

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 48 (1957)
Heft: 18

Artikel: Messmethoden der Stossspannungsprüfung
Autor: Gänger, B.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060620>

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: 16.05.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Messmethoden der Stoßspannungsprüfung

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV am 7. März 1957 in Bern,
von B. Gänger, Baden

621.317.333.8

Die bei Stossvorgängen in der Hochspannungstechnik üblichen Messverfahren werden in einem Überblick dargestellt und die Wirkungsweise der hauptsächlichsten Messinstrumente beschrieben. Wegen des besonderen Interesses, das die Stoßprüfung von Transformatoren findet, wird auf diese etwas näher eingegangen.

Les méthodes de mesure utilisées en général lors des essais de choc en haute tension sont rapidement indiquées, et le fonctionnement des principaux instruments de mesure est décrit. L'essai de choc des transformateurs est étudié un peu plus en détail étant donné son intérêt particulier.

Wie jede Prüfung, so dient auch diejenige mit Stoss dem Nachweis gewisser Anforderungen an das zu prüfende Objekt. Oft wird sie im Rahmen einer Abnahme ausgeführt, deren Bedingungen entweder von den einschlägigen Regeln oder durch Abmachungen zwischen Abnehmer und Hersteller festgelegt sind. Von den hiebei angewandten Prüfmethoden wird verlangt, dass sie eine genaue Ermittlung der Garantiewerte zulassen, und dass sich der Ausgang der Prüfung, ob sie bestanden wurde oder nicht, zweifelsfrei feststellen lässt. Bedenkt man, dass sich die hier zu betrachtenden Stossvorgänge in Zeiten von Millionstelsekunden abspielen, so erkennt man, dass diese an und für sich selbstverständlichen Forderungen gar nicht immer leicht erfüllbar sind und es zur Wiedergabe der Einzelheiten des Ablaufs gewisser hochgezüchteter Messgeräte mit äusserst geringer Eigenträgheit bedarf.

Erste Forderung ist, den gewünschten Stoss mit der vorgeschriebenen Form, Dauer und Höhe zu erzeugen. Soweit der Stosskreis einfachen Aufbau besitzt und seine punktförmig konzentrierten und unveränderlich angenommenen Elemente als bekannt gelten dürfen, kann der stossartige Ausgleichvorgang beim Durchzünden der Funkenstrecken des Stossgenerators in verhältnismässig einfacher Weise berechnet werden und damit auch die Kennwerte des auf den Prüfling einwirkenden Stosses. Dagegen muss überall dort, wo die Eigenheiten des Prüflings unbekannt sind oder sich beim Stoss in nicht leicht fassbarer Weise ändern, der sich einstellende Ablauf des Stosses kenntlich gemacht werden. Früher, in den Anfangsjahren der Stosstechnik, hat man hiezu den Stossanstieg in seiner Steilheit, Dauer und Augenblickshöhe mühsam punktweise erfasst. Heute verwendet man fast allgemein den Hochleistungsoszillographen mit direkter Aufzeichnung des zeitlichen Ablaufs auf einem Leuchtschirm oder einem photographischen Film.

Als praktisch trägheitsfreier Lichtschreiber dient ein fein gebündelter Strahl schneller Elektronen. Je nach Strahlerzeugung spricht man von einem Kaltkathodenstrahloszillographen — die Elektronen entstehen in einer Glimmentladung vor einer kalten Kathode — oder einem sog. Glühelktronenstrahloszillographen — die Elektronen werden im Hochvakuum durch Glühemission erzeugt. In bezug auf Strahlhelligkeit und damit Schreibgeschwindigkeit konnten die später entwickelten Apparate mit thermischer Emission jene mit kalter Kathode einholen, vielleicht aber noch nicht ganz hinsichtlich Bildgrösse und Schriftfeinheit. Will man mehrere Vorgänge gleichzeitig aufnehmen, so können entweder durch optische Hilfsmittel die Schirmbilder mehrerer Einstrahlapparate zusammengefasst werden oder es werden bei den Kathodenstrahloszillographen bis zu 3 oder 4 parallele, für sich jedoch selbständige Einzelstrahlen im selben Rohr erzeugt. Fig. 1 zeigt die Ansicht eines modernen Zweistrahlgeräts mit kalter Kathode.

