Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 9

Artikel: Entwicklungsschwerpunkte bei Verteiltransformatoren

Autor: Kreuzer, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904600

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Entwicklungsschwerpunkte bei Verteiltransformatoren

J. Kreuzer

Nach einem kurzen Rückblick folgt eine Betrachtung der Meilensteine im Material- und Technologiesektor, welche auch die konstruktive Weiterentwicklung einschliesst. Den Kernteil bilden die zwei wichtigsten Grundeigenschaften eines zuverlässigen Transformators: die Spannungs- und die Kurzschlussfestigkeit. Speziell zur letzteren werden anhand von Prototypen neuzeitliche Messmethoden diskutiert, die eine bessere Beurteilung dynamischer Verformungen von aussen her gestatten. Den Abschluss bildet ein Ausblick auf voraussichtliche Entwicklungsrichtungen.

L'introduction donne un aperçu du développement dans le passé. Suivent des considérations sur les faits saillants dans les secteurs des matières premières et de la technologie, y compris le développement dans le domaine de la construction. Le chapitre le plus important traite des deux caractéristiques essentielles d'un transformateur fiable, à savoir la tenue diélectrique et la tenue aux courts-circuits. Concernant cette dernière, de nouvelles méthodes de mesure, expérimentées sur des prototypes, sont discutées. Elles permettent de mieux saisir des déformations dynamiques sans démontage du transformateur. L'article se termine par un pronostic sur les développements prévisibles.

Adresse des Autors

Josef Kreuzer, Dr. sc. techn., BBC-Sécheron S.A., 1211 Genève 21.

1. Einleitung

Verteiltransformatoren gibt es seit der ersten Entwicklungszeit des Transformatorenbaues; sie haben damit ihren hundertjährigen Bestand bereits hinter sich [1]. Bei einem derart alten Produkt sollte man meinen, es sei nun voll ausgereift, und nennenswerte Neuentwicklungen wären kaum mehr möglich. Dem ist aber nicht so.

Wenn man die Entwicklung zurückverfolgt, ist augenscheinlich, dass sich am physikalischen Grundprinzip nichts Bahnbrechendes verändert hat. Es haben sich die Grundbauformen herauskristallisiert, wie Kern- und Manteltypen, Einphasen- und Drehstromeinheiten sowie verschiedene Spezialausführungen. Die grossen Fortschritte lagen und liegen weiterhin im Gebiet der Technologie; sie laufen parallel zur Entwicklung neuer Materialen und zu deren optimalen Anwendung. Dies gilt sowohl für den magnetischen als auch für den elektrischen Kreis, aber hauptsächlich hinsichtlich der Erschliessung neuer oder wirtschaftlicherer Fertigungsmethoden.

In den letzten Jahren hat auch die Computertechnik ihren Teil beigesteuert; ebenso darf die moderne Qualitätssicherung nicht vergessen werden. Schliesslich gestattet die ständige Verfeinerung der Testmethoden einen immer tieferen Einblick in die wechselseitigen Abhängigkeiten der einzelnen Ausnutzungsgrade. Ihre koordinierte Abstimmung ist, verbunden mit einem optimalen Wirkungsgrad, die wichtigste Voraussetzung, um mit der heutigen Technik Schritt halten zu können.

2. Meilensteine auf dem Materialgebiet

2.1 Magnetmaterialien

Schon frühzeitig verwendete man bei den lamellierten Eisenkernen von Transformatoren die besten Blechqualitäten, welche zur Verfügung standen. Erkannte man doch bereits damals die grosse Bedeutung der Transformatorverluste, da die verteilte Energie mehrfach transformiert wird und die Eisenverluste auf jeder Zwischenstufe unabhängig von der Belastung dauernd vorhanden sind. Von den warmgewalzten Blechen führte der Weg zu den kaltgewalzten, kornorientierten Texturblechen. Gleichzeitig gestattete die hauchdünne, beidseitige Carlite-Isolation eine Steigerung des Füllfaktors von etwa 0,9 auf 0,97. Geeignete Schnittformen mussten gefunden werden, um die Blechvorzugsrichtung optimal zu nutzen.

Die zulässige Induktionserhöhung von 1,55 T auf 1,75 T bei Texturblechen erbrachte mehr als einen Typensprung in der Leistung, wobei der Wirkungsgrad sogar noch anstieg. Geringere Verluste erfordern weniger Kühlaufwand, so dass sich auch von dieser Seite eine Einsparung ergab. Mit der Verbesserung der magnetischen Blecheigenschaften geht zwangsläufig eine Reduktion der Vibrations- und Geräuschintensität einher; dies kommt den heutigen Umweltbestrebungen sehr entgegen.

Glaubte man sich vor einigen Jahren im Magnetsektor bereits am Ende der Entwicklungsmöglichkeiten, so war dies eine Täuschung. Japan bringt neuerdings die HiB-Bleche und die USA das sehr dünne amorphe Material auf den Markt. Dank Wettbewerb geht die Entwicklung weiter.

