

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 37 (1946)
Heft: 26

Artikel: Versuche mit Stossspannung an Transformatoren
Autor: Beldi, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057372>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 24.12.2024

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat de l'Association Suisse des Electriciens
Zurich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 23 77 44
Chèques postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

37^e Année

N^o 26

Samedi, 28 Décembre 1946

Versuche mit Stoßspannung an Transformatoren

Von F. Beldi, Baden

621.317.333.8:621.314.21

Das Umwickeln einiger älterer Transformatoren auf andere Spannungen gab Gelegenheit, sie vorher einer eingehenden Stoßprüfung zu unterziehen. Die Transformatoren von 24 und 160 kVA, 8000 V, erlitten nur bei der Prüfung mit abgeschnittenen Stößen Beschädigungen. Die Transformatoren von 2000 und 5000 kVA, 45 000 V, hielten allen Stoßprüfungen ohne Schaden zu nehmen stand. Aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen und unter Beachtung der Betriebserfahrungen in modernen Netzen kann der Schluss gezogen werden, dass die Transformatoren den in der Praxis auftretenden Stoßbeanspruchungen gewachsen sind.

In Bezug auf die Stoßprüfung ist zu beachten, dass die angewandten und heute allgemein bekannten Methoden keinesfalls eine absolut sichere Fehleraufdeckung gewährleisten. Bevor zu einer laufenden Prüfung der Transformatoren mit Stoßspannung geschritten werden kann, muss erst noch eine sichere Methode zur Fehleraufdeckung erprobt werden.

Des essais sous tensions de choc ont été effectués sur quelques anciens transformateurs, qui avaient été rebobinés pour d'autres tensions. Les transformateurs de 24 et 160 kVA ne subirent des avaries que lors des essais sous chocs de tension coupés. Quant aux transformateurs de 2000 et 5000 kVA, 45 000 V, ils ont supporté toutes les épreuves sans dommage. Les résultats de ces essais, ainsi que les expériences pratiques dans les réseaux modernes, permettent d'en conclure que les transformateurs sont parfaitement capables de supporter les sollicitations par ondes de choc, telles qu'elles se présentent pratiquement.

En ce qui concerne les essais de choc, il y a lieu de remarquer que les méthodes actuelles ne permettent pas de déceler absolument tous les défauts. Avant que l'on puisse procéder à des essais réguliers sous tensions de choc des transformateurs, il sera nécessaire de mettre au point une méthode qui donne des résultats encore plus sûrs.

I. Einleitung

Seit der Einführung der Sprungwellenprobe nach den Spannungsnormen des SEV vom Jahre 1923 *) wurden in der Festigkeit der Transformatoren gegen Ueberspannungen, besonders gegen solche atmosphärischer Natur, grosse Fortschritte erzielt. Allerdings waren es mehr die Entwicklungsversuche an Modellspulen, die ein genaues Bild über die Festigkeit der Draht- und Spulenisolation gegen steile Spannungsstösse gaben, als die Versuche am fertigen Transformator. Die Probe am Transformator mit einer Sprungwellenhöhe von 1,3mal Nennspannung bei 1000 Stößen, die die Vorgänge in den Wicklungen bei Beanspruchung durch Ueberspannungen im praktischen Betriebe gut nachahmt, genügt nicht allen Anforderungen. Deshalb wurde sie in die neuen Prüfvorschriften für Transformatoren nicht mehr aufgenommen, aber deren Ausführung fakultativ zugelassen (SEV-Publ. Nr. 108a) [1] ¹⁾.

In den letzten Jahren wird nun, vorwiegend in der amerikanischen Fachliteratur, auf Untersuchungen an Transformatoren bei Beanspruchung mit Stoßspannung aufmerksam gemacht. Die dabei auftretenden Vorgänge sind ähnlicher Natur wie bei der genannten Sprungwellenprüfung; die Beanspruchung der Wicklungsteile ist aber viel schärfer, besonders weil höhere Spannungen zur Anwendung gelangen.

Die bisherigen Ergebnisse der Stoßprüfung haben gezeigt, dass die Methoden der Aufdeckung eines Fehlers während oder nach der Durchführung der Probe noch so unzuverlässig sind, dass die regelmässige Prüfung der Transformatoren aus der laufenden Produktion mit Stoßspannung nicht befürwortet werden kann. Deshalb wurde auch keine Stoßprüfung von Transformatoren in die in Bearbeitung befindlichen Regeln und Leitsätze für die Koordination der Isolationen in Hochspannungsanlagen aufgenommen.

Durch den Umbau der Hochspannungsnetze einiger Elektrizitätswerke auf andere Spannungen wurden uns Transformatoren verschiedener Leistung und Spannung zum Umwickeln übergeben. Wir begrüßten die günstige Gelegenheit sehr, Untersuchungen bei Stoßspannungsbeanspruchung an Transformatoren, die sich jahrzehntlang ohne Störung im Betrieb bewährt hatten, durchführen zu können ²⁾. Durch das Umwickeln nach der Prüfung hatten wir die Möglichkeit, die Wicklungen beim Abwickeln der Spulen genauestens auf etwa entstandene Beschädigungen zu untersuchen.

²⁾ Von den Aargauischen Elektrizitätswerken erhielten wir die Transformatoren von 24 und 160 kVA. Die Untersuchungen an den zwei grossen Transformatoren wurden auf Wunsch der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (2000-kVA-Transformator) und der Forces Motrices des Lacs de Joux et de l'Orbe (5000-kVA-Transformator) durchgeführt. Beide Werke und auch Herr Dr. K. Berger, Versuchsleiter der FKH, nahmen an den Untersuchungen der zwei grossen Transformatoren teil.

*) heute ausser Kraft.

¹⁾ siehe Literaturverzeichnis am Schluss.

II. Angaben über die geprüften Objekte

Zur Untersuchung gelangten vier Dreiphasen-Transformatoren gewöhnlicher Bauart mit Hartpapierzylindern als Hauptisolationen zwischen den Wicklungen. Die Oberspannungswicklungen sämtlicher Transformatoren besitzen verstärkte Windungs-isolation am Anfang und Ende jeder Säule. Die wichtigsten konstruktiven Daten sind in Tabelle I aufgeführt.

treten, die bei einer folgenden Isolationsprüfung selbst mit 2,5facher Eigenspannung nicht zum Vorschein kommen, obwohl beim folgenden Abwickeln der Windungen an 41 Stellen Defekte vorhanden waren. Neuere Untersuchungen von *Bellaschi* [3] lassen ebenfalls eine Unsicherheit bei der Stossprüfung zurück, indem 50 % aller Fehler durch den Kathodenstrahloszillographen (KO) angezeigt, 90 % aller Fehler durch Rauch- oder Blasenbildung be-

Konstruktionsdaten der 4 geprüften Transformatoren

Tabelle I

Leistung (Fabrikationsjahr)	24 kVA (1926)	160 kVA (1932)	2000 kVA (1928)	5000 kVA (1926)
Kurzschlußspannung	3,5 %	3,8 %	4,2 %	7,2 %
Spannungen	$\frac{8250 \dots 7670}{408} \text{ V}$	$\frac{8520 \dots 6800}{408} \text{ V}$	$\frac{44\ 000 \dots 42\ 000}{8600} \text{ V}$	$\frac{42800 / 40600 / 38520}{13500} \text{ V}$
Schaltung	Δ/Δ	Δ/Δ	Δ/Δ	$\Delta/\Delta(\Delta/\Delta)^1$
Spulenzahl ²⁾ / Säule	8	16	39 Doppelspulen	32 Doppelspulen
Eingangsspulen	1 à 226 Windungen	1 à 49 Windungen	5 à 30 Windungen	5 à 24 Windungen
Normalspulen	7 à 272 Windungen	14 à 57 Windungen	32 à 34 Windungen	23 à 28 Windungen
Sternpunktspulen	—	1 à 49 Windungen	2 à 30 Windungen	4 à 24 Windungen
Draht-Isolation Normalspulen	0,95 mm \varnothing 1 PB	2,4 mm \varnothing 1 PB	8 \times 1,5 mm ² 2 PB	2 \times 10 mm ² 3 PU
Draht-Isolation Spezialspulen	0,95 mm \varnothing 2 PB	2,4 mm \varnothing 2 PB	8 \times 1,5 mm ² 4 PB	2 \times 10 mm ² 6 PU
Oelspalten zwischen den Spulen	1 à 7 mm, 6 à 4 mm	15 à 4 mm	keine	4 mm
Lagenisolation	0,08 mm Papier	0,08 mm Papier	³⁾	keine

¹⁾ für die Stossversuche auf Δ/Δ umgeschaltet.

²⁾ alle Wicklungsangaben beziehen sich auf die stossgeprüfte OS-Wicklung.

³⁾ 1,5 mm dicker Preßspan zwischen beiden Lagen einer Doppelspule und zwischen den Doppelspulen. Kein Oelschlitz.

Die Transformatoren von 24, 160 und 5000 kVA, die im Jahre 1926 bzw. 1932 gebaut wurden, besitzen als wesentliches Unterscheidungsmerkmal gegenüber dem 2000-kVA-Transformator Oelschlitz zwischen den Spulen der Hochspannungswicklung. Beim 2000-kVA-Transformator (Baujahr 1914), umgewickelt im Jahre 1928 von 25 000/8000 V auf 44 000/8600 V, dagegen sind alle Spulen satt aufeinander montiert. Die magnetischen und elektrischen Verkettungen der Windungen sind damit stärker als bei den Transformatoren mit Oelschlitz.

Für die Stossversuche an den Transformatoren von 24, 160 und 2000 kVA Leistung wurden die normalen Durchführungen durch solche grösserer Ueberschlagsspannung ersetzt ³⁾. Beim Transformator von 5000 kVA Leistung wurden die Klemmen erst während der Durchführung der Versuche ausgetauscht. Weiter wurden etwa vorhandene Schutzfunkenstrecken an den Isolatoren zeitweise während der Versuche entfernt oder weiter eingestellt.