Die Oszillographen arbeiten durchwegs mit elektrostatischer Ablenkung. Hiebei durchläuft der Elektronenstrahl das Feld eines Kondensators, an dessen Platten eine der Messgrösse proportionale Spannung liegt. Die Messempfindlichkeit ist von der geometrischen Gestaltung und der Beschleunigungsspannung des Strahles abhängig; in einfacher Weise kann sie durch Anlegen einer bekannten Spannung und Ausmessen der Strahlablenkung bestimmt werden. Umgekehrt lässt sich bei bekannter Empfindlichkeit aus dem aufgezeichneten Verlauf die Höhe der am Meßsystem anliegenden Spannung sofort ermitteln. Zur Angabe der Hochspannung selbst bedarf es dann nur noch der Kenntnis der Teilerübersetzung.

Hohe Spannungen können dem Oszillographen nämlich nicht direkt zugeführt werden. Hiezu ist ein Untersetzer, ein Teiler, zwischen die auszumessende Hochspannung und den Oszillographen ein-

zuschalten. Man verwendet rein Ohmsche Widerstandsteiler, rein kapazitive Teiler oder auch gemischte Teiler, um nur die Hauptarten zu nennen. Alle haben Vorzüge und Nachteile, so dass heute eine Überlegenheit der einen oder anderen Ausführung nicht mit Sicherheit behauptet werden kann und auch von den Einzelheiten des Versuches und der Anordnung abhängen mag. In engem Zusammenbau mit einem Generator für sehr hohe Stoßspannungen zeigt Fig. 2 einen kapazitiv-ohmschen Teiler. Eine weitere Stossanlage ähnlicher Nenn-daten ist in Fig. 3 zu sehen.



Fig. 1

Transportabler Kathodenstrahloszillograph zur gleichzeitigen Aufnahme zweier Vorgänge

Oben unter der Schutzhaube die Kathode auf negativem Potential von 45 kV; im evakuierten Metallrohr befinden sich die Vorrichtungen zur Strahlfokussierung, die Mess- und Zeitplatten, ferner Leuchtschirm mit Beobachtungsfenster bzw. photographischer Film. Im Kasten selbst sind Hochspannungs- und Pumpanlage und die übrigen Hilfskreise untergebracht

Für eine grosse Zahl von Prüfungen bedarf es keiner anspruchsvoller Oszillographen, und es ist nur der Nachweis der geforderten Höhe der Spannung zu erbringen, so z. B. einer bestimmten Haltespannung im Isolationsniveau oder des Mindest- oder Höchstwertes einer Ansprech- oder Restspannung oder dgl. Oft pflegt man dazu wiederum die Hochspannung mittels Teiler auf einen leichter der Messung zugänglichen Wert zu verkleinern. Mehrere Ausführungen nach demselben Prinzip, nämlich der unverzögerten Aufladung eines kleinen Kondensators durch den Stoß und die Steuerung eines nachfolgenden, leicht messbaren Vorganges in Abhängigkeit von der erreichten Ladespannung

vermochten in letzter Zeit als «Spitzenspannungsmesser» steigende Beachtung zu gewinnen. In einfachster Form gelingt dies durch «Umladen»

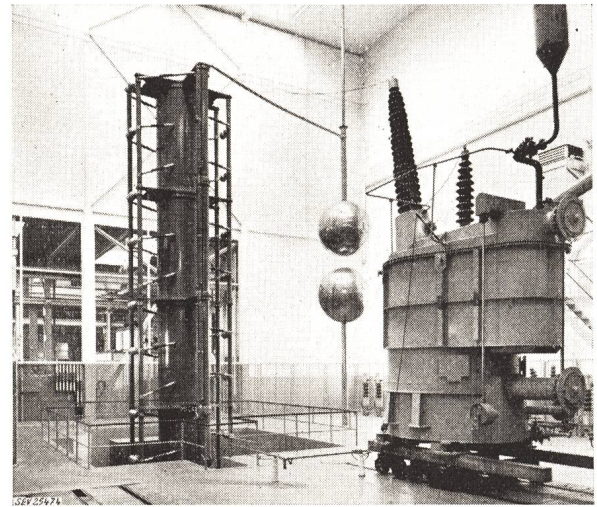


Fig. 2

16stufiger Stossgenerator für 3,6 MV Summenspannung und 100 kWs Nenn-Energieinhalt