2.2 Wicklung

Auch beim Wicklungsmaterial hat sich einiges getan. Betrachtet man die verschiedenen Leiterisolationsarten der Vergangenheit, so ist eindeutig das Kabelpapier zum Favorit geworden. Daneben kam nach anfänglichen Rückschlägen hinsichtlich der Ölbeständigkeit die Leiter-Lackisolation

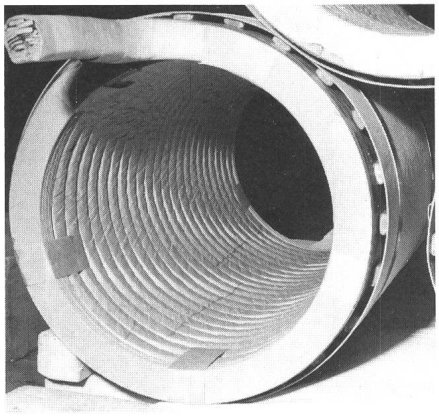

Fig. 1 Unterspannungs-Drilleiter-Wicklung
Minimaler Innendurchmesser heute etwa 180 mm

immer stärker ins Rennen und mit ihr die maschinell gefertigten Drilleiter. Diese finden in besonders flexibler Form dann bei abnormalen Verteil- oder Spezialtransformatoren auf der Unterspannungsseite Anwendung, wenn der Einsatz von Bandwicklungen nicht möglich oder bei Einzelausführungen unwirtschaftlich ist. Figur 1 zeigt eine Unterspannungs-Drilleiter-Wicklung mit einem Innendurchmesser von 220 mm.

2.3 Isolation

Bei den Haupt- und Jochisolationen wurde Bakelit auf breiter Front von Transformerboard verdrängt [2]. Letzterer besteht aus reiner, hochkomprimierter Zellulose und ist dadurch dem Kabelpapier elektrisch äquivalent. Das thermostabilisierte Papier mit etwa 10 °C höheren Temperaturlimiten ist wegen der Umweltbelastung bei seiner Erzeugung praktisch vom Markt verschwunden.

3. Technologische Fortschritte

3.1 Magnetischer Kreis

Hochwertige Bleche sind empfindlich; eine schonende Behandlung ist oberstes Gebot. Die Anlieferung der Magnetbleche erfolgt in Rollen von 800...1000 mm Breite. Mit modernen Automaten werden grobe Blechmisshandlungen beim Längs- und Querschneiden vermieden. Die inneren Spannungen und Blechrandwellungen zufolge der Schnittvorgänge können durch nachträgliches Glühen bei etwa 840° C im Durchlaufofen ohne Schutzgas wieder ausgeglichen werden. Das Glühen erbringt nicht nur eine Absenkung der Eisenverluste, sondern auch eine Geräuschminderung; ausserdem brennen dabei die restlichen Grate weg. Ein weiterer Vorteil ist die künstliche Kantenoxidation, wodurch die Schnittflächen rostunempfindlich werden.

Die präzise Einhaltung minimaler Mass- und Winkeltoleranzen beim Blechschneiden ermöglicht die Erzielung kleinster Verschachtelungs-Luftspalte bei der anschliessenden Kernfertigung. Besonders gravierend sind Winkelfehler bei 45°-Verzapfungen, wodurch die Stosskanten «klaffen» und die Luftspalte über die Blechbreite hin stark variieren können. Bedenkt man, dass 1 mm Luftweg etwa 6000 bis 8000 mm Eisenweg im Texturblech entspricht, so liegen die schädlichen Auswirkungen auf der Hand. Der magnetische Fluss wird sich nicht nur sehr ungleich über die Blechbreite b verteilen, sondern auch bereits in den geradlinigen Blechbahnen schräg zur Walzrichtung verlaufen. Bei Verteiltransformatoren sind die Auswirkungen zudem viel kritischer als bei grossen Einheiten, weil das Längenverhältnis Luftspalt zu Eisen $l_o : l_{Fe}$ mit der Baugrösse abnimmt.

Figur 2 zeigt die wichtigsten magnetischen Grössen in einem Polardiagramm, abhängig von den Winkeln zur Walzrichtung (WR) für zwei stark unterschiedliche Qualitäten kornorientierter Bleche (linker und rechter Figurteil); die unter verschiedenen Winkeln geschnittenen 50-cm-Epsteinproben wurden statisch und dynamisch, ungeglüht und geglüht gemessen. Besonders eindrucksvoll sind die sog. Löffel- oder Propellerkurven der Permeabilität $\mu = \mu(\psi)$, zeigen sie doch am deutlichsten deren starke Richtungsabhängigkeit vom Winkel ψ gegen die Walzrichtung.

Die räumliche Verteilung der Induktion $B = \mu \cdot H$ und der magnetischen Erregung H erstrebt einen minimalen Gesamtaufwand an Blindenergie:

$$\iint (B \cdot H)\, \mathrm{d}A\, \mathrm{d}l \rightarrow \min$$

Diese wird dabei extrem von der stark ψ-abhängigen Permeabilität beeinflusst.