III. Versuchstechnisches

Wie bereits erwähnt wurde, ist noch keine sichere, einwandfreie Methode der Fehlerrückmeldung während der Prüfung bekannt geworden, um speziell Windungsdurchschläge oder Ueberschläge zwischen einzelnen Lagen festzustellen. So haben schon Untersuchungen von *Norris* [2] im Jahre 1930 gezeigt, dass bei den Stossprüfungen Teildurchschläge und Durchschläge zwischen Windungen und Spulen auf-

merkt wurden. Der Schleifenoszillograph zeigt wenig Fehler, die nicht durch die bereits genannten Mittel angezeigt werden. Es wird aber noch erwähnt, dass es auch Beschädigungen gibt, die weder durch den KO, noch durch visuelle Beobachtung bemerkt werden können. In Deutschland war man aus solchen Gründen dazu übergegangen, nach den verlangten Stossprüfungen am fertigen Transformator stets ein Auswechseln der gestossenen Spulen gegen neue, der Stoßspannungsprüfung nicht unterzogene Spulen vorzusehen [4]. In allerletzter Zeit wurde im Jahresrückblick der GECO eine neue Methode zum Aufdecken von Fehlern während der Stossprüfung erwähnt [5]. Während bei der Stossprüfung mit gleichzeitiger Erregung der Unterspannungsseite das Oszillogramm der Spannung keinen sicheren Aufschluss geben kann, soll ein Oszillogramm des Stromes im Sternpunkt des Transformators einen Defekt anzeigen. Die Methode scheint aber sehr unempfindlich zu sein; denn das Beispiel bezieht sich auf einen Fehler, bei dem 50 % aller Windungen überschlagen wurden.

Das einzig sichere Mittel zur Feststellung eventueller Wicklungsbeschädigungen, das an neuen, ablieferungsbereiten Transformatoren nicht angewendet werden kann, wohl aber bei den vorliegenden Untersuchungen, ist das sorgfältige Abwickeln und die individuelle, sorgfältige Untersuchung der Spulen nach den Versuchen. Im weiteren wurde durch einen Vorversuch die Bildung von Gasblasen unter Oel bei Durchschlägen während der Stossbeanspruchung studiert, weil gerade dieser Indikator nach allen bisherigen Untersuchungen während der

³⁾ Damit wurde erreicht, dass die Wicklungen der Transformatoren auch mit vollständigen Stößen beansprucht werden können, deren Höhe die Ueberschlagsfestigkeit der normalen Isolatoren überschritten.

Stossprüfung von Transformatoren am sichersten erschien.

Die Zahl der Versuche pro Transformator musste beschränkt werden. Wenn auch das Aufdecken von eventuellen Beschädigungen während der Versuche sehr problematisch erschien, so musste doch vermieden werden, dass durch Ueberlagerung mehrerer verschiedener Prüfungen das Feststellen der Ursache einer etwaigen, beim Abwickeln der Spulen zum Vorschein kommenden Beschädigung in Frage gestellt wurde. Aus diesen Ueberlegungen heraus und auch beeinflusst durch die Erfahrungen während der Prüfung wurden die vier Transformatoren nicht einer genau gleichen Prüfung unterzogen.

Vor den jeweiligen Stossversuchen wurde der Verlauf der Stoßspannung mit dem Kathodenstrahl-oszillographen aufgenommen, wobei das Prüfobjekt — mit Ausnahme eines speziellen Falles — angeschlossen blieb. Zur Messung der Stoßspannung mit der Kugelfunkenstrecke wurde das Prüfobjekt normalerweise abgetrennt. Bei den meisten Versuchen wurde während der Stossprüfung die Wicklung gleichzeitig mit *Nennspannung* erregt.

Zur Kontrolle einer evtl. auftretenden Beschädigung wurden bekannte Mittel eingesetzt. So wurden auf der Unterspannungsseite die Spannung und der Strom im Schleifenoszillographen verfolgt und die Oeloberfläche bei abgehobenem Deckel während der Versuche aus nächster Nähe beobachtet, um eventuell aufsteigende Gasblasen feststellen zu können. Durch einen speziellen Versuch an einzelnen Spulen des 2000-kVA-Transformators wurde auch die Auswirkung von Durchschlägen unmittelbar nach der Stossprüfung studiert.

Die Stossprüfung am 24- und am 160-kVA-Transformator wurde mit einer Stossanlage für 300 kV Nennspannung nach der prinzipiellen Schaltung Fig. 1 durchgeführt. Die Stosskapazität C_c

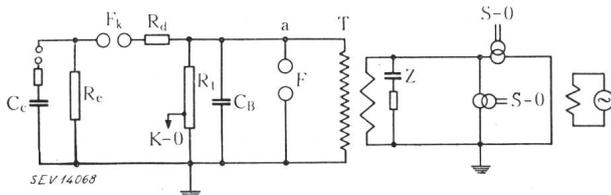


Fig. 1

Prüfschaltung für die Stossversuche an den Transformatoren von 24, 160 und 5000 kVA Leistung

C_c Stosskapazität. R_d Dämpfungswiderstand. R_c Enlade-widerstand. R_1 Spannungsteiler. C_b Belastungskapazität. F_K Kopplungsfunkenstrecke. F Messfunkenstrecke. T geprüfter Transformator. Z Schutzimpedanz. $S-O$, $K-O$ Schleifen- bzw. Kathodenstrahl-Oszillograph.

betrug 9000 pF. Um die Ueberlagerung grösserer Schwingungen auf der Zuleitung zu vermeiden, war auf engsten Zusammenbau der Prüfeinrichtung Bedacht genommen. Die Schutzimpedanz Z war bei den Versuchen an den zwei kleinen Transformatoren nicht angeschlossen.

Um das Umladen der Stossanlage von der Wechselstrom-Seite her zu unterdrücken, wurde die Funkenstrecke F_K eingeschaltet und, zwecks besserer Löschung des an ihr auftretenden Lichtbogens, mit Druckluft beblasen.

Die Stossprüfung am 2000- und am 5000-kVA-Transformator wurde mit einer Stossanlage von 2400 kV durchgeführt. Dabei arbeitete der 8stufige Stossgenerator in zwei parallelen Gruppen, wodurch eine Stosskapazität von 35 000 pF erreicht wurde.

Um den 2000-kVA-Transformator mit steilsten Stoßspannungen beanspruchen zu können, wurde der Dämpfungswiderstand R_d zu nur 52 Ω gewählt; damit wurden stärkere, der Stoßspannung überlagerte Schwingungen in Kauf genommen. Aus versuchstechnischen Gründen musste der zu prüfende Transformator über eine Leitung von 30 m Länge an die Stossanlage angeschlossen werden. Dabei war die Kopplungsfunkenstrecke F_K entgegen Fig. 1 zwischen Punkt a und Transformator T eingeschaltet. Bei der Prüfung des 5000-kVA-Transformators wurde dagegen auf steilste Stoßspannungen verzichtet und deshalb ein Dämpfungswiderstand von $R_d = 450 \Omega$ eingeschaltet. Zum Schutze der unterspannungsseitigen Anlage gegen Ueberspannungen [6] wurde bei diesen Versuchen, wie Fig. 1 zeigt, auf der Unterspannungsseite des Transformators eine Impedanz Z (42 000 pF, 2100 Ω) eingeschaltet.

Die zu prüfenden Dreiphasen-Transformatoren T sind in Fig. 1 übersichtshalber als Einphasen-Transformatoren eingezeichnet. Die Stösse wurden nur einpolig (U , V bzw. W) zugeführt, wobei immer eine nicht gestossene Säulenwicklung kurzgeschlossen und geerdet wurde. Die Erregung mit Betriebsfrequenz erfolgte ebenfalls einphasig auf der Unterspannungsseite mit voller Sternspannung.

Bei allen Stossversuchen an den vier Transformatoren wurde der Stossvorgang durch die Funkenstrecke F_K eingeleitet. Sie wurde auf den gewünschten Stoßspannungswert, vergrößert um den Scheitelwert der Wechselspannung, eingestellt. Die Zündungen an der Kopplungsfunkenstrecke F_K erfolgten damit bei umgekehrter Polarität der Wechselspannung — z. B. bei positiver Stosswelle und negativer Halbwelle des Wechselstromes — also bei maximaler Beanspruchung der Wicklung.

Es wurden folgende Prüfungen und Kontrollmessungen durchgeführt:

a) Versuch über das Entstehen von Gasblasen und Löschen des Lichtbogens. Durch möglichst einfache, übersichtliche Versuche wurde vor den Stossversuchen an den Transformatoren festgestellt, ob Gasblasen mit genügender Sicherheit als Indikator für entstandene Stossdefekte angesehen werden dürfen. Im weiteren wurde festgestellt, ob gezündete Lichtbogen von selbst wieder löschen.

b) Kontrolle der Transformatoren vor, während und nach den Stossprüfungen. Eine weitere Möglichkeit, um eine eventuelle Beschädigung aufzudecken — nebst den im vorliegenden Abschnitt genannten Mitteln — wurde durch die Proben der Transformatoren bei Industriefrequenz geschaffen. Dabei wurde die Uebersetzung festgestellt, die Leerlauf- und Wicklungsverluste, sowie die Widerstände wurden gemessen und Isolationsproben durchgeführt. Diese umfassten die Sprungwellenprobe, die früher vom SEV vorgeschrieben war, und die Eigenspannungs- und die Fremdspannungsprobe.

Bei der Uebersetzungskontrolle wurde, was sonst bei Leistungstransformatoren nicht üblich ist, zur Ergänzung der Kontrollmittel noch der Uebersetzungs- und Fehlwinkel in der Schaltung, die für Messwandler (Brückenmessung) angewendet wird, bestimmt.

c) Nach sämtlichen Stossversuchen und Kontrollmessungen wurden die Wicklungen demontiert und auf Isolationsschäden hin untersucht.

IV. Untersuchungen

a) Entstehen von Gasblasen und Löschen des Lichtbogens

Der Stossgenerator von 300 kV wurde über einen ohmschen Widerstand bei verschiedenen Prüflingen, die unter Transformatorenöl gesetzt wurden, entladen. Der zeitliche Verlauf des Stromes schwankte aus versuchstechnischen Gründen, wie aus Tabelle II zu ersehen ist, zwischen Stoss 1|1000 und Stoss 0,5|1.

