Aufbau und Verhalten moderner Isolationssysteme bei Transformatoren

M. Muhr, C. Sumereder, R. Woschitz

Kurzfassung

Dieser Beitrag soll einen Überblick über die derzeitigen Entwicklungen im Isolierstoffbereich sowie den Aufbau und das Verhalten dieser Systeme bei Transformatoren geben. Das Betriebsmittel Transformator seit über 100 Jahren im Einsatz und seine Technologie daher entsprechend ausgereift. Im Transformatorenbau ist heute einerseits ein Kompromiß aus Wirkungsgrad und Kosten in der Verlustbewertung zu finden und andererseits auf die Anforderungen des Umweltschutzes durch den Einsatz von alternativen Isolationssystemen einzugehen. Das angestrebte Ziel in der Konstruktion ist die Verringerung des Volumens und Gewichtes bei gleicher Leistung. Durch computerunterstützte Berechnungsmethoden kann das Design optimiert, durch Einsatz neuer Isoliersysteme eine höhere Spannungsfestigkeit und längere Lebensdauer erzielt und durch Entwicklung neuer Fertigungstechniken die Produktion automatisiert werden. Für den Ersatz von Mineralöl wurden Esterflüssigkeiten, Silikonöle und biologische Öle untersucht und geprüft bzw. hat der Trockentransformator über den Verteilnetztransformator bis zum Leistungstransformator den Einzug geschafft. Im Bereich der Traktionstransformatoren ist durch die Hochtemperatursupraleitung ein Technologiesprung zu erwarten, der Einsatz von Prototypen in Hochgeschwindigkeitszügen steht unmittelbar bevor. Aufgrund der Deregulierung der Elektrizitätswirtschaft gewinnt die Zustandsbeurteilung der Isolationssysteme zunehmend an Bedeutung, da im liberalisierten Strommarkt ein enormer Kostendruck auf die Netzbetreiber besteht und daher der Aufwand für Betrieb, Instandhaltung und Investitionen bei gleichbleibender Versorgungsqualität einem sinnvollen Kosten-Nutzen-Verhältnis angepaßt werden muß.

1. Einleitung

Transformatoren werden seit über 100 Jahren gebaut und die Entwicklung ist daher entsprechend ausgereift, bei Leistungstransformatoren werden Wirkungsgrade bis zu 99 % erreicht. Aufbauend auf das Induktionsgesetz, eines der grundlegenden physikalischen Gesetze, hat sich der allgemeine Aufbau nicht mehr verändert. Transformatoren sind im weiten Leistungs- und Spannungsbereich das wichtigste Verbindungsglied zwischen Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie.

Ein entscheidender Faktor für die Dimensionierung stellen die zulässigen Verluste dar, jeder Leistungstransformator wird einer Verlustbewertung unterzogen. Die Erhöhung des Wirkungsgrades rentiert sich oft erst nach vielen Jahren. Die Entwicklungen im Transformatorenbau beschränken sich daher auf Entwicklung computerunterstützte Feldberechnungsmethoden und den Einsatz neuer Isolierstoffe, um das Design zu optimieren und die Baugröße bzw. Gewicht bei gleicher elektrischer Festigkeit und Leistung zu minimieren. Ein wesentlicher Beitrag betrifft auch eine höhere Effizienz, bessere Zuverlässigkeit und mehr Wirtschaftlichkeit. Ein wichtiger Faktor ist auch die Umweltverträglichkeit und Recyclierbarkeit der eingesetzten Materialien.

Die wesentlichen Bauteile eines Transformators sind der Kern aus kornorientiertem Blech, die Wicklung aus Kupfer samt Spannungszuführung und Spannungseinstellung, der Kessel und das Kühlsystem. Je nach Anwendung werden die Komponenten unterschiedlich dimensioniert und es ergibt sich folgende Einteilung: Maschinen-, Leistungs-, Verteilungs-,

Traktionstransformatoren. Die Unterscheidung kann auch nach dem Bauprinzip in flüssiggekühlte und Trockentransformatoren getroffen werden.

2. Technologieentwicklung

Der große Fortschritt in der Transformatortechnologie beruht vor allem auf verbesserten Werkstoffen, insbesonders das Kernmaterial und fortschrittlichen Design-Werkzeugen. Dabei spielt die eindrucksvolle Reduktion an Gewicht und Verlusten in der ständigen Verbesserung des Kernmaterials eine herausragende Rolle. Die Entwicklung von Material mit sehr kleinen Verlusten war besonders der Schritt von heißgewalzten Blechen aus FE-SI Alloy zu kaltgewalzten kornorientierten Transformatorblechen. Dies war nicht nur für die Optimierung des Transformators wie Größe, Gewicht, Verlusten, Effizienz und Geräusch, sondern auch für weitere Effekte wie Kühlung, Raumbedarf, Transport und wirtschaftliche Vorteile wichtig.

Im Bereich der Wicklungen haben sich einerseits neue Isolierstoffe und Produktionsmethoden durchgesetzt und andererseits ist die Kabelwicklung über den Prototypenstatus hinweg für erste kommerzielle Anwendungen bei Leistungstransformatoren verwendet worden.

Schließlich führen noch die Entwicklungen mathematischer Methoden und Modelle unter Einsatz moderner Computertechnik zu verbesserten Berechnungsmethoden, um einerseits 2- oder 3-dimensionale Feldbilder zu erhalten und andererseits eine Optimierung des Isolationssystems, eine Überprüfung der Verluste und Schwingungen in entsprechenden Teilen sowie des Kurzschlussvermögens und thermischen Verhaltens durchzuführen.