mit Teiler, über Widerstand von 250 Ω angeschlossener grosser Messfunkenstrecke (Kugeln von 1750 mm Durchmesser), sowie Prüfobjekt, ein zur Stoßprüfung bereiter grosser Einphasentransformator. Zur Verringerung der Gebäudehöhe ist der Stossgenerator in einer Grube versenkt aufgestellt

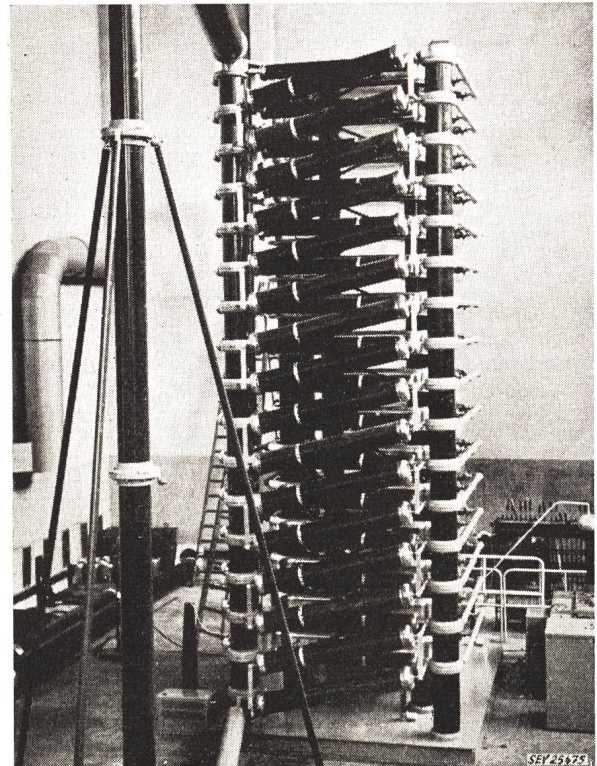


Fig. 3

Stossgenerator ähnlicher Nenndaten wie bei Fig. 2, des sogenannten Kesseltyps (die Stosskondensatoren sind in zugeschweissten flachen Metallkesseln eingeschlossen)
Im Vordergrund Teiler, seitlich Ladeanlage

(Fig. 4). Der Messkondensator C_m wird über eine Diode unverzögert, also selbst noch durch im Anstieg abgeschnittene Stösse auf den vollen Höchst-

wert der flüchtigen Spannung aufgeladen, anschliessend verteilt sich seine Ladung unter entsprechender Spannungserniedrigung auf beide Kondensatoren; im Endzustand wird die Spannung am elektrostatischen Spannungsmesser V abgelesen. Wesentliche Verbesserungen zur Erhöhung der Genauigkeit konnten neuerdings an der ETH bis zur praktischen Reife gebracht werden. Dabei wird die Impulshöhe in einer Röhrenschaltung in eine pro-

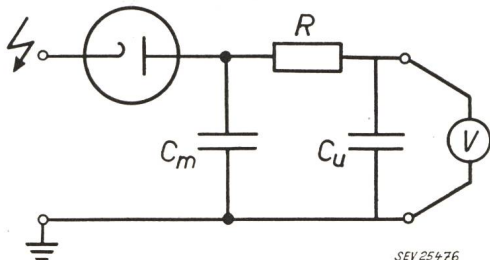


Fig. 4

Prinzipschaltung eines Spitzenspannungsmessers

Die Zeitkonstante des «Umladekreises» RC_u liegt weit oberhalb der Anstiegsdauer der auszumessenden Stoßspannung
 C_m Messkondensator ≈ 100 pF; C_u Zusatzkondensator;
 V elektrostatischer Spannungsmesser

portionale, vielfach grössere Dauer eines Stromes konstanter Stärke umgewandelt und diese Dauer durch eine elektronische Zählvorrichtung sofort nach jedem Stoss in Zahlenform angezeigt. Bei einer weiteren Ausführung wird das Umladeprinzip durch Hintereinanderschalten mehrerer RC -Glieder abgewandelt. Damit lässt sich der Forderung nach extrem hohem Sperrwiderstand der 1. Diode besser entgegenreten; auch kann die Ablesezeit am Anzeigeinstrument bis auf Minuten ausgedehnt werden.