Durchschlag bei Stossbeanspruchung einer Kugelfunkenstrecke 12,5 mm \varnothing , $s = 2$ mm unter Oel
Tabelle II

Strom (Scheitelwert) im Funken A	0,010 (1 1000) ¹⁾	1 (1 50)	5 (1 20)	1000 (0,5 1)
Anzahl Blasen	1	1	1	1 ... 2
Blasendurchmesser mm	0,5	0,5 ... 1	1	2
Bemerkung	durchsichtige Blase	weisse „Dampf“-blase	Rauchblase	Rauchblase, heft. Bewegung

¹⁾ () Konstanten des Stosses.

Beim Durchschlag einer Kugelfunkenstrecke unter Oel wurden schon bei kleinsten Stoßströmen im Durchschlagsfunken Gasbläschen an der Oeloberfläche frei.

Bei Strömen in der Grösse, wie sie durchaus bei Durchschlägen zwischen Spulen bei der Stossprüfung von Transformatoren auftreten können, treten Rauchblasen an die Oberfläche.

Wie aus Tabelle III ersichtlich ist, nimmt die Zahl der Blasen erwartungsgemäss mit grösserer Schlagweite zu. Sind am Durchschlag feste Isoliermaterialien beteiligt, dann nimmt die Blase an Vo-

Durchschlag verschiedener Objekte unter Oel bei Stossbeanspruchung
Tabelle III

Objekt	Kugeln 12,5 mm \varnothing $s = 2$ mm	Spitzen $s = 18$ mm	Kalotten 60 mm \varnothing $s = 1,5$ mm	Kalotten mit Transformerboard ¹⁾	2 isolierte Drähte ²⁾ $s = 2$ mm
Strom (Scheitelwert) A	5	5	50	50	50
Anzahl Blasen	1	5 ... 6	5	4	4
Blasendurchmesser mm	1	1 ... 2	1	5	2
Bemerkung	Rauchblase	Rauchblase	Rauchblase	starke Rauchblase	Rauchblase Rußspuren

¹⁾ 1,5 mm Transformerboard.
2×0,5 mm Oelschicht.
²⁾ Drähte 4 mm Durchmesser.
1,5 mm Papierisolation.

lumen zu. Sie wird von starker Rauchbildung begleitet, die auch Rußspuren (Wirbel) im Oel zurücklassen kann.

Diese Versuche ergeben, dass bei jedem Stossdurchschlag unter Oel Blasen entstehen, die an der Oberfläche von Auge sichtbar sind, besonders, wenn noch feste Isolationsteile am Durchschlagsvorgang mitbeteiligt sind. Die Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen ist so gross, dass sie bei der Prüfung von Transformatoren zwischen zwei Stössen an die Oeloberfläche gelangen, wenn sie nicht durch Konstruktionssteile am Aufsteigen verhindert werden.

Diese grundsätzlichen Abklärungen wurden später noch ergänzt durch Versuche an Spulen der Oberspannungswicklung des 2000-kVA-Transformators. Es war dabei abzuklären, ob bei Stossversuchen ohne Wechselstromüberlagerung eine Beschädigung an der Wicklung erkennbar ist. Zu diesem Zwecke wurden je zwei nach den Stossversuchen ausgebaute Spulen unter Oel gegeneinander einem Stoss 0,5|50 bei sukzessiv steigender Spannung bis zum Durchschlag ausgesetzt.

Die Grösse und der zeitliche Verlauf des Stromes im Durchschlagfunken wurden dabei auf den gleichen Wert begrenzt, wie wenn am Transformator ein Durchschlag entstanden wäre. Im ganzen wurden zirka 15 Stösse auf die Spulen gegeben. Bei den zwangsweise herbeigeführten Durchschlägen liess die Oeloberfläche jedesmal einen deutlichen blauen Rauchscheiden frei. Dieser Rauchwirbel erschien kurz nach jedem Stoss, trotzdem die defekte Stelle mitten in der Spulenbreite zwischen zwei aufeinander gepressten Spulen lag. Die Gasblase musste sich also den Weg durch einen engen Spalt bahnen. Die anschliessende Untersuchung der Spulen zeigte mitten im Preßspan zwischen den zwei Spulenseiten ein deutliches Loch von zirka 0,5 mm Durchmesser. Auch wurde der charakteristische Geruch von Kohlenwasserstoff an der Durchschlagstelle wahrgenommen. Die Isolation der Windungen selbst zeigte an der Durchschlagstelle eine zirka 3 mm² grosse Verletzung, die bis zum Kupfer reichte. Diese Versuche bewiesen, dass ein Defekt an der Isolation beim Abwickeln der Spule der gestossenen Transformatoren mit grösster Wahrscheinlichkeit entdeckt werden muss.

Bei den Stossversuchen an den Transformatoren mit gleichzeitig gespeister Unterspannung wurde beobachtet, dass in jedem Fall ein unter Oel aufgetretener Durchschlag selbständig auslöschte, also ohne dass die Wechselstromquelle abgeschaltet werden musste. Da die Stossprüfung der Transformatoren nur bei entgegengesetzter Polarität der Wechselspannung (näheres unter Versuchstechnisches) durchgeführt wurde, ergänzte man die Untersuchungen an einem weiteren Transformator von 350 kVA und 8000 V Oberspannung. Dabei wurden mit einer Synchronisierereinrichtung Spannungsstösse im Moment des positiven oder negativen Scheitelwertes der Wechselspannung aufgedrückt. Eine Eingangsspule des Transformators war durch eine absichtliche Zerstörung vorgängig der Versuche stark beschädigt worden. Die Zündung

erfolgte an der defekten Stelle — was durch die Bildung von Gasblasen und den gleichzeitigen Feuererschein festgestellt werden konnte — bei einer Stoßspannung von 65 kV (Stoß 1|50). Die Löschung trat bei allen Versuchen selbständig ein, und wie die oszillographischen Aufnahmen zeigten, stets spätestens beim Nulldurchgang des Primärstromes.

b) *Kontrollmessungen vor, während und nach dem Stoßversuch*

24-kVA-Transformator

Im Anlieferungszustand war der Transformator in Ordnung. Auch nach den ersten Stoßversuchen an allen drei Phasen wurde keine Veränderung festgestellt. Selbst die Uebersetzungs- und Fehlwinkel-messung ausser Oel ergab dieselben Werte — Spannungsfehler $f = 0,05\%$, Fehlwinkel $\delta = 3,8$ Minuten — wie vor den Stoßversuchen. Bei der Schlusskontrolle der Wicklungen am Ende der Stoßversuche mit Wechselspannung von 50 Hz zeigten sich auch keine abnormen Erscheinungen, so lange der Transformator unter Oel war. Dagegen wurde am ausser Oel gesetzten Transformator bei der Uebersetzungs- und Fehlwinkel-messung bei 75 % der normalen Betriebsspannung an der ersten Spule der Säule *U* ein Windungsschluss — grosse Stromaufnahme, starke Erhitzung, Rauchentwicklung — festgestellt.

160-kVA-Transformator

Im Anlieferungszustand hat der Transformator sämtlichen Kontrollmessungen standgehalten; gleichfalls nach der ersten Serie Stoßversuche an allen drei Phasen und am Schluss sämtlicher Stoßprüfungen.

2000-kVA-Transformator

An diesem Transformator wurden die Sprungwellen- und die Fremdspannungsprobe vor den Stoßversuchen weggelassen, um eine eventuelle Beschädigung auszuschliessen. Die durchgeführten Kontrollversuche ergaben, dass der Transformator im Anlieferungszustand in Ordnung war. Bei der erstmalig nach den Stoßversuchen an Phase *W* durchgeführten Sprungwellenprobe an allen drei Säulen mit 1,3facher verketteter Spannung bei 100 Hz traten ausser drei bzw. fünf kleinen Blasen bei der Prüfung der Phase *V* bzw. *W* keine abnormen Erscheinungen auf. Es ist gut möglich, dass diese Luftbläschen von verdrängten Luftresten, herührend von der Revision des Transformators vor den Versuchen, stammen.

Bei der Wiederholung der Sprungwellenprobe am Schluss der Stoßprüfungen trat während der Beanspruchung der Phase *U* eine einzelne Blase an die Oberfläche. Die Messung der Leerlauf- und Wicklungsverluste, Widerstände, Uebersetzungs- und Winkelfehler an jeder der drei Säulenwicklungen ergab vor und nach der Stoßprüfung keine Unterschiede. Auch die Isolationsprobe mit Fremdspannung von 67 kV Effektivwert gegen Eisen (entsprechend 75 % der Spannungswerte neuer Transformatoren) wurde ohne irgendwelche Beschädigung bestanden.

5000-kVA-Transformator

Zur Durchführung der einphasigen Stoßversuche wurde der Transformator nach der Einlieferung auf der Unterspannungsseite von Dreieck auf Stern umgeschaltet. Dabei wurde festgestellt, dass die Isolation trotz der 20 Jahre Betriebszeit noch sehr gut aussah; die Baumwollumwicklung war nicht spröde, und das Oel wies keinen Schlamm auf.

Nach der Messung der Leerlaufverluste, der Wicklungswiderstände, Uebersetzungs- und Winkelfehler wurde eine Windungsprüfung mit 1,5facher Nennspannung durchgeführt. Im weiteren wurde die Oberspannungs- und Unterspannungswicklung einer Isolationsprobe mit Fremdspannung, und zwar 75 % der Prüfspannung neuer Transformatoren, unterzogen. Die Sprungwellenprobe wurde erst nach der Aufnahme der Stoßwelle mit dem KO an Phase *U* durchgeführt. Auf Grund der vorliegenden Prüfungen wurde der Transformator als in Ordnung gefunden.