Die wesentlich kleinere Wirkenergie integriert sich als sekundäre Ortsfunktion aus der spezifischen Verlustziffer $v = v(\mathrm{d}A, \mathrm{d}l, \mathrm{d}l, \psi)$, welche glücklicherweise bedeutend schwächer vom Winkel ψ abhängt. Die Koerzitivkraft H_c ist charakteristisch für die Hysteresisschleifenbreite und damit für deren Verlustfläche; deshalb sind die beiden Kurven $H_c = H_c(\psi)$ und $v = v(\psi)$ auch ähnlich. Ebenso weisen die Remanenz $B_r = B_r(\psi)$ und die Löffelkurve $\mu = \mu(\psi)$ eine gewisse Ähnlichkeit auf. Der Einfluss der Blechqualität und des Glühens auf diese richtungsabhängigen Grössen ist aus dem Polardiagramm gut zu erkennen [3].

Aber selbst wenn der Luftspalt l_o konstant sehr klein ist ($\lim l_o \rightarrow 0$), ist die «Leistungsstruktur» im Inneren der Eisenkerne zufolge der unterschiedlichen magnetischen Längen $l_{Fe} = l_{Fe}(b)$ in Funktion der Blechbreite oberwellenbehaftet. Hauptsächlich werden jedoch die gesamten Eisenverluste durch die Querflüsse zur Walzrichtung verschlechtert, da sich die Oberwellenleistungen der einzelnen Flussröhren, über die Blechbreite integriert, gegenseitig aufheben, solange der Gesamtfluss $\Phi = \hat{\Phi} \cdot \sin(\omega t) = \int B \cdot \mathrm{d}A$, integriert über den Querschnitt A, die Sinusform beibehält [4].

3.2 Wicklung

Die Wicklung ist der empfindlichste Teil des Transformators; dessen Lebenserwartung hängt davon am stärksten ab. Ein hochwertiges Leitermaterial schafft zusammen mit seiner Isolation die Grundlage. Mangelhafte Leiterradien oder gar Kanten sind speziell bei lackisoliertem Façonkupfer in Oberspannungswicklungen nicht ungefährlich.

Ein zweiter wichtiger Punkt ist der Wickelvorgang. Moderne Wickelbänke brachten hier den Hauptfortschritt, sowohl in bezug auf Zeit als auch auf Qualität.

Das dritte Glied bildet schliesslich eine exakte Stabilisierung des Wicklungsblockes sowie eine gute Aufbereitung des ganzen Transformators einschliesslich der Ölimprägnierung. Bis zu einer Nennleistung von 1000 kVA haben moderne Verteiltransformatoren in der Schweiz keinen Ölkonservator [5].

4. Konstruktive Weiterentwicklung

4.1 Eisenkerne

Wie erwähnt, erforderten die neuartigen Bleche zufolge ihrer starken Vorzugsrichtung ein weitgehendes Umdenken bei den Kernkonstruktionen. Möglichst alle Flussumlenkungen

