werkstoffe) werden aus Legierungen hergestellt, die neben Eisen und Silizium weitere Zusätze wie Mangansulfat oder Aluminiumnitrit [93] aufweisen, um die magnetischen Eigenschaften zu verbessern und um die Verluste und Geräusche zu verringern. Eine weitere Verbesserung der Blechqualität und somit Senkung der Verluste wird durch die Behandlung der Blechoberfläche mit Laser oder mechanischem Anritzen erreicht, da hierdurch der Abstand der Weißschen Bezirke verringert wird. Die Breite der für die Kernschenkel verwendeten Blechstreifen wird von der Rück- zur Vorderseite der Schenkel so gestuft, dass eine annähernd kreisförmige Querschnittsfläche entsteht, um den Raum innerhalb der zylinderförmigen Wicklungen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.



(a) Dreischenkelkern



(b) Fünfschenkelkern

Abb. 2.3: Beispiele für Eisenkerne dreiphasiger Transformatoren, nach [93] und [157]

möglichst gut auszunutzen [38, 49]. Die Joche werden genau so gestuft wie die Schenkel. Kerne kleiner Transformatoren weisen aus Gründen der Einfachheit quadratische Querschnittsflächen auf [6], auch ovale Kernquerschnitte werden realisiert. Zur Reduktion der Geräuschemissionen und Minderung der relevanten magnetischen Widerstände und der Magnetisierungsleistung erfolgt die Verbindung von Joch und Schenkel nicht im stumpfen Stoß, sondern verzapft [6, 38], um auftretende Luftspalte zu vermeiden, da jede Abweichung des magnetischen Flusses von der Vorzugsrichtung der Blechstreifen die Verluste überproportional ansteigen lässt [93]. Somit werden die Blechstreifen zur Beibehaltung der magnetischen Vorzugsrichtung an den Ecken und Verzweigungen des Transformatorkerns so zugeschnitten und mit einer Gehrung versehen, dass sich die Blechstreifen von Kernschenkel und Joch überlappen. Als besonders Vorteilhaft hat es sich erwiesen, trotz des höheren Arbeitsaufwands, eine Step-Lap-Schichtung der einfachen Überlappung mit zwei verschiedenen Blechpositionen vorzuziehen: Der Übergang wird hierbei mit einer Staffelung mit fünf bis sieben verschiedenen Blechpositionen und einem Blech pro Step umgesetzt. Bei einer bestimmten Anzahl von Steps reduziert sich die effektive Querschnittsfläche um den Kehrwert der Stepzahl. Bei einer einfachen Wechselschichtung wird der effektive Querschnitt um 50 % reduziert, was eine lokale Erhöhung der Verluste nach sich zieht [93]. Bei Transformatorenkernen mit drei Schenkeln haben sich der 45°-Schnitt für die Verzapfung der Außenschenkel mit dem Joch und der 90°-Dachwinkel für den Mittelschenkel etabliert [6]. Durch Kernbandagierung, Zugpressplatten, Rundleisten, Joch-Bandagen und Pressrahmen an der Ober- und Unterseiten des Kerns wird der mechanische Aufbau des Kerns fixiert. Pressungen mit Bolzen quer durch das Eisen werden vermieden, um keine zusätzlichen Verluste hervorzurufen [38]. Bei Leistungstransformatoren großer Bemessungsleistung werden durch das Einlegen von Distanzleisten Kühlkanäle im Kern vorgesehen, damit das durchströmende Isolieröl die dort entstehende Wärme abführen kann. Der Eisenkern wird an nur einer Stelle im Transformator galvanisch mit dem Kessel verbunden und somit auf Erdpotential gelegt, um keine Leiterschleifen zu bilden, durch die Wirbelströme fließen könnten. Um gerade bei Trockentransformatoren die Leerlaufverluste zu reduzieren, kommen hier Kerne aus amorphen Materialien immer öfter zum Einsatz. Durch das auf eine Stärke von lediglich ca.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

23 μm ausgewalzte Material ergibt sich eine sehr hohe Anzahl von Lagen im Kern; durch die somit reduzierten Wirbelstromverluste lassen sich die gesamten Leerlaufverluste um 70 % reduzieren [46].