Nachdem die Stoßversuche an Phase *U* beendet waren, wurde auf Grund der Kontrollmessungen bei 50 Hz festgestellt, dass der Transformator keine Veränderung erfahren hat. Auch bei der zweimal

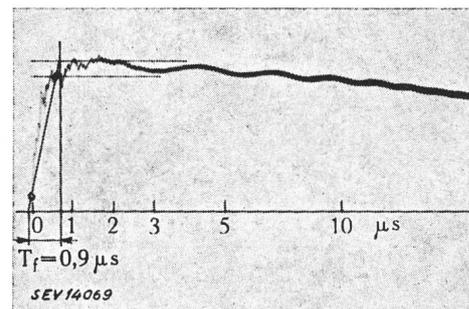


Fig. 2

Kathodenstrahl-Oszillogramm der Stoßspannung beim Versuch am 24-kVA-Transformator
Frontverlauf der Stoßwelle

wiederholten Sprungwellenprobe mit 1,3facher Nennspannung konnte keine abnorme Erscheinung beobachtet werden. Die Kontrollmessungen am Schluss der Stoßprüfungen inklusive Sprungwellenprobe liessen ebenfalls auf keine Veränderung des Transformators schliessen.

c) *Stoßversuche an den Transformatoren und Feststellungen beim Abwickeln der Spulen*

Diese Untersuchungen sind sehr umfangreich und wurden an vielen Objekten durchgeführt. Zur Erleichterung der Lesbarkeit ist deshalb am Schlusse der Angaben über jeden Transformator jeweils eine Uebersicht gegeben. *Diese Abschnitte sind in Kurzschrift gedruckt.*

24-kVA-Transformator

Wie aus den KO-Oszillogrammen Fig. 2 und 3 ersichtlich ist, wurden die Versuche an diesem Transformator mit einer Stoßspannung von zirka $0,9 \mu s$ Frontdauer und einer Halbwertdauer von $45 \mu s$, also mit einem Stoß $0,9|45$ durchgeführt.

Dabei wurden die einzelnen Phasen mit bis zu 15 Stößen pro Spannungsstufe beansprucht. Die Stossspannung wurde in mehreren Stufen bis auf 92 kV gesteigert. Dieser Spannungswert ist 15 % grösser als die in Bearbeitung befindlichen Regeln für die Koordination der Isolationen in Hochspannungsanlagen für das mittlere Isolationsniveau als Minimalwert der 50-%-Ueberschlagstoßspannung vorgesehen.

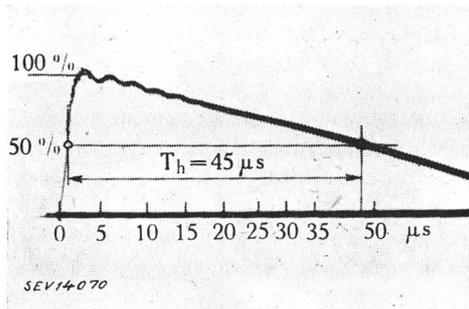


Fig. 3

Kathodenstrahl-Oszillogramm der Stoßspannung beim Versuch am 24-kVA-Transformator
Rückenverlauf der Stossstelle

In Tabelle IV sind sämtliche an diesem Transformator durchgeführten Stossuntersuchungen zusammengestellt.

ist die Folge dieses steilen Spannungsstosses. Infolge des Ueberschlages über Oel konnte nicht einwandfrei festgestellt werden, ob Blasen aufgestiegen waren.

Wie die weiteren Messreihen zeigen, wurde der Transformator vermutlich durch den Ueberschlag bei Versuchsreihe 9 etwas beschädigt — Blase auf dem Oelspiegel über der Phase U (Messreihe 13). Interessanterweise hat dann aber die Wicklung den weiteren Prüfungen bis zu der höchsten Spannung von 92 kV standgehalten. Auch die Phase W, an deren Unterspannungsklemme ein Ueberschlag auftrat, hat die weiteren 90 Spannungsbeanspruchungen, Messreihe 16, ohne irgendwelche abnormen Erscheinungen ausgehalten.

Der Transformator hat also, ohne dass eine abnorme Erscheinung aufgetreten wäre, den vorgenommenen Stoßspannungsbeanspruchungen bis zum Schluss der Versuche bei gleichzeitigem Erregen der Unterspannungswicklung standgehalten. Er hat aber, wie erst die Nachkontrolle mit Wechselspannung in Luft gezeigt hat, durch den Stossversuch — vermutlich Versuchsreihe 9 — eine Beschädigung der Lagen- und Windungsisolation erlitten. Diese konnte solange nicht entdeckt werden, als das Oel noch zur Isolierung diente.

Die Wicklung dieses kleinen Transformators war also auf abgeschnittene Stoßspannungen (Stossüberschlag an der Messfunkenstrecke in nächster Nähe

Versuch am Transformator von 24 kVA bei positivem Stoss

Tabelle IV

Nr.	geprüfte Wicklung	erregte Wicklung 50 Hz	Stoss- spannung kV	Anzahl Stösse	Beobachtungen
1	O-U (O-W) ¹⁾	o-w	50	ca. 15	keine Gasblasen
2	"	"	60	15	keine Gasblasen
3	"	"	70	15	keine Gasblasen
4	"	"	80	15	keine Gasblasen
5	O-W (O-U)	"	70	15	keine Gasblasen
6	"	"	80	15	keine Gasblasen
7	O-V (O-W)	o-v	70	15	keine Gasblasen
8	"	"	80	15	keine Gasblasen
9	O-U (O-W)	o-w	60	1	Ueberschlag an F und Klemme w gegen Kasten
10	"	"	50	15	keine Gasblasen
11	"	"	60	15	keine Gasblasen
12	"	"	70	15	keine Gasblasen
13	"	"	80	15	1 kleine Blase oberhalb Säule U
14	"	"	86	10	keine Gasblasen
15	"	"	92	10	keine Gasblasen
16	O-W (O-U)	o-w	50...92	je 15	keine Gasblasen

¹⁾ gleichzeitig durch magnetische Verkettung beanspruchte Phasenwicklung.

Während der ersten Versuche bis zu einer Spannung von 80 kV, Messreihen 1...8, konnten keine Beschädigungen festgestellt werden. Beim nächsten Versuch, Reihe 9, trat ein Ueberschlag an der Messfunkenstrecke F (Fig. 1) auf. Durch diesen Ueberschlag in allernächster Nähe der Klemmen wurde die Wicklung einer äusserst steil verlaufenden Stossstelle ausgesetzt, die auch auf der Unterspannungsseite des geprüften Transformators eine relativ hohe Spannungsbeanspruchung zur Folge hatte. Der Ueberschlag an der Unterspannungsklemme w über die Oeloberfläche gegen den Kasten

der Klemme) empfindlich, nicht aber auf vollständige Stösse⁴⁾. Diesen hat er bis zu einem Scheitelwert von 92 kV, das sind 15 % über dem Niveau des Stationsmaterials (vorgeschriebene 50-%-Ueberschlagstoßspannung der Durchführung: 80 kV), getrotzt.

160-kVA-Transformator

Sämtliche Versuche wurden bei Stoss 1,2|45 durchgeführt. Entsprechend der Spannung des Transformators von 8520 V wurde er im allgemei-

⁴⁾ Definition aus den Regeln für Spannungsprüfungen, Publ. Nr. 173 des SEV, ersichtlich.

nen auch mit Spannungsstößen bis 92kV beansprucht. Diesen Prüfungen, Messreihen 1...8 der Tabelle V, hielt der Transformator, ohne irgendwelche abnorme Erscheinungen zu zeigen, stand.

In zwei weitem Versuchen, Reihe 9 und 10, wurde die dielektrische Festigkeit einer Oelschicht zwischen zwei nebeneinander liegenden, an ihrer Oberfläche blankgeschälten Windungen — 2 PB Isolation nach Fig. 4 — geprüft. Dabei wurde die Stoßspannung 27 % höher als die vorgeschriebene 50-%-Ueberschlag-Stoßspannung der Durchführung, also auf 102 kV, getrieben. Es konnten, selbst an der stark beanspruchten Eingangsspule, keine Veränderungen beobachtet werden.

In einer weitem Versuchsserie, Messreihen 11...14, sollte die Spannung an der gestossenen Phase W bis zu einem eventuellen Defekt gesteigert werden. Vorgängig dieser Spannungssteigerung wurde durch den Stossversuch Reihe 11 festgestellt, dass die

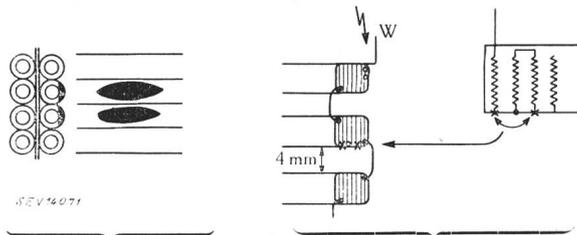


Fig. 4

Stossversuch am 24-kVA-Transformator

Blank geschabte Isolationsstellen an den Windungen der ersten und dritten Spule

Fig. 5

Stossprüfung an der Phase W des 160-kVA-Transformators

Beschädigte Drähte in der ersten und dritten Lage
x Drähte mit Durchschlagstellen
o Draht ohne Beschädigung

Wicklung noch in Ordnung war. Bei einer Spannung von 115 kV — das sind 45 % über der 50-%-Ueberschlag-Stoßspannung der Durchführung — trat ein Ueberschlag von der provisorisch eingebauten Klemme (verstärkte) über die Oeloberfläche gegen Kasten auf. Es wurden keine Gasblasen beobachtet, trotzdem beim vorgängigen Versuch, Reihe 12, eine stecknadelgrosse Blase an der Oeloberfläche auftauchte.

Nachdem der Transformator, ohne bleibenden Schaden zu nehmen, auch den Ueberschlag bei 115 kV überstanden hatte, wurde in einem weiteren Versuch, Reihe 15, die Durchführung soweit verstärkt, dass die Stoßspannung um 80 % über den Wert des mittleren Isolationsniveaus, also auf 144 kV, getrieben werden konnte. Auch dieser Prüfung hielt die Wicklung, ohne sichtbaren Schaden zu nehmen, stand. Ebenso konnte bei der folgenden Kontrollmessung, Reihe 16, keine Beschädigung nachgewiesen werden.

Beim Abwickeln der Spulen der Säulen U und V konnten keine Beschädigungen festgestellt werden. Diese Wicklungen haben den Stossprüfungen bis 92 bzw. 102 kV standgehalten. An der Säule W, an welcher beim Versuch 12 eine kleine Blase auf der Oeloberfläche beobachtet worden ist, wurden in der zweiten Spule zwischen der ersten und dritten Lage (über 16 Windungen) nach Fig. 5 Drahtbeschädi-

gungen festgestellt Die gegenüberliegende Seite der dritten Spule war intakt; Ueberschläge zwischen den Spulen über den 4 mm breiten Oelschlitz traten also nicht auf. Vermutlich steht die erwähnte Windungsbeschädigung in Zusammenhang mit dem Ueberschlag gegen Kasten, Reihe 14, abgeschnittener Stoss.