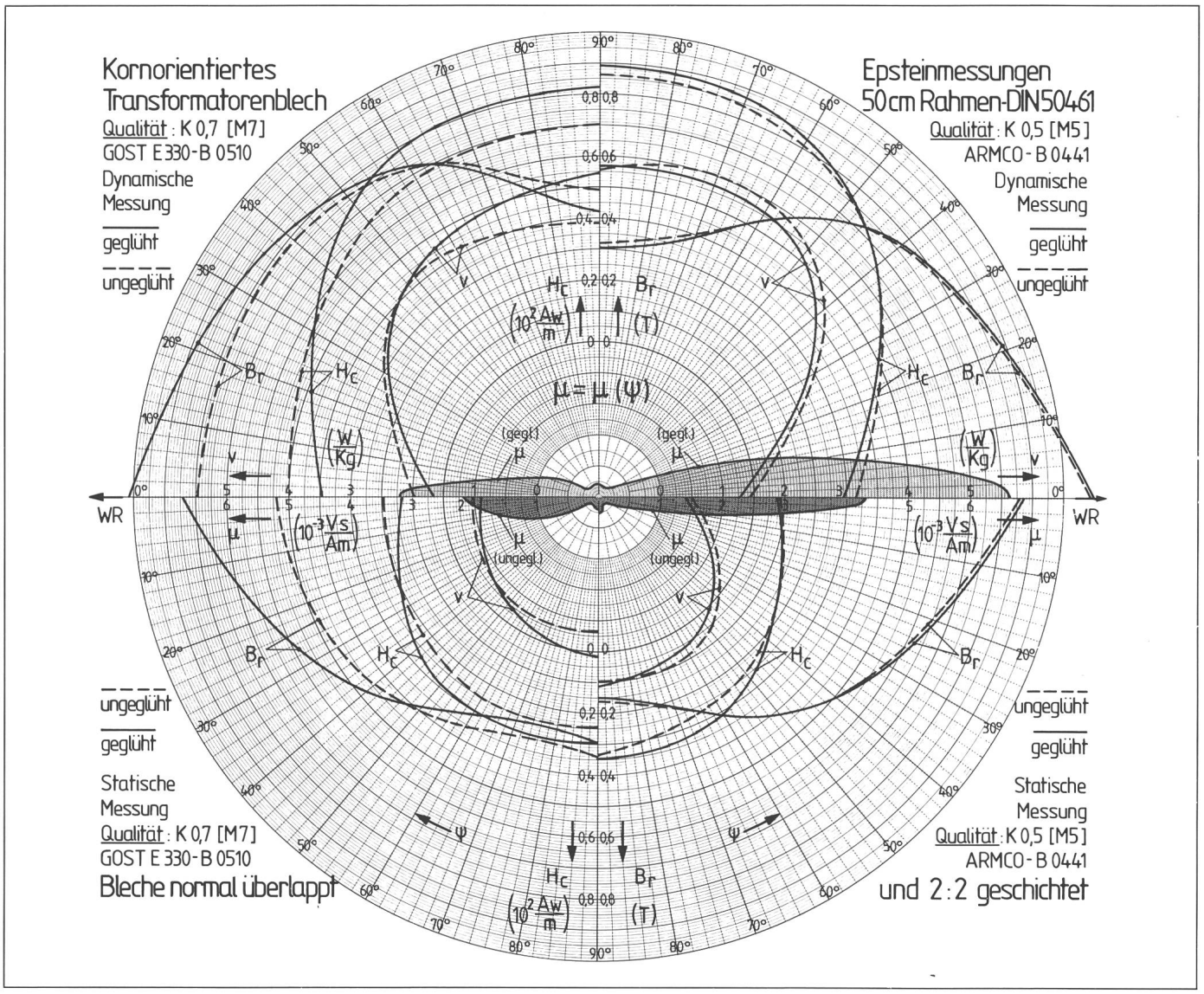

Fig. 2 Polardiagramm zweier kornorientierter Blechqualitäten [M7] und [M5]

u Permeabilität (Löffel- oder Propellerkurven)
H_c Koerzitivkraft
B_r Remanenz
v Spezifische Verlustziffer
WR Walzrichtung

Der Fortschritt von der Qualität [M7] zu [M5] entspricht etwa demjenigen von Qualität [M5] zu [HiB-0/S]

(vertikal/horizontal) sollten unter 45° erfolgen. Bei Drehstromkernen eignen sich im Mittelschenkel oben und unten am besten sog. Dachschnitte, die bis zu den Verkettungspunkten in Jochmitte reichen. Bolzenlöcher sind wegen der Flussablenkung bei Texturblechen verpönt.

4.2 Wicklungen

Die Unterspannungs-(US-)Wicklung wird heute grösstenteils aus Kupferband hergestellt, das sich über die ganze Spulenhöhe erstreckt. Die überstehenden Lagenisolationen bilden mit den Endringen die stirnseitigen Spulenabschlüsse. Zur mechanischen Verfestigung wird die ganze Wicklung noch mit Kunstharz imprägniert, nachdem die Hauptisolation montiert worden ist.

Die Oberspannungs-(OS-)Wicklung bildet man heute zumeist als Lagenwicklung aus, und zwar mit Lackrunddraht oder Façonkupfer; sie wird direkt auf die US-Wicklung gewickelt. Die zumeist konische Lagenisolation besteht aus Kabelpapier.

Früher fehlte bei getrennter Wicklungsfertigung nicht nur der «Wickelzug» auf der Hauptisolation, sondern es war auch noch eine axiale Asymmetrie bei der Wicklungsmontage möglich. Dies verursachte dann im Kurzschlussfall zusätzliche axiale Schubkräfte, welche von den Wicklungsabstützungen aufgefangen werden mussten.

4.3 Abstützkonstruktion

Zunächst ist eine solide radiale Verkeilung zwischen Eisenkern und Wicklungsblock notwendig, denn hier treten die häufigsten Kurzschlussdefekte auf. Meistens werden heutzutage Stahltraversen zur axialen Wicklungsvorpressung vermieden, da sie die Schaltung komplizierter gestalten und ausserdem Zusatzverluste verursachen. Die Jochbalken müssen ferner den Eisenkern möglichst homogen mitpressen.

Auf eine betriebssichere Schaltleitungsverlegung beider Wicklungen ist ganz besonderes Augenmerk zu legen, denn dort gab es erfahrungsgemäss den Haupteil der Spannungsdefekte.

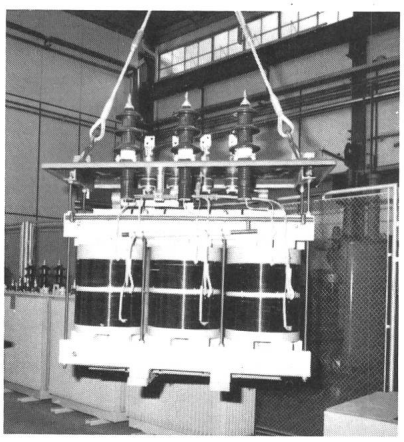

Fig. 3 Aktivteil eines Verteiltransformators von der OS-Seite

Figur 3 zeigt den Aktivteil eines Verteiltransformators heutiger Ausführung von der Oberspannungsseite.