Gegenüber den mehr konservativen Messfunkenstrecken bieten solche Geräte erhebliche Vorzüge. Dafür zeichnen sich die Funkenstrecken durch ihre prinzipielle Einfachheit und leicht kontrollierbare Arbeitsweise aus. Heute sind fast nur noch Kugelfunkenstrecken im Gebrauch, und nur noch selten Anordnungen mit anderen Elektrodenformen. Wegen der Eigenschaft der Gasentladung im näherungsweise homogenen Feld, schon bei mässiger Überhöhung der Spannung über den Wert der stationären Durchschlagspannung in äusserst kurzer Zeit den Durchschlagfunken auszubilden, eignen sich Kugeln in mässigem Abstand gut zur Messung des auch nur kurze Zeit andauernden Höchstwertes eines Spannungsstosses. Bekanntlich besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Durchschlagspannung und Schlagweite (unter Berücksichtigung der jeweiligen Luftdichte). In Eichtafeln findet man diese Werte auf Grund früherer sorgfältiger Messungen zusammengestellt. Wegen der statistischen Natur der Elementarprozesse, die bei der Funkenentstehung mitwirken, gibt es allerdings «die Durchschlagspannung» nicht; in den Tabellen ist der 50%-Ansprechwert verzeichnet, d. h. jene Spannung, deren oftmalige Anwendung im Mittel bei der Hälfte der Stösse zum Durchschlag führt.

Ausser der Stoßspannung ist manchmal auch die Kenntnis anderer Grössen erwünscht, wie etwa Höchstwert und Verlauf von Teil- oder Sekundär-

spannungen an Wicklungen oder Transformatoren, von Strömen, der Stoss polarität und dgl. Hiefür eignet sich der Hochleistungsoszillograph vorzüglich. Zu hohe Spannungen werden durch Teiler herabgesetzt. Ströme werden durch Einschalten von Messwiderständen in den Leitungszug in proportionale Spannungen umgewandelt.

Die Überwachung des Stossablaufs stösst auf keine Schwierigkeiten, wenn der Bereich hohen Feldes leicht eingesehen werden kann und somit Durch- oder Überschlüge durch die damit verbundene Lichtaussendung und den Knall ohne weiteres festgestellt werden können. Solches trifft zu bei der Prüfung freier Luftabstände, etwa von Schutzfunkenstrecken, Stütz- oder Hängeisolatoren, den Schlagweiten zwischen den Phasen, oft auch bei Durchschlägen unter Öl. Sind dagegen die Isolierstrecken der direkten Beobachtung entzogen, so kann man sich manchmal durch Einschalten eines Widerstandes in die Stosszu- oder Rückleitung mit paralleler Anzeigefunkenstrecke helfen. Diese primitive Vorrichtung bietet keine Gewähr für die sichere Anzeige von Innenentladungen, weil die Einstellung der Funkenstrecke recht kritisch ist. Völlige Sicherheit über den Ausgang der Prüfung gibt dann nur der Oszillograph. Für die überwiegende Mehrzahl der Prüfobjekte genügt es dabei, den Verlauf der Stoßspannung zu beobachten, ob sie ungestört bleibt oder etwa durch einen Überschlagn abgeschnitten wird. Bei Anordnungen mit überwiegend fester Innenisolation oder von kompliziertem Aufbau, ebenfalls dann, wenn Vorentladungen festgestellt werden sollen, die ja nicht zu einem Zusammenbruch der Prüfspannung führen, emp-