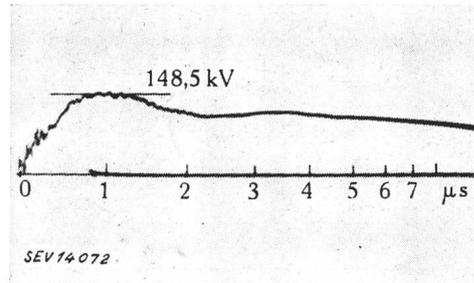


Fig. 6

Kathodenstrahl-Oszillogramm der Stoßspannung für den Versuch am 2000-kVA-Transformator
Stoss am Stossgenerator ohne Prüfobjekt aufgenommen

Trotz der kleinen Durchschlagstelle an der Windungs isolation der zweiten Spule der Phase W hielt der Transformator den Stossprüfungen bis zu einer Spannung von 144 kV stand. Er bestand auch sämtliche Kontrollprüfungen bei 50 Hz. Ohne die genaue Kontrolle der Windungs isolation beim Abwickeln hätte keine Beschädigung festgestellt werden können.

2000-kVA-Transformator

Den mit dem KO aufgenommenen Stoss zeigt Fig. 6. Während der Aufnahme wurde die Kopplungsfunkstrecke F_K überbrückt und der Transformator T nicht angeschlossen. Die Frontdauer beträgt nur zirka 0,7 μs und die Halbwertdauer zirka 22 μs . Durch die Leitung von zirka 30 m Länge zwischen Stossgenerator und Prüfobjekt sowie die

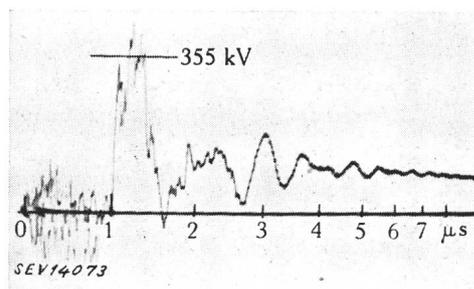


Fig. 7

Kathodenstrahl-Oszillogramm der Stoßspannung am 2000-kVA-Transformator
Stoss am Prüfobjekt bei offener Kopplungsfunkstrecke F_K
Stoss 160 kV
Durch Reflexion hervorgerufene Ueberspannungsspitze ca. 355 kV

Eingangskapazität des Transformators wird dem Stoss eine starke Schwingung (Schwingungsdauer zirka 0,5 μs) überlagert. Oszillogramm Fig. 7 zeigt diese Schwingung, aufgenommen bei offener Schaltfunktstrecke, also in der Schaltung für die Stossprüfung mit Erregung des Transformators auf der Primärseite. Die durch das Ansprechen der Kopp-

Versuch am Transformator von 160 kVA bei positivem Stoss

Tabelle V

Nr.	geprüfte Wicklung	erregte Wicklung 50 Hz	Stossspannung kV	Anzahl Stösse	Beobachtungen
1	O-U (O-W)	o-w	40	30	keine Gasblasen
2	"	"	50	15	keine Gasblasen
3	"	"	60	15	keine Gasblasen
4	"	"	70	15	keine Gasblasen
5	"	"	80	15	keine Gasblasen
6	"	"	92	15	keine Gasblasen
7	O-V (O-U)	o-w	40...92	je 20	keine Gasblasen
8	O-W (O-U)	o-w	40...92	je 15	keine Gasblasen
9	O-U (O-W)	o-w	60...102	je 20	2 blank geschuerte Drähte nebeneinander ¹⁾
10	"	"	102	20	keine Gasblasen
11	O-W (O-V)	o-v	60...92	je 10	keine Gasblasen
12	"	—	102	10	1 kleine Gasblase (ev. Luft) auf Oelspiegel
13	"	—	102	10	keine Gasblasen
14	"	—	115	10	Ueberschlag gegen Kasten. Keine Blasen
15	O-W (O-V)	—	144	10	Klemmenisolation verstärkt. Kein Ueber- oder Durchschlag. Keine Gasblasen.
16	O-W (O-V)	—	80	10	Aufnahme der Stossquelle mit KO

¹⁾ Versuch 9 erste nebeneinanderliegende Windungen der 3. Spule.
 Versuch 10 erste nebeneinanderliegende Windungen der Eingangsspule.

Versuche am Transformator von 2000 kVA bei positivem Stoss und volleregtem Transformator¹⁾ (Sternspannung 25,4 kV)

Tabelle VI

Nr.	geprüfte Wicklung	Stoßspannung ²⁾ kV	Anzahl Stösse	Beobachtungen und Bemerkungen
1	W	+ 100	10	bei 8 Stössen kleine Blasen jedoch ohne Rauch
2	W	+ 110	10	keine Blasen. Primärstrom Osz. Fig. 8
3	W	+ 120	10	keine Blasen
4	W	+ 146...220	in 6 Stufen à 10	keine Blasen
5	W, V, U			Sprungwellenprobe gut
6	V	+ 220	100	beim etwa 40. und 62. Stoss kleine Blase ³⁾
7	U	- 220	100	beim 8., 10., 15., 22. bis etwa 60. Stoss Blasen

¹⁾ jeweils nur eine Phasenwicklung an Stoss und entsprechende US-Wicklung erregt.
²⁾ am Stossgenerator eingestellt.
³⁾ Beim 80. Stoss Ueberschlag (Streuung) am Horn der Kondensatordurchführung.

lungsfunkenstrecke F_K eingeleitete steile und hohe Spannungsspitze von über 355 kV und zirka 0,5 μ s Dauer erreicht etwas mehr als den doppelten Wert der am Stossgenerator eingestellten Spannung von 160 kV.

Bei den ersten Stössen an Säule W wurden nach Tabelle VI Blasen beobachtet, die eventuell von kleinen Lufteinschlüssen herrühren. (Am Transformator wurde bei der Einlieferung der Sternpunkt herausgeführt.) Wie die weiteren Messreihen zeigen, konnten bei den Versuchen mit höheren Spannungen keine Blasen mehr beobachtet werden. Das Schleifenoszillogramm Fig. 8, welches während dieser Stossversuche aufgenommen wurde, zeigt den Spannungs- und Stromverlauf auf der Primärseite des Transformators. Es vermag keinen eindeutigen Schluss auf einen eventuellen Defekt während des Stossvorganges zu geben, weil der während der kurzzeitigen Zündung der Kopplungsfunkenstrecke entstehende Belastungsstrom (herrührend vom Stossgenerator) einen ebenfalls betriebsfrequenten Stromstoss verursacht.

Während der Prüfung der Phase V mit einer Stoßspannung von 220 kV, Messreihe 6, schlug das

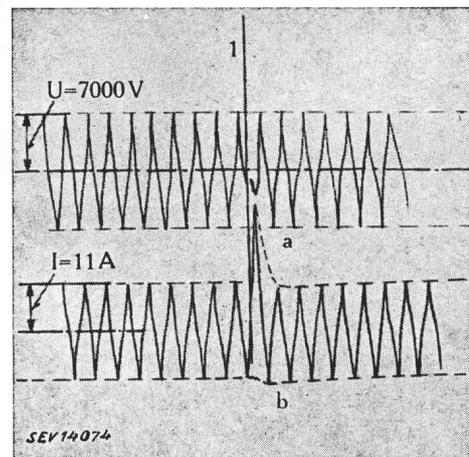


Fig. 8
 Schleifen-Oszillogramm beim Stossversuch am 2000-kVA-Transformator
 Oben Spannungsverlauf, unten Stromverlauf
 1 Augenblick des Stosses
 a, b Ausgleichschwingungen

Funkenhorn der Kondensatordurchführung über. Die Wicklung wurde also, ohne sichtbaren Schaden zu nehmen, mit einer abgeschnittenen Stoßspannung beansprucht. Bei der folgenden Prüfung der Phase *U* wurden nach dem 22. Stoss bei vereinzelt Stößen noch Blasen beobachtet, die jedoch ständig an Intensität abnahmen und nach dem zirka 60. Stoss gänzlich verschwanden. Ob diese Blasen von verdrängten Luftteinschlüssen herrühren, konnte während des Versuchs nicht eindeutig festgestellt werden.

Nach diesen Versuchen wurden *die ersten acht Doppelspulen abgewickelt* und die Isolation sorgfältig nach defekten Stellen abgesucht. Trotz eingehender Kontrolle durch drei verschiedene Beobachter konnte nicht die kleinste Verletzung festgestellt werden. Auch an den kritischen Stellen, also zwischen Anfang und Ende einer Doppelspule und Mitte gegen Mitte zweier benachbarter Doppelspulen, konnten die bekannten, durch Stossdurchschläge verursachten Perforationen nicht bemerkt werden. Der eingelegte 1,5 mm dicke Preßspan war weder durch- noch überschlagen worden. Es scheint somit erwiesen, dass bei den vorliegenden Stossversuchen keine Spulen- oder Wicklungsdefekte entstanden sind.

Der 2000-kVA-Transformator hielt also sämtlichen vollständigen und abgeschnittenen Stoßspannungen stand. Dabei wurde er mit kurzzeitigen Spannungsspitzen von über 400 kV, ohne Schaden zu nehmen, beansprucht. Auch die Kontrollprüfungen liessen keinen Schaden erkennen.

5000-kVA-Transformator

Durch den relativ engen Versuchsaufbau nach Fig. 1 wurde ein Stoss mit geringen Oberschwingungen (zirka 3 %) erreicht. Auf speziell kurze Frontdauer, wie bei den Versuchen am 2000-kVA-Transformator, wurde nicht Wert gelegt. Die Versuche, deren Ergebnisse in Tabelle VII chronologisch eingetragen sind, wurden bei einem Stoss 2,4|46 durchgeführt. Bei der Aufnahme der Stoßspannung und Prüfung der Phase *U* mit 80 Stößen wurden keine abnormen Erscheinungen beobachtet. Auch die darauf folgende Sprungwellenprobe mit 1,3facher

Nennspannung bei 100 Hz an allen drei Oberspannungsphasen verlief ohne Störung. Beim Versuch Reihe 3 wurde die Blasenbildung nur bis zum 40. Stoss beobachtet — vermutlich Verdrängung vorhandener Luftteinschlüsse, herrührend durch das kurzzeitige Ausziehen des Transformators für die Umschaltung von Dreieck auf Sternschaltung.