Bemerkenswert ist weiters das als Isoliermaterial Papier, Transformerboard, Holz und Mineralöl das dominierende Isolationssystem für den Großteil der Transformatoren geblieben ist. Dies ist vor allem auf die hohe Zuverlässigkeit, die lange Lebensdauer und auch der günstige Preis eine Öl-Zellulose-Systems zurückzuführen. Verbesserte Diagnostikmethode für dieses System werden es auch weiterhin als Hauptisoliersystem für den Transformator erhalten. Denn durch Feuchtigkeit und Alterung ist dieses Isolationssystem in seiner Lebensdauer gefährdet, ebenso wie in falsche Behandlungen bei zu tiefen oder zu hohen Temperaturen. Daher sollte dieses System immer im Kräftevieleck elektrische – thermische – mechanische – umweltbedingte Beanspruchung gesehen werden.

3. Isolierstoffe

3.1 Zellulosefreie Transformatorisolation [1]

Zellulose wird seit Beginn an als Isoliermaterial angewendet, da es für den Transformatorenbau einmalige Eigenschaften aufweist: unbegrenzte Verfügbarkeit, geringe Kosten und einfache Verarbeitbarkeit. Durch steigende Anforderungen im Bereich der Höchstspannungsebene und Hochtemperaturbetrieb werden die Grenzen der Isolationseigenschaften erreicht. Für eben diese Spezialanwendung kommt ein synthetischer zellulosefreier Isolierstoff aufgebaut auf Aramidfasern zum Einsatz. In Abbildung 6 ist die Aramidfaser dargestellt. Dieses unter dem Handelsnamen NOMEX erhältliche Transformerboard weist gegenüber Zellulose folgende Vorteile auf: Dauertemperaturbeständigkeit bis 220°C, kein thermischer Abbau und keine Abspaltung von Gasen oder Nebenprodukten bei Hochtemperaturbetrieb in flüssigen Kühlmedien, geringe Dickenschrumpfung während der Trocknung, niedrige Permittivitätszahl in Öl, geometrische Konstanz während der Trocknung und Betrieb in Öl oder Luft, gute Teilentladungsfestigkeit unter Öl, weitgehend unbrennbar.

Die Verwendung des synthetischen Transformerboards in hoch beanspruchten oder thermisch überbelasteten Stellen in und zwischen den Wicklungen von flüssiggekühlten Transformatoren erlaubt einen höheren Maschinenausnutzungsfaktor, eine Reduzierung der Abmessungen des Aktivteiles sowie eine Überlastbarkeit ohne Lebensdauerverlust über längere Zeiträume. Aufgrund des hohen Preises ist ein genereller Ersatz von Zellulose wirtschaftlich nicht vertretbar. In vielen Fällen spielt jedoch der Herstellungspreis des Transformators eine untergeordnete Rolle, die Reduktion der Abmessungen oder des Gewichtes bekommt gegenüber den Gestehungskosten höhere Priorität.

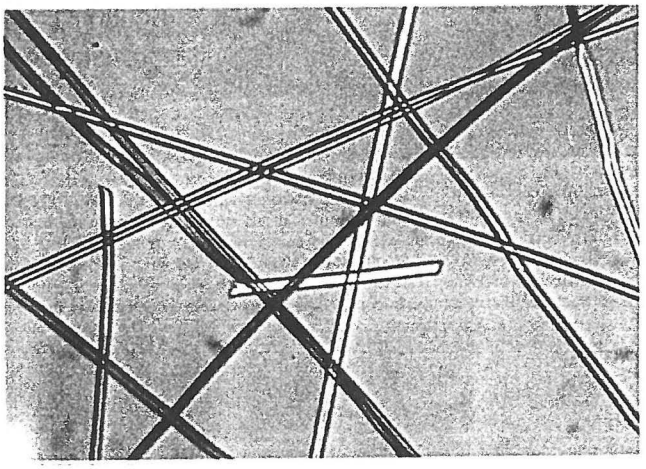


Abbildung 6: Aramidfaser, Faserlänge ca. 3 mm [1]

Bei einem Transformator sind nicht alle Teile den gleichen Belastungen ausgesetzt, wodurch sich die Möglichkeit ergibt den Einsatz von NOMEX-Komponenten auf die exponierten Transformatorteile zu beschränken. Der Substitutionsgrad liegt bei 25 bis 50% und kann zusätzlich durch eine exakte Berechung der Heißpunkte in den Wicklungen reduziert werden. In Transformatoren mit höherer Kühlmitteltemperatur, beispielsweise werden in der Wicklung eines Traktionstransformators Temperaturen bis zu 190°C erreicht, ist eine 100 prozentige Substitution von Zellulose erforderlich.

3.2 Synthetische Isolieröle – Ester [2]

Mineralöl stellt bis heute die beste elektrische Isolierflüssigkeit für Transformatore dar. Die exzellenten elektrischen und dielektrischen Eigenschaften, gute Alterungsbeständigkeit, Viskosität und kostengünstige Produktion überwiegen den Nachteilen, wie Temperatur- und Feuchteabhängigkeit, geringer Flamm- und Brennpunkt und geringe relative Dielektrizitätskonstante. Leider ist Mineralöl im Falle einer Gehäuselecks eine Gefahr für das Grundwasser. Aus diesem Grund wurden synthetische Isolierflüssigkeiten auf Silikonölbasis und Esterflüssigkeiten entwickelt, die den strengen Anforderungen gerecht werden.