Auf die Kernschenkel wird das Feststoffisolationssystem zur Unterspannungswicklung montiert. Diese besteht, wie auch die Feststoffisolation zwischen der Unter-, der Ober- und gegebenenfalls der Mittelspannungswicklung, aus Isolierbarrieren und Formteilen aus Transformerboard, die mithilfe von Distanzleisten fixiert werden. Gegenüber mehrlagigem Papier behält Transformerboard unter Isolieröl seine Form bei und kann mechanischer Belastung ausgesetzt werden [44]. Über Schirmringe, deren Form dem Verlauf der Äquipotentiallinien angepasst ist, erreicht man eine Reduktion der elektrischen Beanspruchung der Isolation im Bereich der Wicklungsenden, die auf hohem Potential liegen. Der gesamte Wicklungsaufbau mit Isolation wird über Druckringe in den Kernfenstern verspannt und zusammengepresst. Somit werden in vertikaler Richtung genügend große Kräfte erzeugt, um den axial wirkenden Stromkräften entgegenzuwirken. Die Wicklungen werden bei Öltransformatoren als Lagen- oder Scheibenspulenwicklungen ausgeführt. Unterspannungswicklungen werden meist als Lagenwicklungen aus konzentrisch übereinander angeordneten Zylinderspulen ausgeführt. Distanzstücke aus Isolierstoff sorgen für eine Isolation zwischen den Lagen; gleichzeitig werden somit Kühlkanäle geschaffen. Scheibenspulenwicklungen eignen sich für Wicklungen mit höheren Bemessungsspannungen. Hierbei werden Windungen zu Scheiben geformt und in Serie geschaltet. Die Scheiben werden durch Distanzleisten getrennt übereinandergelegt. Die Windungen werden bei kleinen Transformatoren aus Einfachleitern mit runder oder rechteckförmiger Querschnittsfläche, bei größeren Transformatoren aus Drillleitern gefertigt. Durch die Verdrillung der lackisolierten Teilleiter innerhalb einer gemeinsamen Papierbandage und die Führung der verdrillten Anordnung der Einzelleiter im Leiterbündel wird erreicht, dass die einzelnen Teilleiter in gleicher Weise mit Wirbelstromverlusten belastet werden [51]. Die gesamten Wirbelstromverluste in den Wicklungen werden reduziert, da durch die geringen Abstände der Teilleiter das magnetische Streufeld in diesem Bereich nur geringe Spannungen zwischen den Teilleitern induzieren kann [44]. Erzwungene oder natürliche Konvektion des Isolieröls sorgt für eine Durchströmung des gesamten Wicklungsaufbaus und transportiert die Verlustwärme aus dem Aktivteil hin zu Radiatoren mit und ohne Lüfter oder Wasserkühlanlagen.

Der Kontakt zu den Netzanschlüssen wird über Durchführungen realisiert, die das hohe Potential durch die geerdeten Kesselwände nach außen führen. Im Hoch- und Höchstspannungsbereich werden Durchführungen mit einer kapazitiven Steuerung des elektrischen Feldverlaufs verwendet, die mit ölimprägniertem Papier (engl. *oil impregnated paper (OIP)*) oder gießharzimprägniertem Papier (engl. *resin impregnated paper (RIP)*) isoliert sind. Häufig erfolgt auch der Anschluss an Energiekabel über ölgefüllte Kabelboxen oder Steckverbindungen. Abbildung 2.4 zeigt in einem Schnittbild exemplarisch den Aufbau eines Leistungstransformators.

Die bisher zum Aufbau von Leistungstransformatoren dargelegten Beschreibungen vermitteln einen groben Überblick, der die Grundlagen für das Verständnis der folgenden Ausführungen bereitstellt. Genauere Ausführungen finden sich in [6], [67], [83], [93] und [96].

2.2 Werkstoff Transformatorenblech

Elektroband und -blech ist aufgrund der günstigen magnetischen Eigenschaften von großer Bedeutung für die Anwendung in der Elektrotechnik. Von anderen Stahlbändern unterscheidet sich

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.