Gemäss der Nennspannung des Transformators hat das Stationsmaterial — entsprechend den schon genannten Koordinationsregeln — ein Isolationsniveau von 220 kV, d. h. etwa vorhandene Schutzfunkenstrecken an Isolatoren werden auf eine 50%-Ueberschlagstoßspannung von 220 kV eingestellt. Nachdem die Phase *U* dem vollen Stoss von 220 kV standgehalten hatte, wurde sie einer Beanspruchung durch einen abgeschnittenen Stoss ausgesetzt. Die entsprechende Hornschlagweite an der Klemme — für eine 50%-Ueberschlagstoßspannung von 220 kV — wurde während des Versuches, Reihe 4, zu 340 mm bestimmt. Weil jeder Klemmenüberschlag einen Kurzschluss an der entsprechenden Transformatorphase zur Folge gehabt hätte, wurde bei diesen Stossversuchen mit abgeschnittenem Stoss die Unterspannung nicht mehr erregt. Der Transformator hat, wie aus den Messreihen 5...7 ersichtlich ist, auch steileren Stößen (vollständiger Stoss bis 680 kV) ohne Störung standgehalten. Infolge des grösseren Entladeverzuges der Hörnerfunkenstrecke wechselten mit höherer Stoßspannung die Ueberschläge immer mehr auf die Klemme über. Die Steilheit des Spannungsanstieges bei der letzten Prüfung, Reihe 7, betrug nach den oszillographischen Aufzeichnungen zirka 270 kV/ μ s. Der Stoss wurde durch den Ueberschlag an der Klemme von 680 kV auf 440 kV abgesenkt.

Bei der Stossprüfung der Phase *V* mit 220 kV, Messreihe 9, traten während der ersten fünf Stöße nach zirka 2 s gut sichtbare Rauchblasen (Fläche zirka 3 cm²) an die Oberfläche. Bei allen übrigen Stößen konnten keine Blasen mehr beobachtet werden. Dagegen trat beim 43. Stoss ein Ueberschlag von der Unterspannungsklemme *u* (Sternpunkt an Erde) gegen Kasten auf, der die Abschaltung der Speisung auf der Primärseite zur Folge hatte. Die Unterspannungswicklung der Phase *W* war dabei

Versuche am Transformator von 5000 kVA bei positivem Stoss

Tabelle VII

Nr.	geprüfte Wicklung	US erregt ¹⁾	Stoßspannung kV	Anzahl Stöße	Beobachtungen
1	O—U (O—V)	nein	200	80	keine Blasen (Oszill. Stossquelle)
2	U V W	—	—	—	Sprungwellenprobe gut
3	O—U (O—V)	ja	220	100	6 Blasen ohne Rauch. Oszill. auf US aufgenommen
4	O—U (O—V)	nein	220	100	Funkenhorneinstellung. Keine Blasen
5	O—U (O—V)	nein	330	50	1 Bläschen ohne Rauch
6	O—U (O—V)	nein	440	50	30 % der Ueberschläge über Klemme. Keine Blasen
7	O—U (O—V)	nein	680 ²⁾	50	90 % der Ueberschläge über Klemme. Keine Blasen
8	U V W	—	—	—	Sprungwellenprobe gut, Kontrolle gut
9	O—V (O—U)	ja	220	43	starke Rauchblasen, Ueberschlag Klemme <i>u</i> gegen Kasten
10	O—W (O—U)	ja	220	50	keine Blasen
11	O—W (O—U)	ja	265	100	47. und 85. Stoss Rauchblasen bei Klemme <i>u</i> und 1 Blase bei <i>W</i>
12	U V W	—	—	—	Sprungwellenprobe gut

¹⁾ Erregung der Unterspannung pro Phase mit voller Sternspannung.

²⁾ KO-Aufnahme.

kurzgeschlossen und geerdet. Die Phase *W* hielt die Prüfung mit 50 Stößen von 220 kV ohne jegliche Störung oder Blasenbildung aus. Die vorliegenden Prüfungen an den Phasen *V* und *W* wurden ohne Funkenhörner an der Klemme, also mit vollständiger Stossquelle, durchgeführt.

Für die weitem Stossversuche, Reihe 11, wurde die Transformatorenddurchführung der Phase *W* durch eine 80-kV-Kondensatordurchführung ersetzt. Damit war die Möglichkeit geschaffen, die Wicklungen mit einer vollständigen Stoßspannung über 220 kV (mittleres Isolationsniveau des 45-kV-Materials) zu beanspruchen. Beim Versuch an Phase *W* mit 265 kV trat beim 47. Stoss eine kleine Rauchblase in der Nähe der Klemme *u* an die Oberfläche. Bei den weitem Stößen an der Phase *W* wurden wiederum beim 85. Stoss drei Rauchblasen an derselben Stelle (*u*) beobachtet. Während der

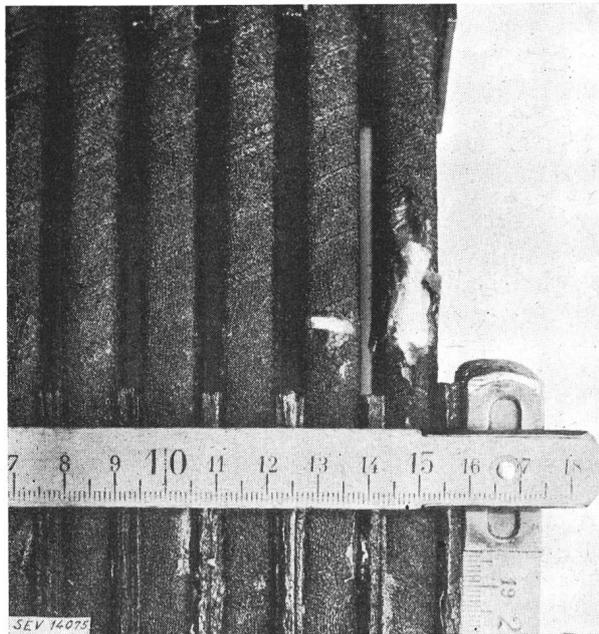


Fig. 9
Stossversuch am 5000-kVA-Transformator
Unabsichtliche mechanische Verletzung der ersten und zweiten Halbspule der Phase *W*

letzten zehn Stöße (90. bis 100.) erschien bei jedem Stoss eine kleine Blase in der Nähe der Klemme *u*. Eine Blase wurde auch in der Nähe der gestossenen Klemme *W* wahrgenommen.

Infolge einer unbeabsichtigten mechanischen Verletzung der Isolation am Anfang der Phase *W* vor diesem Stossversuch waren die Wicklungen (erste und zweite Halbspule), wie Fig. 9 zeigt, blank. Die Oelstrecke von blanker zu blanker Windung betrug zirka 5 mm. Trotzdem traten an dieser Stelle, wie sich auch nachträglich beim Abwickeln herausstellte, keine Ueberschläge auf.

Die Ober- und Unterspannungswicklungen wurden spulenweise abgehoben und insbesondere an den kritischen Stellen genauestens untersucht. Den Preßspandistanzierungsstücken zwischen den einzelnen Spulen wurde auf Grund der Beobachtungen am 2000-kV-Transformator besondere Aufmerksamkeit

geschenkt. Insbesondere wurden die ersten 14 Spulen der Oberspannungswicklung der Säulen *U* und *V* zur bessern Kontrolle in ihre Halbspulen aufgetrennt. Auch die Unterspannungswicklung wurde auf Isolationsfehler abgesehen.

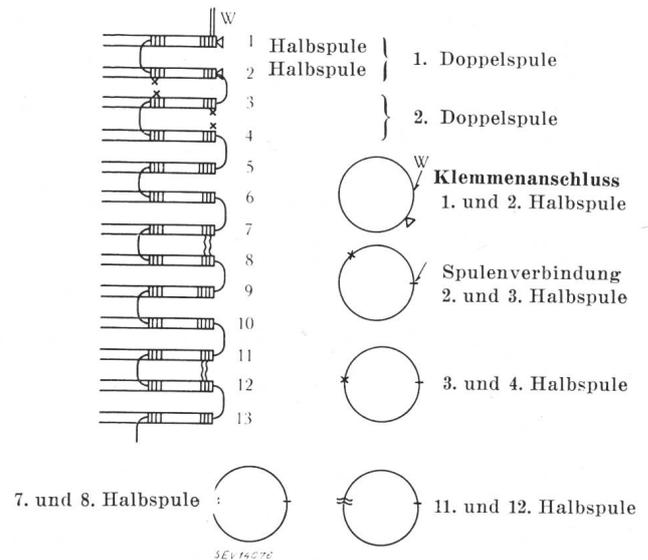


Fig. 10
Stossversuch am 5000-kVA-Transformator
Defektstellen an der Säule *W*
◁ unabsichtliche mechanische Defekte ohne elektrische Spuren
× Ueberschlagstellen in der Nähe von Spulendistanzierungen
u ≈ Durchschlagene Spulendistanzierungen

Die Oberspannungswicklungen der Säulen *U* und *V* zeigten an keiner Stelle eine Beschädigung. An der Säule *W* waren dagegen, ausser der schon genannten mechanischen (nicht elektrischen) Verletzung der Windungsisolation, an der zweiten und dritten Halbspule, Brandstellen von ca. 6 mm Durchmesser nach Fig. 10 und Fig. 11 vorhanden. Es ist zu beachten, dass die Defektstelle diametral gegenüber der Stelle der mechanischen Beschädigungen

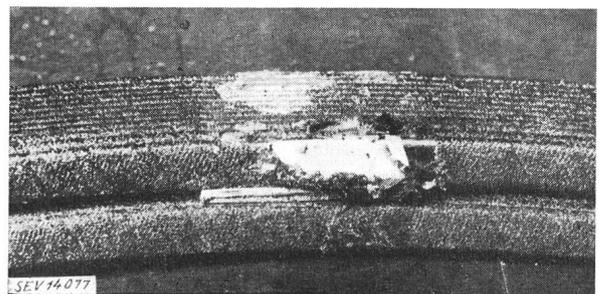


Fig. 11
Stossversuch am 5000-kVA-Transformator
Defekte Windungsisolation an der 2. und 3. Halbspule.
Obere Windung abisoliert, untere Windung unverändert

liegt. Die eine Windung wurde nachträglich abisoliert. Sie zeigt deutlich zwei, wenn auch schwache, Lichtbogenansatzstellen. Die zweite Windung ist unberührt und zeigt eine gut sichtbare Schadenstelle. Ein ähnlicher Defekt war zwischen der dritten und vierten Halbspule nach Fig. 10 aufgetreten. Zwischen der 7. und 8., sowie der 11. und 12. Halb-

spule wurde die Preßspandistanzierung durchschlagen. An beiden Stellen waren je zwei kleine Löcher von 1,5 mm Durchmesser, was auch Fig. 12 zeigt, vorhanden.