Ein Ersatz des Mineralöls stellen Esterflüssigkeiten dar. Tabelle 1 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften und die laut Norm erforderlichen Werte für Isolieröle. Die Eigenschaften von Ester sind der sehr hohe Flammpunkt von über 300 °C, die gute Umweltverträglichkeit, niedrige Giftigkeit, exzellente thermodynamische und gute dielektrische Eigenschaften, niedrige Feuchteabhängigkeit und gutes Teilentladungsverhalten. Esterflüssigkeiten finden in jeder Art von Transformatoren Anwendung: Mast- und Verteilnetztransformatore, Stufenschalter für Leistungstransformatore, weiter auch als Kühlflüssigkeit für Thyristoren von leistungselektronischen Bauteilen. Wegen des hohen

Brennpunktes, der geringen Toxizität und der biologischen Abbaubarkeit werden Esterflüssigkeiten für Transformatore in Wasserschutzgebieten und Ballungszentren eingesetzt.

Tabelle 1: Eigenschaften von Esterflüssigkeiten

Eigenschaft	Einheit	Erforderlicher Standard		MIDEL 7131	Shell Fluid 4600
Durchschlagspannung	kV	> 45	IEC 156	55	> 60
Verlustfaktor tan δ		$< 30.10^{-4}$	IEC 247	10.10^{-4}	10.10^{-4}
Pourpoint	°C	< -45	ISO 3016	-50	-54
Flammpunkt	°C	> 250	ISO 2592	257	265
Brennpunkt	°C	> 300	ISO 2719	310	
Kinetische Viskosität 40°C	mm^2/s	< 35	ISO 3104	33	29,5
Kinetische Viskosität -20°C	mm^2/s	< 3000	ISO 3104	1100	1400
Dichte ρ 20°C	kg/m^3	< 1,00	ISO 3675	0,98	0,965

3.3 Biologische Isolieröle – Rapsöl [2]

Eine weitere Entwicklung ist der Einsatz von biologischen Ölen anstatt mineralischen, zum Beispiel Öl aus der Rapspflanze. Analysen haben gezeigt, daß Rapsöl eine gute elektrische Isolierflüssigkeit ist, jedoch nicht alle DIN/VDE-Anforderungen erfüllt. Große Schwierigkeiten erwachsen durch die Alterung des Rapsöls. Ist das Öl Feuchte oder Luft ausgesetzt, so verringert sich die Langzeitbeständigkeit. Nur komplett entfeuchtet und in einer hermetischen Kapselung ist es als Alternative zu Mineralöl einsetzbar.

4. Produktionsverfahren für Wicklungen

4.1 Wicklungen aus VPI (Vakuum Pressure Impregnation) [3]

Die VPI Technologie kommt aus dem Elektromaschinenbau und wird auch zur Fertigung von Generatorstäben eingesetzt. Beim Verfahren der Vakuum Druck Imprägnation werden die fertig bewickelten Spulen in den Imprägnierkessel eingebracht und einem hochwertigen Epoxidharz unterworfen. Die Temperatur, der Druck und die Parameter des Harzes werden laufen kontrolliert, um eine porenfreie Durchtränkung zu gewährleisten. Im anschließenden Aushärtevorgang im Umluftofen wird der Produktionsprozeß abgeschlossen und die Wicklung erhält ausgezeichnete dielektrische und mechanische Eigenschaften sowie eine hervorragende Imprägnation gegen Feuchte und Schmutz.

4.2 Wicklungen aus VPE (Vakuum Pressure Encapsulated) [3]

Der VPE Fertigungsprozeß ist eine weitere Art der Spulenproduktion, um eine gute Beständigkeit gegen Feuchte zu erzielen. VPE imprägnierte Transformatoren werden für marine Anwendungen eingesetzt, wo die Feuchtebeständigkeit besonders wichtig ist.

Bei VPE Prozeß werden die Spulen mit vier Schichten von Silikonlack versiegelt und getrocknet (Siehe Abbildung 3). Wegen der spezifischen Verbundfestigkeit von Silikonlack ist die letzte aufgetragene Schichte besonders glatt und gibt somit einen hervorragenden Schutz gegen Umwelteinflüsse. Der Kern und die Spulenbefestigungen werden mit einer korrosionsfesten Dichtmasse überzogen. Durch das VPE Verfahren werden sehr gute dielektrische Eigenschaften erzielt und der Silikonlack verhindert den Alterungsprozeß.

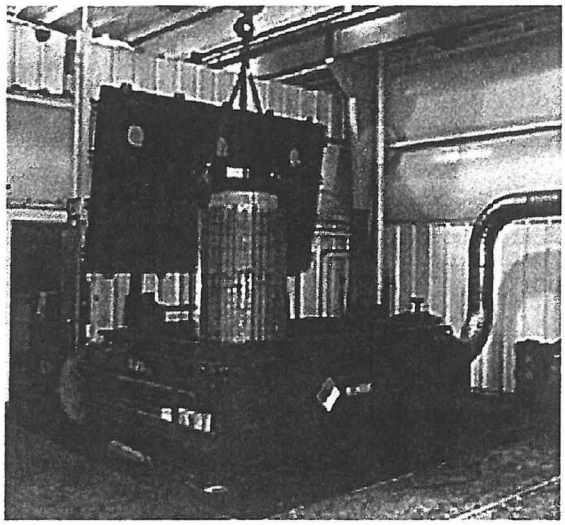


Abbildung 3: Versiegelung von Spulen mit Silikonlack beim VPE Verfahren [3]

Transformatoren mit VPE und VPI Wicklungen werden für Leistungen von 112 kVA bis zu 10 MVA, und einer Spannung bis zu 35 kV produziert. Die Kühlung kann mit Lüfter erfolgen, die mittels Temperaturmonitoring der Wicklungen geregelt sind.