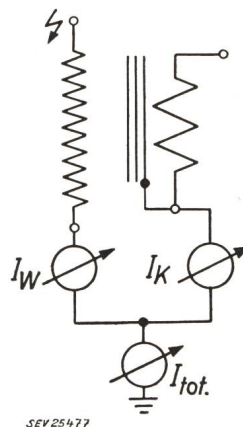


Fig. 5

Schema der Stromerfassung bei der Stossprüfung von Transformatoren

I_W Wicklungsstrom (Strom in der Erdleitung der gestossenen Wicklung); I_K Kesselstrom;
 $I_{tot.}$ gesamter Stoßstrom

fiehlt es sich, auch den Stoßstrom zu registrieren. Bei Ableitern, deren Restspannung in hohem Grad vom durchgehenden Stoßstrom abhängt, ist die Aufnahme der Strom-Spannungs-Charakteristik üblich. Bei der Prüfung von Transformatoren benötigt man die Stromaufzeichnung zur Deutung des Prüfausganges. Hierbei wird im allgemeinen der Erfassung des sog. Wicklungsstromes der Vorzug gegeben (Fig. 5), doch bringen auch andere Grössen wie der über Eisenkern und Sekundärwicklungen abfließende «Kesselstrom», der Gesamtstrom oder der Strom über die Wicklung einer Nachbarphase oder auch eine Sekundärspannung den Defekt meist ebenso gut zur Anzeige. Die Form der Ströme hängt

ab von der Art der Wicklung, ob Spulen- oder Lagenwicklung, ferner von der konstruktiven Anordnung, ob es sich um einen einfachen Transformator mit nur 2 Wicklungen oder um einen Mehrwicklungstransformator mit ineinander verschachtelten Wicklungen handelt, ferner von der Belastung der Sekundärseite. Zur Verhütung unzulässig hoher Spannungen werden diese ja bei der Prüfung mit Widerständen überbrückt. Die Scheibenspulenwicklung z. B. eines Zweiwicklers ohne besonderen Regelteil liefert Oszillogramme mit klarer Ausprägung der Laufzeitvorgänge (Fig. 6). Deutlich zeichnen sich die Reflexionen der Wellenzüge am Ende und am Eingang ab. Die dadurch hervorgerufenen Belastungsänderungen tun sich durch verstärktes Absinken der Eingangsspannung nach jeweils doppelter Durchlaufzeit kund. Bei einer Lagenwicklung dagegen mit ihrer sehr kräftigen Kopplung

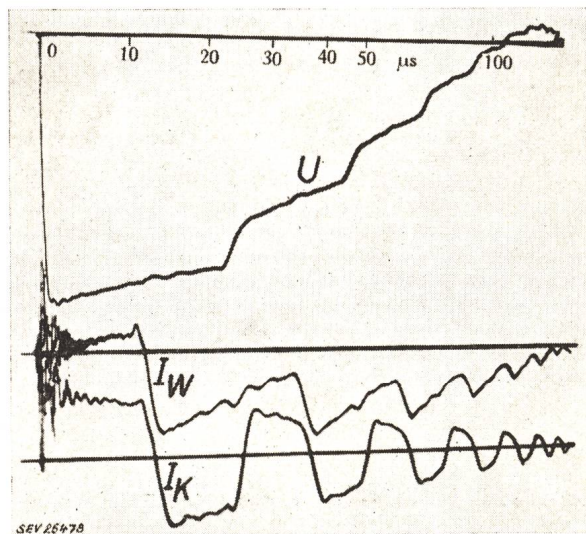


Fig. 6

Oszillogramm der Stossgrößen bei der Prüfung eines einfachen Zweiwicklungstransformators

U Stoßspannung; I_W Wicklungsstrom; I_K Kesselstrom

aufeinanderfolgender Lagen ist die Anfangsverteilung der Spannung weit gleichmässiger als bei der in sich feiner unterteilten und damit homogenen Spulenwicklung. Jetzt ist bereits gleich von Stossbeginn an auch in Endnähe eine Spannung wirksam. Der zeitliche Verlauf des damit verbundenen Stromes hängt in schwer übersehbarer Weise von den internen Ausgleichvorgängen in und zwischen den einzelnen Lagen ab. So erhält man bei Lagenwicklungen am Ende der gestossenen Wicklung und auch gegen Eisen einen stark oszillierenden Strom ohne prägnante Abbildung der Laufzeiteffekte (Fig. 7).