Die Spulenüberschläge müssen sehr schnell gelöscht haben, da die Brandstellen an den Isolationen relativ klein ausgefallen sind.

An den Unterspannungswicklungen konnten keine Defektstellen gefunden werden.

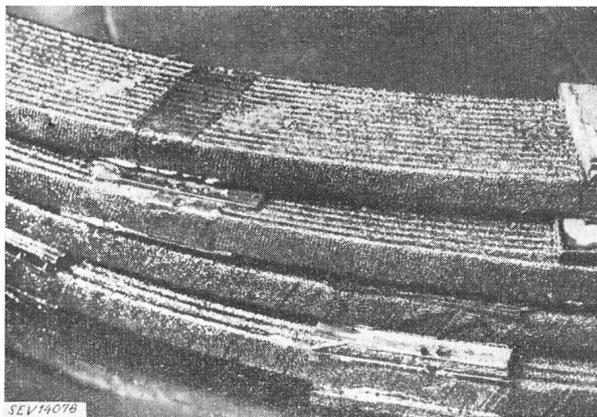


Fig. 12

Stossversuch am 5000-kVA-Transformator

Durchgeschlagene Spulendistanzierungen. Oben zwischen 11. und 12. Halbspule, unten zwischen 7. und 8. Halbspule

Die Ergebnisse der Spulenuntersuchung nach dem Abwickeln des vorliegenden 5000-kVA-Transformators sind, bei Gegenüberstellung mit den Beobachtungen während der Versuche, etwas undurchsichtig.

Die an der Säule *U* beobachteten rauchlosen Blasen können von verdrängten Luft einschüssen herrühren, um so mehr, als bei den höchsten Spannungen keine Blasen mehr beobachtet werden konnten. Dagegen kommt eine analoge Erklärung für die Vorgänge während der Prüfung der Phase *V* wohl kaum in Betracht; denn die eindeutig festgestellten Rauchblasen müssen, obwohl sie nur am Anfang auftraten, von Beschädigungen an der Wicklung herrühren. Trotzdem wurden beim Abwickeln der einzelnen Halbspulen keine Isolationsschäden beobachtet.

An der Phase *W* dagegen wurden beim Abwickeln mehrere deutlich sichtbare Defekte festgestellt, aber merkwürdigerweise sind die während der Versuche gemachten Beobachtungen insofern nicht in Übereinstimmung, als nur eine Blase über der Säule *W* festgestellt wurde.

Bei der Schlussprüfung hielten alle Phasen der normalen Sprungwellenprobe stand.

Alle diese eigenartigen Beobachtungen lassen wohl den Schluss zu, dass einerseits eventuell aufgetretene Durchschläge während der Stossprüfung so kleine Beschädigungen zur Folge hatten, dass sie beim Abwickeln nicht sichtbar wurden. Dies wäre in Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Vorversuches, bei dem auch sehr kleine Ströme im Durchschlagsfunken sichtbare Blasen erzeugten. Andererseits ist es sehr wohl möglich, dass die auf-

gefundenen Isolationsschäden an der Spule der Phase *W* von Perforationen bei Ueberbeanspruchungen während des praktischen Betriebes herrühren.

Dieser 5000-kVA-Transformator hat Stoßspannungsbeanspruchungen mit abgeschnittenen Stößen (vollständiger Stoss bis 680 kV) ausgehalten. Bei gleichzeitiger Wechselstromerregung der Unterspannungswicklung mit Sternspannung und einer Beanspruchung mit Stoßspannung von 265 kV (vollständiger Stoss) — das ist die 1,2fache 50-%-Uebererschlagstoßspannung des zugehörigen Stationsmaterials, also der Durchführungen — wurden keine Erscheinungen beobachtet, die eine Abschaltung des Transformators vom Wechselstromnetz veranlassen hätten. Auch der folgenden Sprungwellenprobe mit 1,3facher Nennspannung und den übrigen elektrischen Kontrollprüfungen hielt der Transformator stand.

V. Schlussfolgerungen aus den Versuchen an den vier Transformatoren

Die Transformatoren verhalten sich bei rasch verlaufenden Vorgängen als ein kettenartiges Gebilde. Jede einzelne Spule stellt nicht nur eine Induktivität, sondern auch einen zwischen erster und letzter Lage gebildeten Kondensator dar. Bei den sehr rasch verlaufenden Vorgängen, die im vorliegenden Falle die Stossbeanspruchung darstellt, macht sich besonders am Anfang nur der Kondensator bemerkbar. In enger Verkettung mit den genannten Spulenkapazitäten sind auch die Kapazitäten der einzelnen Spulen gegeneinander und gegen Erde wirksam. Die Theorie dieses kettenartigen Gebildes gab ein zutreffendes Bild von den Vorgängen im Transformator. Versuche bestätigten, dass im allgemeinen die Anfangsspannungsverteilung die stärkste Wicklungsbeanspruchung darstellt [7].

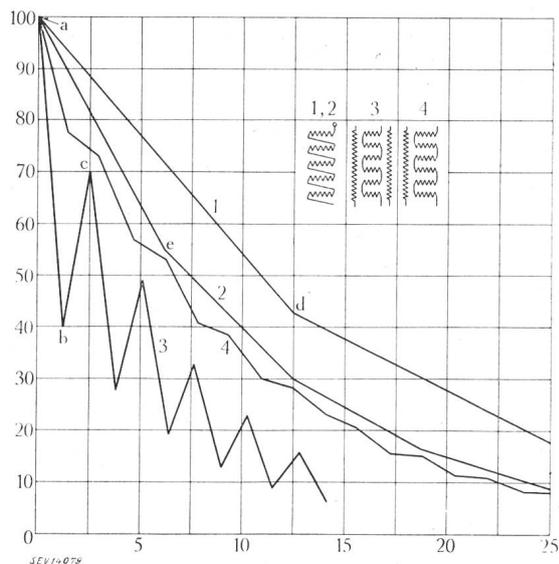


Fig. 13

24-, 160-, 2000- und 5000-kVA-Transformator

Anfangsspannungsverteilung bei auftretender Rechteckwelle. Infolge der doppelkonzentrischen Wicklungsanordnung beim 2000-kVA-Transformator entstehen über die Spulen grössere Beanspruchungen, nicht aber von Spule zu Spule

Ordinate: Spannung in %

Abzisse: Spulen/Phase in %

1 24 kVA. 2 160 kVA. 3 2000 kVA. 4 5000 kVA

Wie aus Fig. 13 ersichtlich ist, entfallen auf die ersten 7...11 % der Spulen im allgemeinen die halbe Stoßspannung. Einzig der 2000-kVA-Transformator (3) macht infolge seines abweichenden Wicklungsaufbaues eine Ausnahme, indem die erste Halbspule (1,3 % der Wicklung) zirka 60 % der auftretenden Spannung aufnimmt (a—b). Die ungewohnte, sägezahnartige Kurve der Spannungsverteilung hängt mit der relativ starken gegenseitigen Kopplung der einzelnen Spulen zusammen. Sie ist auf das Fehlen von Oelschlitz zwischen den Spulen, die bei modernen Transformatoren üblich sind, zurückzuführen.

Die Spannung von 60 % verteilt sich aber infolge der sehr starken kapazitiven Verkettung der Windungen einer Halbspule praktisch gleichmässig auf die einzelnen Windungen, so dass die Windungsbeanspruchung doch in mässigen Grenzen bleibt, wie folgende überschlägige Rechnung zeigt. Der Transformator wurde, wenn man die kurze Zeit dauernde Ueberspannungsspitze (Fig. 7) betrachtet, mit einer maximalen Stoßspannung von zirka $\frac{220^5}{160} \cdot 355 \text{ kV} = 490 \text{ kV}$ beansprucht. Auf die einzelnen Windungen der Eingangshalbspule entfielen 20 kV, eine Spannung, die von der Windungsisolation ohne weiteres gehalten wird. Bei der Prüfung war die Beanspruchung tatsächlich noch kleiner, weil die Versuche nicht mit Rechteckwellen (der Rechnung der Spannungsverteilung zu Grunde gelegt) durchgeführt wurden.

Ausser der Windungsisolation muss auch die Isolation über die Spulen untersucht werden, im sogenannten Spulenschlitz, in welchem die höchste Beanspruchung zwischen Anfang und Ende einer Doppelspule auftritt. Bei diesem Transformator — der, wie bereits erwähnt, sämtlichen Prüfungen standhielt — ist diese auch nicht gross und beträgt im schlimmsten Fall nur 30 % (Fig. 13) der einfallenden Rechteckwelle (a—c).

Bei den Transformatoren von 24 bzw. 160 kVA Leistung (1, 2) gingen dagegen die Spulen beim Versuch mit Stoßspannung defekt. Die Zerstörung ist auf die hohe Spulenbeanspruchung (a—d, bzw. a—e) bei relativ schwacher Isolation zwischen den Lagen zurückzuführen. Der 5000-kVA-Transformator (4) weist infolge seines moderneren Wicklungsaufbaues eine günstige Spannungsverteilung auf.