5. Trockentransformatoren

5.1 Verteilnetztransformatoren mit Gießharzisolierung [4]

Die Anforderungen an die Transformatortechnik bezüglich Umweltschutz sind gestiegen. Obwohl Öltransformatoren im Mittelspannungsbereich eine sehr gute technische Lösung in elektrischer Hinsicht darstellen, ist ihr Einsatz in vielen Fällen nicht ideal oder führt zu hohen Brand- und Gewässerschutzauflagen. Die früher bei erhöhten Brandschutzanforderungen eingesetzten Askarel- Transformatoren wurden wegen der bekannten PCB- Problematik weitgehend ersetzt. Herkömmliche Trockentransformatoren stellen keine gleichwertige Alternative dar. Sie erfüllen nicht die gleichen elektrischen Anforderungen, sind nicht ausreichend widerstandsfähig gegen Luftfeuchtigkeit und aggressive Medien und haben zudem höhere Geräuschpegel. Bereits vor 25 Jahren wurde eine Wickeltechnik aufgegriffen, die zur Isolation und Umhüllung der Drahtlagen Gießharz und Glasrovings einsetzt, die auf modernen elektronisch gesteuerten Wickelmaschinen aufgebracht werden. Das Ergebnis sind vollkommen gießharzgekapselte Wicklungen, die durch die Glasfaserarmierung außerordentlich robust sind und den in DIN 42523 festgelegten Anforderungen entsprechen.

Je nach Anforderungen an den Trockentransformatoren unterscheidet man drei Kategorien: Umwelt/Environment (E), Klima/Climate (C), Feuer/Fire (F). Jede Kategorien ist in Klassen zwischen 0 und 2 eingestuft, wobei die jeweilige Klasse vom Hersteller mittels Tests nachgewiesen werden muß. Die Kategorie und Klasse ist am Typenschild der Transformatoren sichtbar zu machen. In Abbildung 1 ist ein Schnittbild dargestellt.

Der Epoxidharzformstoff wird mit Glasfaser-Rovings verstärkt, wodurch eine hervorragende Festigkeit erzielt wird. Moderne, neuartige Wickelverfahren auf elektronisch gesteuerten Wickelmaschinen gewährleisten die Gleichmäßigkeit der Glasrovingverteilung und die Präzision der Ablagespur. Unter- und Oberspannungswicklungen sind über Leisten kraftschlüssig zu einer kompakten Blockwicklung vereint.

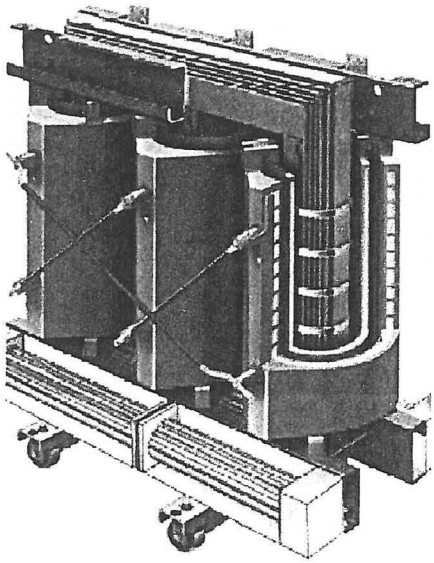


Abbildung 1: Schnittbild eines Gießharz Trockentransformators [5]

Für die Unterspannungswicklung werden Aluminium- oder Kupferband und als Windungsisolation Glasgewebe-Prepregs der thermischen Klasse F verwendet. Durch das Bandwicklungskonzept wird eine beträchtliche Reduzierung der axialen Kurzschlußkräfte erreicht. Zur Erhöhung des Füllfaktors werden die Unterspannungswicklungen für Transformatoren kleinerer Leistung als Draht-Lagenwicklungen ausgeführt.

Die Unterspannungswicklungen für höhere Betriebsspannungen als 1,1 kV werden wie Oberspannungswicklungen gefertigt. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Kühlung werden bei Bedarf axiale Kühlkanäle in die Unterspannungswicklung eingebaut. In einem weiteren Fertigungsgang werden die zylindrische Oberspannungswicklung direkt im Stoffschluß auf die Unterspannungswicklung gewickelt. Die Ausführung als Lagenwicklung sichert durch ihre lineare Stoßspannungsverteilung eine überragende Blitz-Stoßspannungsfestigkeit. Die runden oder bei größeren Querschnitten rechteckigen Leiter sind mit einer Isolierung der thermischen Klasse H isoliert. Die Isolierung der Wicklungsanlagen und die äußere Kapselung der Wicklungen bestehen aus glasfaserarmiertem Epoxidharzformstoff der thermischen Klasse F. Die einzelnen Kupferleiterlagen werden mit dem Wickelverfahren beschichtet. Nach Abschluß des Wickelvorgangs werden die Blockwicklungen in speziellen Härteöfen ausgehärtet.

Durch den hohen Glasfaseranteil von ca. 75 % und die zweckmäßige Kombination von Radial- und Kreuzverbänden, die im Drehbankverfahren aufgebracht werden, entsteht ein außerordentlich robuster Wicklungsblock, dessen mechanische Festigkeit sowohl in radialer als auch in axialer Richtung sehr hoch ist. Den Wicklungen wird dadurch ein hohes Maß an Kurzschlußfestigkeit und Temperaturschockfestigkeit verliehen. Das Entstehen von Rissen wird über die gesamte Lebensdauer des Transformators zuverlässig vermieden. Dies ist auch unter extremen Betriebssituationen, wie z.B. tiefe Umgebungstemperaturen oder plötzliche Spitzenüberlasten gewährleistet. In die Oberspannungswicklungen können ein oder mehrere Kühlkanäle eingebaut werden, so daß Transformatoren höchster Leistung (z.B. 20 MVA) in selbstkühlender Ausführung (Kühlart AN) gefertigt werden können.