5. Charakteristische Eigenschaften

Es sollen hier nicht die allgemeinen Eigenschaften (betriebliche, thermische, akustische und schwingungsmechanische) behandelt werden, sondern speziell die zwei charakteristischen Grundeigenschaften I und II, welche die Zuverlässigkeit eines Transformators am entscheidendsten beeinflussen; die Stossspannungs- und die Kurzschlussfestigkeit.

5.1 Wechselspannungsfestigkeit

Der Nachweis der Wechselspannungsfestigkeit erfolgt durch die Fremdspannungs- und Eigenspannungsprobe im Prüffeld, wobei man bei Prototypen zur Sicherheit noch die Teilentladung (TE) überwachen kann.

Die Fremdspannungs- oder auch Wicklungsprobe überprüft die Spannungssicherheit gegen Erde während einer Minute mit einem ziemlich hohen Vervielfachungsfaktor n_F gegenüber der Nennspannung; z.B. 20 kV Nennspannung; 50 kV Prüfspannung; $n_F = 50\sqrt{3}/20 = 4{,}33$.

Die Wicklungsprobe kann als Nachweis der «äusseren Spannungsfestigkeit» der Wicklung angesehen werden. Bei Grosstransformatoren mit Spannungen >300 kV kann diese eher betriebsfremde Prüfung durch die sog. Methode 2 der IEC-Publikation 76/Teil 3 [6] ersetzt werden.

Die Eigenspannungs- oder Windungsprobe kontrolliert die Spannungsfestigkeit innerhalb der Wicklung bei erhöhter Frequenz mit einem Vervielfachungsfaktor $n_E = 2$ gegenüber der Nennspannung. Diese Prüfung ist zwar betriebsnahe, jedoch relativ harmlos gegenüber der nachfolgend beschriebenen Stossspannungsprobe.

5.2 Stossspannungsfestigkeit

Die Stossspannungsfestigkeit ist der wichtigste Vertreter der «inneren Spannungsfestigkeit» der Wicklung und gleichzeitig auch der Repräsentant der ersten charakteristischen Grundeigenschaft eines betriebssicheren Transformators.

Während man heute bei Grosstransformatoren den Nachweis meistens als Stückprüfung ausführt, erfolgt dieser bei Verteiltransformatoren als Typenprobe. Der Grund liegt in den prozentual höheren Prüfkosten bei letzteren. Bei Grosstransformatoren ist die Stossspannungsprobe also eine häufig durchgeführte Prüfung. Der berechnete Sicherheitsgrad S (hier gegenüber dem Durchschlagswert) findet seinen Nachweis somit «indirekt» über die Prüffeld-Fehlerstatistik.

Verteiltransformatoren werden in Serie produziert, aber nur selten gestossen; hier reicht also die Statistik zum Nachweis des Sicherheitsfaktors nicht aus. Welche Möglichkeiten bestehen dann? Eine der besten ist zweifelsohne der Weg über Prototypen, die man verschärften Prüfungen unterzieht oder überhaupt bis zur Zerstörung prüft.

Eine weitere Frage ist bei einem Serienprodukt wichtig: Wo liegen die schwächsten Punkte? Hat man diese durch Typentests ermittelt, ist der nächste Schritt naheliegend. Durch gezielte Verbesserungen können dann die Sicherheitsgrade so gestuft werden, dass der schwächste Punkt auf einen nicht sehr gravierenden Bauteil fällt.

An mehreren Prototypen der heutigen Normalausführung wurden vor Beginn der Serienproduktion erhöhte Typentests nach Tabelle I durchgeführt. Wie die Resultate zeigen, würde der Anzapfschalter ganz oben unter dem Deckel im Extremfall zum «Ableiter» gegen Erde; er ist der billigste Bauteil, und ein solcher Defekt wäre auch relativ leicht zu beheben. Durchführungsdefekte wären für die Anlage schon gefährlicher, sie könnten über das austretende Öl einen Brand auslösen.

5.3 Kurzschlussfestigkeit

Die Kurzschlussfestigkeit ist der Repräsentant der zweiten charakteristischen Grundeigenschaft eines betriebssicheren Transformators. Zumeist verzichtet man aus Kostengründen hier auf einen Prüfungsnachweis. Ausserdem ist dieser, wie anschliessend gezeigt wird, heute noch mit erheblichen Mängeln behaftet.

Nach IEC-Publikation 76/Teil 5 [7] gilt für einen Transformator der Kategorie I bis 3150 kVA die dynamische Kurzschlussprüfung als bestanden, wenn sich dessen Kurzschlussspannung um nicht mehr als 2% erhöht hat. Bei grösseren Transformatoren (Kategorie II und III) ist eine Übereinkunft zwischen Hersteller und Abnehmer bei der Bewertung von Reaktanzabweichungen erforderlich.