Die ersten stark ungleichmässigen Anfangsverteilungen gehen nach einigen μs Dauer (Grössenordnung 50 μs) in die gleichmässige Endverteilung über. Der Uebergang ist von Schwingungen begleitet, die auch im Innern der Transformatorwicklung und gegen das Ende (Sternpunkt) Spulenbeanspruchungen zur Folge haben, die den stationären Endwert überschreiten. Diese Schwingungen verursachen auch eine erhöhte Wicklungsbeanspruchung gegen Erde.

Bei den vorliegenden Untersuchungen blieben sie, was die Oberspannung betrifft, ohne äussere Wirkung, nicht aber bezüglich der Unterspannungs-

wicklung — Ueberschläge von den Klemmen gegen den Kasten beim 24- und beim 5000-kVA-Transformator.

In Bezug auf die *Stossfestigkeit der Transformatoren* haben die Versuche folgendes ergeben:

Der 24-kVA-Transformator (20 Jahre alt) ertrug vollständige Stosswellen und zeigte dabei nichts Ungewohntes. Bei abgeschnittenen Stössen erlitt er aber einen Spulendefekt. Trotzdem hielt er nachher noch, ohne irgendwelche Anzeichen einer Störung nur anzudeuten, weiteren Stoßspannungen von 92 kV — 15 % über dem mittleren Niveau des zugehörigen Stationsmaterials — stand, und zwar bei gleichzeitiger Erregung mit Wechselspannung.

Dem 160-kVA-Transformator (14 Jahre alt) konnte, trotz absichtlicher Windungsbeschädigung, eine Stoßspannung bis 102 kV — 27 % über dem mittleren Niveau — zugeführt werden, ohne dass eine Störung selbst bei erregter Wicklung beobachtet worden wäre. Die Beanspruchung mit einem abgeschnittenen Stoss von 115 kV hatte dann eine Spulenbeschädigung zur Folge. Trotzdem hielt diese beschädigte Phase nachträglich noch einen vollständigen Stoss von 144 kV — 80 % über dem mittleren Niveau — bei erregter Wicklung, ohne jede abnorme Erscheinung zu zeigen, stand.

Der 2000-kVA-Transformator (17 Jahre alt) hielt die Stossprüfung mit 220 kV — 50 % Ueberschlagstoßspannung des mittleren Niveaus des Stationsmaterials — bei 100 Stössen pro Säule und gleichzeitiger Erregung auf der Unterspannungsseite, ohne feststellbare Beschädigung aus. Dabei ist zu beachten, dass die Stoßspannung bei den Versuchen an diesem Transformator infolge des Einschwingvorganges kurzzeitig auf etwas mehr als den doppelten Wert der eingestellten Stoßspannung angestiegen war. Trotz der grossen Steilheit des Spannungsanstieges (Abb. 7) und der damit verbundenen schärferen Beanspruchung konnte durch keine der üblichen elektrischen Messmethoden oder durch Abwickeln der Spulen eine Beschädigung am Transformator nachgewiesen werden.

Am 5000-kVA-Transformator (20 Jahre alt) wurde eine Phase mit einem steilen, durch Ueberschlag an der Durchführung abgeschnittenen Stoss von 440 kV (ankommende vollständige Stosswelle 680 kV) beansprucht. Mit keiner der üblichen Methoden konnte eine Beschädigung nachgewiesen werden. Bei gleichzeitiger Erregung der Wicklung mit Wechselspannung hielt eine weitere Phase einen vollständigen Stoss von 264 kV — 20 % über dem mittleren Niveau — 100mal ohne jede Störung aus, trotzdem diese, wie sich nachträglich zeigte, Beschädigungen aufwies, die vermutlich von Ueberspannungen während des langjährigen Betriebes herrühren.

Es scheint, dass insbesondere die Transformatoren kleiner Leistung auf Beanspruchung mit abgeschnittenen Stössen empfindlicher sind als auf solche mit vollständigen Stössen. Also wirkt sich der plötzliche Zusammenbruch der Spannung und die dadurch bedingte schlechtere Spannungsverteilung stärker aus als die zeitliche Verkürzung der Welle

⁵⁾ nach Tabelle VI max. Versuchsspannung.

und damit der Beanspruchung. Erfreulich ist die festgestellte relativ hohe Festigkeit aller vorliegenden alten Transformatoren, besonders wenn man sich die Tatsache vor Augen hält, dass die damaligen Entwicklungsarbeiten an Spulen bei sprungwellenmässiger Beanspruchung, nicht bei Beanspruchung mit den vorliegenden Stössen durchgeführt wurden.

Zur Frage des *Aufdeckens von Beschädigungen* während der Stossprüfung lässt sich folgendes zusammenfassend festhalten:

a) Stossdurchschläge unter Oel werden bei kleinen Strömen durch kleine rauchlose Blasen angezeigt. Kleine, etwa vorhandene verdrängte Lufteinschlüsse, die an die Oeloberfläche steigen, lassen sich deshalb kaum von Blasen unterscheiden, die von stromschwachen Durchschlägen herrühren.

b) Bei Stromstärken von einigen Ampere treten Rauchblasen an die Oeloberfläche, gleichgültig, ob es sich um reine Oeldurchschläge oder um Durchschläge, die z. T. in festem Material verlaufen, handelt.

Aus a) und b) folgt:

Blasenbildung an der Oeloberfläche als Indikator für Wicklungsdurchschläge zu benützen, scheint demnach etwas fragwürdig zu sein, weil auch kleine Blasen zur Beurteilung herangezogen werden müssen. Es lässt sich auch denken, dass nicht alle durch Entladungen gebildeten Blasen — insbesondere gerade die kleinen — an die Oberfläche steigen können, sondern dass solche von Konstruktionsteilen festgehalten werden. Damit wird eine sichere Beurteilung der Vorgänge bei der Stossprüfung weiterhin wesentlich erschwert. Bei Transformatoren hoher Spannung mit Expansionsgefäss kann der Oelspiegel aus konstruktiven Gründen überhaupt nicht beobachtet werden.

c) Durch die normale (nun verlassene) Sprungwellenprobe nach SEV mit $1,3 U$ kann kein Isolationsdefekt, herührend von Stossüber- oder Durchschlägen, nachgewiesen werden. Auch die übrigen normalen Proben am Transformator sind unempfindlich auf solche Beschädigungen.

d) Ein Ueberschlag zwischen den Lagen einer Spule an einem unter Wechselspannung stehenden Transformator, eingeleitet durch eine Stoßspannung, löscht von selbst. Der Transformator kann dann weiteren Stossbeanspruchungen, sogar gleicher Spannungshöhe, wieder ohne Störung standhalten.

e) Durch oszillographische Untersuchungen während der Stossprüfung lassen sich Defekte nicht eindeutig erkennen.

Aus c) und e) folgt:

Auch Kontrollmessungen während und nach den Stossprüfungen ergeben kein sicheres Bild über den tatsächlichen Isolationszustand des Transformators. Bevor an eine Stossprüfung geschritten werden darf, müsste also eine eindeutige Methode zur sichtbaren Fehleraufdeckung während der Prüfung des Transformators vorliegen.

Aus allen Untersuchungen folgt:

Die angewandten Methoden gewährleiten keinesfalls eine sichere Fehleraufdeckung. Man müsste heute bei einer regelmässigen Stossprüfung aller Transformatoren mit einer, wenn auch verhältnismässig geringen, Anzahl von Beschädigungen an den geprüften Transformatoren rechnen. Diese zum mindesten unerwünschten Beschädigungen würden sich vorläufig als unsichtbare und nicht feststellbare vorzeitige «Alterung» auswirken.

Wir sind der Ansicht, dass die guten Betriebserfahrungen während Jahrzehnten bei uns eine Einführung der Stossprüfung an abzuliefernden Transformatoren nicht als nötig erscheinen lassen.

Wir könnten auch, schon aus wirtschaftlichen Gründen, den in Abschnitt III erwähnten Weg [4], der bereits in Deutschland für vom Ausland verlangte Stossprüfungen beschränkt werden musste, nicht als richtig erachten:

«Die verlangten Stossprüfungen am fertigen Transformator werden durchgeführt, aber zum vornherein ist die Auswechslung der gestossenen Spulen gegen neue, der Stoßspannungsprüfung nicht unterzogene Spulen vorzusehen.»

Wir sind vielmehr der Meinung, dass die guten bisherigen Erfahrungen — auch unter Beachtung der erfreulichen Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen — folgenden Weg weisen:

Weitere sorgfältige Entwicklungsarbeit auf dem Gebiete der Stossbeanspruchung von Transformatoren.

Literatur

- [1] Regeln für elektrische Maschinen (einschliesslich Transformatoren), SREM. Aenderungen und Ergänzungen zur 1. Auflage. Publ. Nr. 108a des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, Zürich, 1940.
- [2] Norris, E. T.: Surge voltage tests of transformers. Electr. Wld. Bd. 96(1930), Nr. 26, S. 1187.
- [3] Bellaschi, P. L.: Impulse testing, a power-transformer routine. Sharon, Perm., 1945. Sonderdruck aus Westingh. Engr. Bd. 1945, Nr. 5.
- [4] Verbandes Deutscher Elektrotechniker, Bericht des —: Die Entwicklung der Elektrotechnik in der letzten Zeit: Transformatoren. Elektrotechn. Z. Bd. 62(1941), Nr. 31/32, S. 681...682.
- [5] Progress in engineering knowledge during 1945. Materials — design — application. Gen. electr. Rev. Bd. 49(1946), Nr. 2, S. 9...61.
- [6] Wellauer, M.: Die Uebertragung von Gewitterüberspannungen in Transformatoren. Bull. SEV Bd. 35(1944), Nr. 22, S. 627...632. Meyer, H.: Untersuchungen über die Uebertragung von Stossvorgängen in Transformatoren. Bull. SEV Bd. 36(1945), Nr. 14, S. 416...426.
- [7] Meyer, H.: Neuere Untersuchungen über die Stossbeanspruchung von Transformatoren und Spannungswandlern. Brown Boveri Mitt^o. Bd. 30(1943), Nr. 9/10, S. 275...278.

Adresse des Autors:

F. Beldi, Ingenieur, Burghalde 7, Baden (AG).