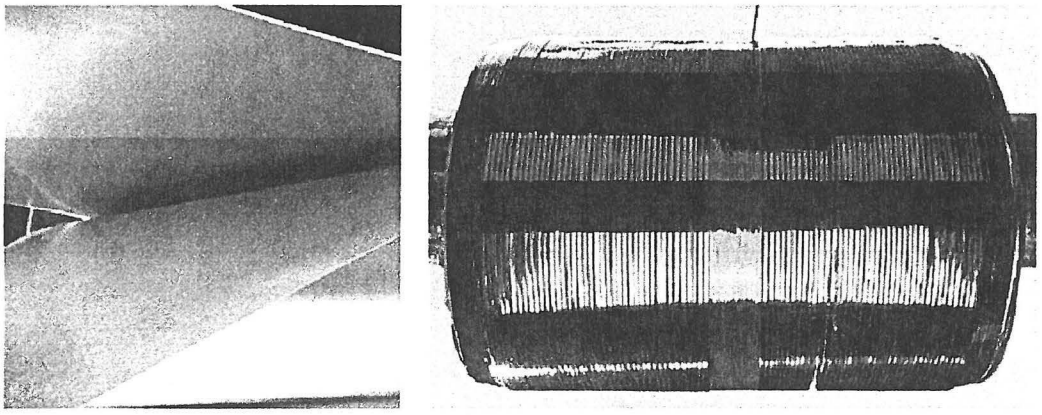


Abbildung 2: Unterspannungs-Kupferbandwicklung mit Glasgewebe-Prepreg (links)
Oberspannungs-Lagenwicklung (rechts) [4]

Die aus der Glasrovingwickeltechnik resultierende außerordentliche mechanische Festigkeit der Feststoffisolation ermöglicht die Herstellung solch großer Wicklungen in einem Stück. Durch die Kapselung mit glasfaserverstärktem Epoxidharzformstoff werden die Wicklungen zuverlässig gegen mechanische und chemische Einwirkungen geschützt, sind unempfindlich gegen Feuchtigkeit und praktisch wartungsfrei. Da zur Fertigung des Gießharztransformators keine Formen benötigt werden, ist eine freizügige Wicklungsauslegung unter Berücksichtigung spezifischer Kundenanforderungen möglich. Die glatten Oberflächen der Blockwicklungen vermindern die Ablagerung von Staub.

Gießharztransformatoren werden für Spannungen bis zu 36 kV und Leistungen bis 2500 kVA gefertigt. Je nach Anforderungen werden die Trockentransformatoren mit Lüftern ausgestattet, wodurch die Leistungsabgabe um bis zu 40 % gesteigert werden kann.

5.2 Leistungstransformatoren mit Kabelwicklungen [6]

Seit der Entwicklung der Kabelwicklung für elektrische Maschinen hat diese Technologie nun auch Einzug in den Transformatorenbau erlangt. Der sogenannte Dryformer ist ein ölfreier Leistungstransformator, dessen Wicklung aus VPE isolierten Mittelspannungskabeln besteht. Durch den radialhomogenen Aufbau der Leiter liegt im Gegensatz zu konventionellen Technik eine homogene Feldstärkeverteilung in der Wicklung vor (siehe Abbildung 4). Zur Vermeidung von Wirbelstromverlusten wurden die Leiter verröbelt, im Wickelkopfbereich waren aufwendige Maßnahmen notwendig, um das elektrische Feld zu steuern und Teilentladungen zu verhindern.

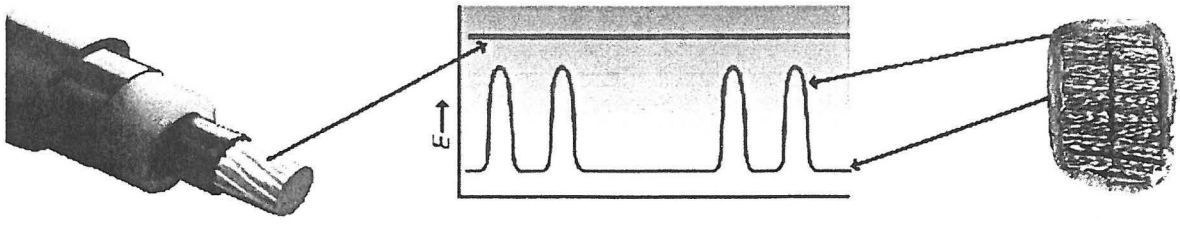


Abbildung 4: Feldverteilung einer Kabelwicklung und eines konventionellen Leiters [6]

Eben durch dieses radialhomogene Feld sind die einzelnen Wicklungen bis zu einer Feldstärke von 15 kV/mm beanspruchbar, herkömmliche Öl/Zellulose-Materialien mit

rechteckigem Querschnitt lassen diese Felder nicht zu. Das Kabel besitzt eine äußere halbleitende Schichte, die sich auf Erdpotential befindet, wodurch sich das elektrische Feld vollständig auf das Kabelinnere beschränkt. Neben der Verhinderung von Teil- und Glimmentladungen stellt diese Maßnahme auch einen Sicherheitsfaktor für das Personal dar.