Aus dieser unterschiedlichen Klassierung sieht man sofort den eingegangenen Kompromiss bezüglich der Verteiltransformatoren; im Hinblick auf ihren geringeren Wert als Serienprodukt wurde ein Auge zugedrückt und eine gewisse mechanische Deformation in Kauf genommen. Die Kardinalfrage liegt damit nahe: Wie gefährlich ist dies hinsichtlich der weiteren Betriebssicherheit des Transformators? Um diese Frage beantworten zu können, sind zwei Punkte entscheidend: zuverlässige Messmethoden und Typentests mit anschliessender Kontrolle.

Typentests an Verteiltransformatoren der Spannungsreihe 20 kV — Tabelle I

Prüfungsart	Normalwert	Typentest
Wicklungsprobe	50 kV/1 min, kalt	50 kV/5 min bei 90 °C[1])
Windungsprobe	2 U_N/1 min, kalt	2,5 U_N/5 min bei 90 °C
Stossprobe/Vollwelle	125 kV (6 Stösse ±)	140 kV (4 Stösse neg.)[2])
Stossprobe (abgeschnittene Welle)	–	160 kV (2 Stösse neg.)

[1]) Ein Durchschlag am Anzapfschalter nach etwa 4 min
[2]) 2 Stösse vor und 2 Stösse nach der abgeschnittenen Welle

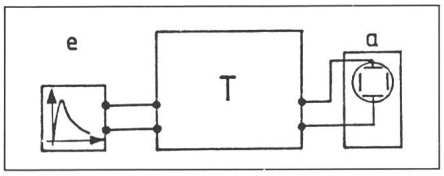

Fig. 4 Schema der Prüfmethode 1 zur Kontrolle der Kurzschlussfestigkeit

e Niederspannungs-Stossgenerator
T Transformator
a Oszilloskop

a) Zuverlässige Messmethoden

Methode 1, das ältere Verfahren (Fig. 4), ist eigentlich ein ähnliches, wie es seit langem auf dem Gebiet der Stossspannungs-Messtechnik benutzt wird. Es wird eine repetitive Referenz-Niederspannungs-Stosswelle für das Transformator-Eingangssignal σ_e benützt und das Ausgangssignal σ_a mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Dies geschieht *vor* und *nach* dem Kurzschlussversuch. Die Kurvenabweichungen zwischen beiden Oszillogrammen geben Aufschluss über die mechanischen Verformungen im Transformator [8].

Trotz der guten Resultate hat diese Methode den Nachteil, dass einerseits die Oszillogramm-Auswertung nicht ganz einfach ist und anderseits die Stabilität der ganzen Messeinrichtungen samt ihrer Kabelverbindungen zu empfindlich reagiert.

Bei *Methode 2,* dem neueren Verfahren (Fig. 5), ist das Transformator-Eingangssignal σ_e an Stelle der Stossspannung eine sinusförmige Wechselspannung mit konstanter Amplitude und variabler Frequenz. Die komplexe Transformator-Übertragungsfunktion $\ddot{u}_T$ beeinflusst sowohl die Amplitude als auch die Phasenlage des Transformator-Ausgangssignals σ_a in Abhängigkeit der Frequenz. Die Funktion $\ddot{u}_T$ bleibt so lange konstant, als sich in der komplizierten Netzwerk-Konfiguration des Transformators keines der Kettengliederelemente *R, L, C* ändert.

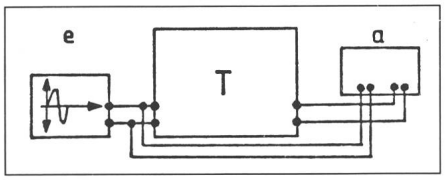

Fig. 5 Schema der Prüfmethode 2 zur Kontrolle der Kurzschlussfestigkeit

e Frequenz-Synthesizer
T Transformator
a Gain-Phase-Meter (Minicomputer, Printer und Plotter)

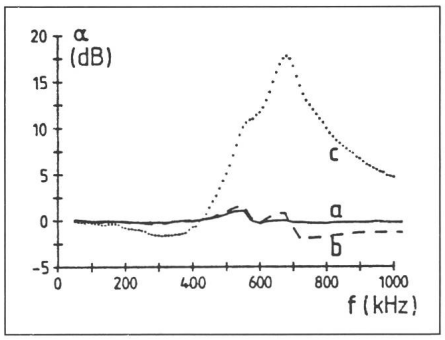

Fig. 6 Amplituden-Frequenz-Diagramm

a Transformator I vor dem Kurzschlussversuch (Kurven vor und nach dem Versuch deckten sich praktisch)
b Transformator II vor dem Kurzschlussversuch
c Transformator II nach dem Kurzschlussversuch

Umgekehrt gibt jede Kurvenabweichung von σ_a gegenüber σ_e einen Hinweis auf Verschiebungen oder Deformationen des Wicklungsblockes [9]. Ein weiterer Fortschritt bei dieser Methode liegt in der automatisierten Aufzeichnung der Resultate. Über ein Zweikanalsystem kann von den Signalen σ_a und σ_e simultan der Phasenverschiebungswinkel $\varphi = \varphi(f)$ in Grad bzw. das Amplitudenverhältnis $B/A = \alpha = \alpha(f)$ in dB jeweils als Funktion der Frequenz (kHz) ausgeplottert werden. Da es im überstrichenen Frequenzbereich stets Transformator-Resonanzzonen gibt, die auf Verstimmungen besonders deutlich reagieren, ist die «Frequenz-Darstellung» dem Vergleich der Zeitfunktionen vorzuziehen (Methode 1). Um die Störeinflüsse tief zu halten, vermeidet man Frequenzen über 1000 kHz.

b) Typentest mit anschliessender Kontrolle

Figur 6 zeigt ein Amplituden-Frequenz-Diagramm $\alpha = \alpha(f)$ für zwei Prototypen 630 kVA der Spannungsreihe 20 kV bei sinusförmiger Speisung:

$$\sigma_e = A \sin(2\pi f t)$$

mit $A/\sqrt{2} = 1\ \text{V} = \text{const}$

So wie vor Jahren bei Stossspannungs-Oszillogrammen ist heute die Interpretation von Kurvenabweichungen in den Funktionen $\varphi = \varphi(f)$ bzw. $\alpha = \alpha(f)$ in bezug auf das Verformungsausmass der Wicklungen noch etwas Neuland. Teils ist die erstere Funktion aussagefähiger (speziell bei abrupten 180°-Phasensprüngen), teils die zweite (in Resonanzzonen); beurteilt werden zumeist beide. Erfahrungen sind leider nur ziemlich aufwendig über totale Demontage der Wicklungen zu sammeln.

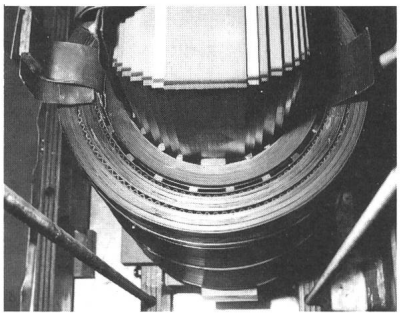

Fig. 7 Demontierter Prototyp II nach dem Kurzschlussversuch

Im speziellen Fall der beiden Prototypen zeigten sich beim Transformator I praktisch keine Diagrammabweichungen und auch keinerlei Verformungen. Die Differenzen zwischen den Kurven b und c des Transformators II sind dagegen beachtlich. Eine sofort durchgeführte Impedanzkontrolle erbrachte keine messbare Abweichung, so dass jedes Kurzschlusslabor die Kurzschlussprüfung zu Recht als bestanden bestätigt hätte. Nach erfolgreicher Wiederholung aller Spannungsproben wurde der Transformator demontiert.

Figur 7 wurde mit Blick auf den halbdemontierten Transformator von oben aufgenommen. Wenn man nicht mit einer starken Lupe schaut, ist keine Verformung an den Wicklungen zu erkennen. Figur 8 zeigt dagegen schon eine deutliche Sehnung der innersten US-Wicklung nach der kompletten Spulenblockdemontage. Rein mechanisch wäre diese Sehnung der ersten US-Windung am Eisenkern für die weitere Betriebssicherheit des Transformators noch nicht sehr gefährlich.

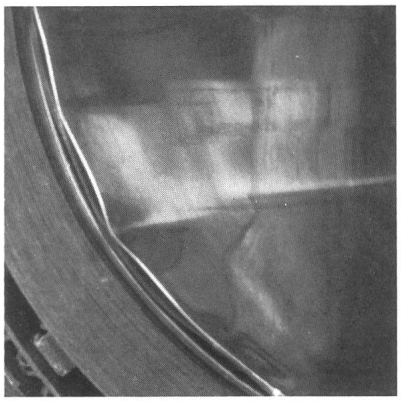

Fig. 8 Demontierte US-Wicklung des Prototyps II nach dem Kurzschlussversuch

Die Eisenkernverkeilung nach Figur 8 ist ziemlich dicht angeordnet, und sie hatte sich beim Kurzschlussversuch durch die Windungssehnung sogar noch zusätzlich verspannt. Eher könnte man Bedenken äussern, dass bei weiteren Kurzschlüssen an den exponierten Auflagestellen die Lagenisolation zur Nachbarwindung durchgedrückt und so ein Windungschluss eingeleitet würde.