Die elektrische und mechanische Auslegung herkömmlicher Leistungstransformatoren ist aufwendig, weil elektrische und magnetische Felder, Temperaturen und mechanische Kräfte, die sich z.T. gegenseitig beeinflussen, berücksichtigt werden müssen. Beim Dryformer können Parameter wie z.B. der Abstand zwischen den einzelnen Wicklungen sowie zwischen den Wicklungen und geerdeten Teilen unabhängig voneinander behandelt werden.

Die induzierte Spannung nimmt entlang der Wicklung kontinuierlich zu. Das Kabel unterliegt daher unterschiedlichen elektrischen Beanspruchungen. In gleichem Maß ist auch eine stärkere Isolierung erforderlich, bzw. für die ersten Wicklungen kann ein dünneres Kabel eingesetzt werden, wodurch sich eine bessere Ausnutzung des Schichtkernvolumens ergibt.

Ein wesentliches Kriterium für den Betrieb bzw. die Auslastung von Transformatoren ist die Erwärmung bzw. Kühlung der Wicklung. Bei konventionellen Transformatoren ist die Öltemperatur meßbar, Hot Spots können nicht erfaßt werden. Die Wicklungstemperatur eines Dryformers kann direkt gemessen werden, wodurch dieser auch kontrolliert bis zu einer Temperatur von 70 °C überlastet werden kann. Kern und Wicklung sind prinzipiell mit zwei redundant betriebenen Lüfter fremdbelüftet.

Der Kern ist wie bei einem konventionelle Transformator aus geschichtetem kornorientierten Blech zusammengebaut. Durch die offene Bauweise, der Aktivteil ist nicht in einem ölgefüllten Tank eingebaut, ist ein Korrosionsanstrich erforderlich. Die Verarbeitung der Wicklung gestaltet sich wesentlich einfacher, die aufwendige Isolierung mit Zellulosebändern entfällt. Abbildung 5 zeigt einen Dryformer mit Kabelwicklung und Aktivteil, die Lüfter sind im oberen Bereich an der Hinterseite erkennbar angebracht.

Da für die Kühlung und Isolierung kein Öl verwendet wird, eignet sich der Dryformer besonders für den Einsatz in umweltsensiblen Gebieten, eine Ölgrube wird überflüssig und die Brandschutzanlage kann einfacher ausfallen. Er kann näher an den Lastknotenpunkten aufgestellt werden, wodurch eine bessere Verlustbilanz bei der Energieübertragung vorzuweisen ist.

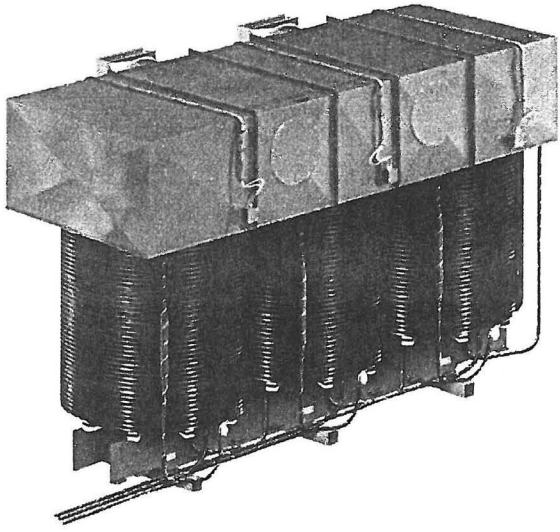


Abbildung 5: Trockentransformator Typ Dryformer [6]

Weil der Dryformer aus wenigen Komponenten besteht, ist er im Vergleich zu konventionellen Transformatoren weniger wartungsintensiv. Durch den Wegfall des Öls ist eine einfachere und schnellere Aufstellung möglich.

Die Technologie der Kabelwicklung ist noch wenige Jahre jung und kann deshalb keine Langzeiterfahrung aufweisen. Es ist zwar die Lebensdauer und das Betriebsverhalten der einzelnen Komponenten bekannt, jedoch kann deren Zusammenwirken nicht auf die technische Lebensdauer von Elektromaschinen, die bei über vierzig Jahren liegt, bemessen werden, beispielsweise sind noch keine Zusammenhänge bekannt, um der thermischen Alterung entgegenwirken zu können. Um mit der konventionellen Technologie gleichzuziehen ist noch sehr viel Ingenieursarbeit zu leisten, so ist im speziellen ein ölfreier Stufenschalter zu entwickeln. Die ersten Dryformer wurden ohne Stufenschalter ausgeführt und gingen 1999 in schwedischen Energieversorgungsunternehmen ans Netz. Ein kanadisches Elektrizitätsunternehmen in Vancouver hat zwei Dryformer mit einer Leistung von 42 MVA und einer Spannung von 64/25 kV in Auftrag gegeben, diese sollen im Oktober 2002 ans Netz gehen. Dryformer werden für einer Primärspannung von 36 bis 145 kV und Nennleistungen bis 150 MVA gebaut.

6. Supraleitende Transformatoren

Seit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL) im Jahre 1986 wurde die Produktion von HTSL-Drähte so weit entwickelt, daß diese in Wicklungen eingesetzt werden können. Mit flüssigen Stickstoff (LN_2) als Kühl- und Isoliermedium rückt die Tieftemperaturtechnologie einen Schritt in Richtung kommerzieller Anwendungen. Es stellt sich die Frage, wozu ein Betriebsmittel, das heute mit einem Wirkungsgrad von über 99 % hergestellt wird, durch eine neue und derzeit noch teurere Technologie ersetzt werden soll. Die Antwort ist darin zu finden, als ein sinnvoller Einsatz nur in der Reduktion des Gewichtes bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistung bestehen kann, wie es beispielsweise Traktionstransformatoren erfordern.