Dem Transformator I hat der Kurzschlussversuch nicht geschadet, der Transformator II ist aber durch ihn eher weniger betriebssicher geworden. Solange man daher nur nach der kompromissbehafteten IEC-Regel urteilt und keine empfindlicheren Indikationen anwendet, ist mit solchen Versuchen zweifelsohne ein gewisses Lebensdauer-Risiko verbunden. Der Ordnung halber muss noch ergänzt werden, dass die beiden Prototypen aus Erprobungsgründen einige konstruktive und fabrikatorische Unterschiede aufwiesen.

c) Modellversuche

Originalversuche sind ziemlich aufwendig und auch kostspielig. Kennt man einmal die grobe Richtung, sind Detailversuche an Modellen zweckmässiger. Da gibt es zunächst statische und dynamische Axialkraftversuche, sowohl für Drilleiter als auch Massivleiterspulen [10]. Dazu kommen Radialkraftversuche speziell für die inneren, auf Druck und Knickung beanspruchten Wicklungen [11].

Nicht zu vergessen sind die zwar schwächeren, aber dafür um so häufigeren Einschaltstromstösse (hinsichtlich dauerhafter Vorpressung), welche immerhin das etwa Zehnfache des Nennstromes erreichen können.

Nebenbei bemerkt ist auch auf das Einschalten bei extrem tiefen Temperaturen im Zusammenhang mit dem Öl zu achten [12].

6. Voraussichtliche Entwicklungsrichtungen

In den meisten Überseeländern dominieren Einphasen-Verteiltransformatoren; nur in Europa gibt es hauptsächlich Drehstromeinheiten. Dieser Zustand wird sich wohl kaum ändern.

6.1 Magnetisches Gebiet

Hier sind die grössten Zukunftsschritte zu erwarten. Bei Einphasen-Wickelkernen hat das dünne, amorphe Bandmaterial sicher gute Zukunftschancen. In Drehstromkernen setzt man eher auf Weiterentwicklungen der HiB-Bleche. Heute gibt es bereits HiB-Qualitäten mit einer spezifischen Verlustziffer von 0,9 W/kg bei 1,7 T und 50 Hz; Blechdicke 0,27 mm. Prognosen gehen bis auf 0,6 W/kg. Folgende Entwicklungsschritte sind zu erwarten:

- verbesserte Kornorientierung,
- geringere Blechdicke (0,23 mm bzw. 0,15 mm),
- erhöhter Si-Gehalt,
- Laserstrahl-Behandlung der Oberfläche.

6.2 Elektrisches Gebiet

Hier sind folgende Entwicklungstendenzen abzusehen:

- weiter verfeinerte Drilleiter mit Epoxid-Beschichtung,
- feinlitzige Seile in Rechteckform, ebenfalls mit Epoxid,
- isolierte Cu- oder Al-Bänder,
- Spezialfolien (isoliert) für OS-Wicklungen,
- neue Kunststoffe für Isolationen und Abstützkonstruktionen,
- weiter verbesserte Ölqualität oder unbrennbare ungiftige Ölersatzstoffe.

6.3 Fertigung

Die Haupttendenz wird auch weiterhin in Richtung Automatisierung und Rationalisierung der Fertigung verlaufen.

Literatur

[1] *A. Imhof:* Die ersten hundert Jahre des Transformatorenbaus 1851–1951. Bull. SEV/VSE 72(1981)5, S. 225...233.

[2] *H.P. Moser* u.a.: Entwicklungstendenzen bei den Isolationssystemen für Transformatoren. Bull. SEV/VSE 72(1981)13, S. 675...679.

[3] *J. Kreuzer:* Entwicklung und Untersuchung geeigneter Transformatorenkerne zur wirtschaftlichen Ausnützung von Texturblechen. Dissertation der Technischen Hochschule Wien, 1963.

[4] *J. Kreuzer:* Die Leistungsstruktur leerlaufender Einphasen- und Drehstromtransformatoren. Habilitationsschrift der Technischen Hochschule Wien, 1969.

[5] *P. Käsermann:* Betriebserfahrungen mit Verteiltransformatoren ohne Ölkonservator. Brown Boveri Mitt. 63(1976)6, S. 462...464.

[6] Transformateurs de puissance. Troisième partie: Niveaux d'isolement et essais diélectriques. Publication de la CEI 76-3(1980) et Modification N° 1 (1981).

[7] Transformateurs de puissance. Cinquième partie: Tenue au court-circuit. Deuxième impression. Publication de la CEI 76-5(1982).

[8] *W. Lech* and *L. Tyminski:* Detecting transfomer winding damage. The low voltage impulse method. Electrical Review 179(1966)21, p. 768...772.

[9] *E.P. Dick* and *C.C. Erven:* Transformer diagnostic testing by frequency response analysis. IEEE Trans. PAS 97(1978)6, p. 2144...2153.

[10] *J. Kreuzer:* Hochstromtransformatoren und Drosseln für Gleichrichter- und Ofenanlagen. Brown Boveri Mitt. 63(1976)7, S. 455...461.

[11] *P. Boss* und *H. Stauffer:* Axiale und radiale Drilleiter-Prüfung am Wickelmodell. Referat gehalten am 2. internationalen ASTA-Symposium, 24.-25. Mai 1982, Oed b/Wien.

[12] *P. Boss* et *J.-L. Hermin:* Enclenchement à basse température des transformateurs. Bull. ASE/UCS 72(1981)21, p. 1139...1142.