Ein supraleitender Transformator ist prinzipiell wie ein konventioneller Transformator aufgebaut, der Kern besteht ebenfalls aus kornorientiertem Blech (siehe Abbildung 7). Die Kupferwicklung wird durch eine Wicklung aus supraleitenden Filamentleitern ersetzt. Das Kühl- und Isoliermedium ist flüssiger Stickstoff, weshalb der Tank durch einen Kryostaten ersetzt wird. Vom Kühlprinzip kommen zwei Ausführungen zur Anwendung: Wicklung und Kern im Kryostat (Kalter Kern) oder nur die Wicklungen befindet sich im LN_2 (Warmer Kern). Die Ausführung Kalter Kern ist nur bei kleineren Leistungen sinnvoll, bei größeren Bauformen ist die Wicklung vom Kern zu separieren.

Aufgrund der höheren Stromtragfähigkeit von HTSL-Drähten sind wesentlich kleinere Leiterquerschnitte erforderlich. Für die Übertragung der selben Leistung ist daher wesentlich weniger Leitermaterial erforderlich, die Abmessungen und das Gewicht der Wicklungen werden kleiner. Im supraleitenden Zustand sind praktisch keine Gleichstromverluste zu verzeichnen, Wechselstromverluste sind jedoch vorhanden. Betrachtet man die gesamte Verlustbilanz eines supraleitenden Transformators, so ist auch Energie für die Kühlung aufzubringen, der mäßige Wirkungsgrad der Kühlanlage zu betrachten und die Verluste in den Stromzuführungen mit einzubeziehen. Für das Gesamtsystem ergibt sich ein Wirkungsgrad, der oberhalb von 99 % liegt. Stellt man den Vergleich mit einem konventionellen Leistungstransformator mit 40 MVA an, so werden einerseits die Verluste auf die Hälfte reduziert und andererseits eine wesentliche Reduktion der Masse und des Volumens erreicht.

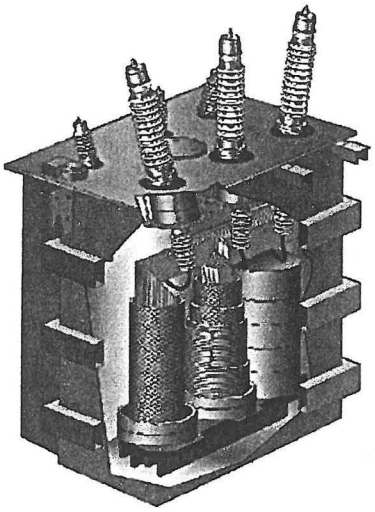


Abbildung 7: Schnittbild eins supraleitenden Transformators mit kaltem Kern [7]

Für Traktionstransformatoren gib es ein wesentliches Kriterium, der sehr geringe Platzbedarf für den Einsatz im Unterflurbereich der Zugmaschinen. Der zu Verfügung stehende Raum ist sehr begrenzt und damit die Abmessungen und Volumina sehr klein. Auch das Gewicht ist möglichst niedrig zu halten, um die Masse des gesamten Systems zu optimieren, wodurch die Beschleunigung und der Verschleiß der Züge verbessert wird. Durch diese Anforderungen sind die Materialien im Vergleich zu Verteil- und Leistungstransformatoren wesentlich stärker ausgenutzt, die Stromdichten in den Wicklungen und der magnetische Fluß im Kern werden bis an die technische Grenze dimensioniert. Dadurch erhöhen sich die Verluste und der Wirkungsgrad bleibt relativ gering, ein moderner Traktionstransformator weist einen Wirkungsgrad von knapp oberhalb 90 % auf. An den Gesamtverlusten eines Zugsystems ist der Transformator mit bis zu 50 % beteiligt, sein Gewicht beträgt ca. 10 % von der Masse der Zugmaschine.

Tabelle 2: Eckdaten von verschiedenen Bahntransformatoren im Vergleich: [8]

	Kupfer	HTSL-Design	HTSL/Cu
Regionalzug 1 100 MVA			
Gesamtverluste	92 kW	7,8 kW	9 %
Gesamtgewicht	4 800 kg	2 200 kg	46 %
Volumen Aktivteil	690 dm³	360 dm³	51 %
Hochgeschwindigkeitszug (ICE) 4 600 MVA			
Gesamtverluste 16 2/3 Hz	360 kW	19 kW	5 %
Gesamtverluste 50 Hz	290 kW	18 kW	6 %
Gesamtgewicht	9 300 kg	5 400 kg	58 %
Volumen Aktivteil	1 600 dm³	1 300 dm³	81 %
Güterzug 7 500 MVA			
Gesamtverluste	5492 kW	26 kW	5 %
Gesamtgewicht	14 500 kg	8 700 kg	60 %
Volumen Aktivteil	2 650 dm³	2 330 dm³	88 %

Die Vorteile eines supraleitenden Transformators sind die höhere Stromtragfähigkeit der HTSL-Drähte, wodurch den Anforderungen im Bahnstrombereich ideal nachgekommen werden kann. Es wurden bereits Prototypen mit einer Leistung von 1000 kVA entwickelt und gebaut. Die Verluste lagen bei 5 %, der Wirkungsgrad bei 99 % und eine Gewichtsreduktion um 40 % konnte erreicht werden. Neben den genannten Vorteilen ist durch die Gewichtsreduktion auch eine Einsparung an elektrischer Energie, weniger CO_2-Ausstoß und eine bessere Umweltverträglichkeit gegeben.

Ein Einsatz eines Prototypen in einem Hochgeschwindigkeitszug (ICE 3) ist für das Jahr 2002 geplant. Die Kosten für einen supraleitenden Transformator liegen zwar noch wesentlich über denen eines konventionellen (Faktor 1:2 bis 1:5), jedoch ist bei Berücksichtigung des geringeren Energiebedarfes eine Amortisationszeit von ungefähr zwei Jahren gegeben.

7. Monitoring

Aufgrund der Deregulierung der Elektrizitätswirtschaft gewinnt die Zustandsbeurteilung der Isolationssysteme zunehmend an Bedeutung, da im liberalisierten Strommarkt ein enormer Kostendruck auf die Netzbetreiber besteht und daher der Aufwand für Betrieb, Instandhaltung und Investitionen bei gleichbleibender Versorgungsqualität einem sinnvollen Kosten-Nutzen-Verhältnis angepaßt werden muß. Um diesen Anforderungen nachzukommen ist eine Zustandsbewertung des Systems Transformator durchzuführen, und sämtliche Komponenten sind einer Risikoabschätzung zu unterwerfen.

Das Ausfallsrisiko von elektrischen Betriebsmitteln steigt gerade gegen Ende ihrer Lebensdauer. Fällt ein Transformator unvorhergesehen aus, entstehen sofort hohe Kosten – nicht nur durch den defekten Transformator, sondern vor allem durch den Ausfall der Verfügbarkeit der elektrischen Energie. Ein stark eingeschränkten Netzbetrieb verursacht damit hohe finanzielle Verluste. So trägt eine permanente Überwachung von Leistungstransformatoren dazu bei, die elektrische Energieversorgung zu sichern, Instandhaltungsmaßnahmen besser zu planen und damit einen profitablen Einsatz von Betriebsmitteln aufrechtzuerhalten. Ebenso große Investitionen können besser vorhergesehen und optimal geplant werden.

Für einige Parameter gibt es jedoch keine Meßmethoden, die technisch wirtschaftlich vernünftig anwendbar wären. Beispielsweise ist für die Beurteilung des Isolationszustandes die Teilentladungsaktivität eine wichtige Kenngröße. Die konventionelle Teilentladungsmessung ist an Leistungstransformatoren im Freiluftbereich nicht in genügender Empfindlichkeit anwendbar. Akustische und optische Systeme können derzeit noch nicht für das Monitoring an Transformatoren eingesetzt werden. Als Parameter für das Auftreten von Teilentladungen wird die bekannte Gas in Öl Analyse verwendet.

Die Zukunft liegt hier eindeutig in der Entwicklung von Sensoren und deren Implementierung in Meßsysteme. Einzelne Monitoringsysteme werden bereits mit komfortabeln Softwarepaketen angeboten, wobei Meßwerte wie Spannungen, Ströme, Kessel- und Öltemperatur, Feuchte- und Wasserstoffgehalt in Öl graphisch dargestellt werden.

8. Zusammenfassung

Neben dem konventionellen Aufbau eines Transformators aus Zellulose und Mineralöl sind verschiedene Isoliersysteme aus Kunststoffen eine Alternative geworden, die ohne Öl ihr Auslangen finden, speziell unter Beachtung strenger Umweltbedingungen. Diese Trockentransformatoren kommen je nach Leistung ohne Kühllüfter aus, finden jedoch vor allem als Verteilnetztransformator ihre Verwendung. Das thermische Betriebsverhalten kann durch Sensoren, die direkt an der Wicklung angebracht sind, sehr gut beobachtet und dadurch kontrolliert werden. Die Palette der eingesetzten Kunststoffe reicht von Gießharzen bis hin zu Silikonen. Eine Sonderform des flüssiggekühlten Transformators stellt der supraleitende Transformator dar, in dem flüssiger Stickstoff als Isoliermedium eingesetzt wird. Durch die Entwicklung von Monitoringsystemen kann das Betriebsverhalten besser beobachtet, die Überlastung des Transformator vermieden und Instandhaltungsmaßnahmen exakter geplant werden.

9. Schrifttum

[1] Transformerboard II, Fa. Weidmann, CH-8640 Rapperswil, 1987
[2] Muhr, Sumereder, Woschitz, Entwicklungen in der Isolierstofftechnik für HS-Anwendungen, Haefely Symposium 2000, Stuttgart
[3] ABB Produktinformation VPE und VPI, www.abb.com
[4] ABB Produktinformation Gießharztransformator, www.abb.com
[5] Siemens Produktinformation Gießharztransformator, www.siemens.de
[6] Andersson, Forsmark, Jaksts, ABB Technik 3/2000, Seite 59-64
[7] American Superconductor Produktinformation 1999, www.amsuper.com
[8] Knorr, Schlosser, Supraleitende Transformatoren und ihre Einsatzgebiete, Siemens AG Nürnberg, VDEW Fachtagung „Supraleitung" 13. und 14. 2. 2001, Darmstadt

Anschrift der Autoren

INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ANLAGEN
UND HOCHSPANNUNGSTECHNIK

Technische Universität Graz
Erzherzog-Johann-Universität
Abt. für Hochspannungstechnik
Inffeldgasse 18
A-8010 Graz
Tel.: +43/316/873-74 01
Fax: +43/316/873-79 00

TUG

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael MUHR	muhr@hspt.tu-graz.ac.at	DW 74 00
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Christof SUMEREDER	sumereder@hspt.tu-graz.ac.at	DW 74 11
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf WOSCHITZ	woschitz@hspt.tu-graz.ac.at	DW 74 10