Für die Prüfung ist es allerdings ohne Belang, wie im einzelnen die Ströme verlaufen. Wichtig ist nur, dass sie sich genau proportional zur Stoßspannung ändern. Ein Isolationsfehler (Fig. 8) zeigt sich unverkennbar an durch eine Nichtlinearität mit Veränderung der charakteristischen Form der Messgrößen. Ausser dieser späteren induktiven Veränderung bewirkt die Funkenüberbrückung zweier auf verschiedenem Potential befindlicher Teile des

Transformators — alle Stossdefekte vollziehen sich über einen Funken — eine momentane Störung des Potentials gegen Erde, die durch hochfrequente Störschwingungen im selben Moment angezeigt werden. Die Aufnahmetechnik ist so einzurichten,

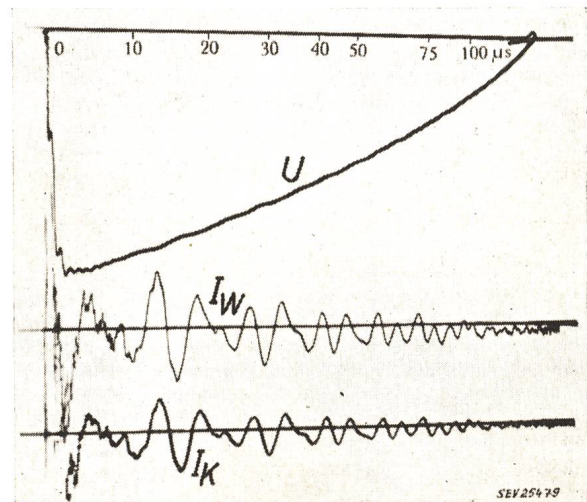


Fig. 7

Oszillogramm der Stossgrößen bei der Prüfung eines Transformators mit Lagenwicklung
Bezeichnungen siehe Fig. 6

dass sowohl diese Momentanstörungen des Stossablaufs als auch die späteren bleibenden Veränderungen im Strom-, meist auch im Spannungsverlauf klar angezeigt werden. Die Erfahrung hat nun gelehrt, dass auch bei den sog. abgeschnittenen Stößen, also bei der Beanspruchung des Transforma-

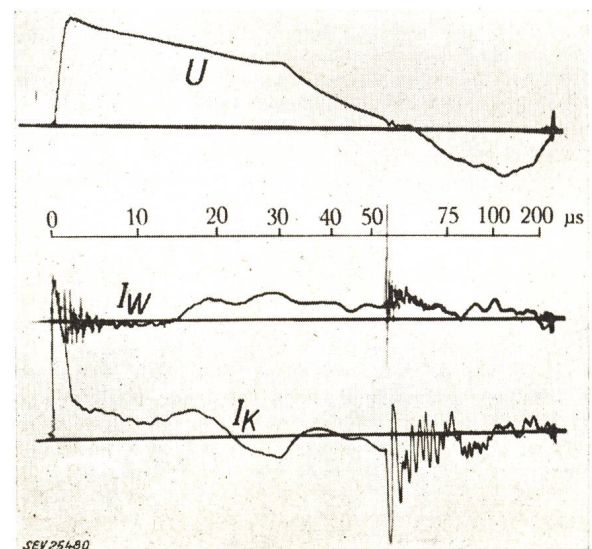


Fig. 8

Kathodenstrahloszillogramm mit Aufzeichnung eines späten Defektes
Bezeichnungen siehe Fig. 6

tors mit Spannungen, die durch eine Parallelfunkentrecke nach einer gewissen Zeit kurzgeschlossen werden, die Methode des Stoßstromvergleichs sehr befriedigende Resultate liefert, ganz im Gegensatz zu älteren Angaben.

Stören mag gelegentlich der Zeitbedarf für das Entwickeln der Oszillogramme und den sorgfältigen Vergleich der Prüfstösse mit den zuvorgehenden «Referenzstössen» verminderter Spannung. Auch

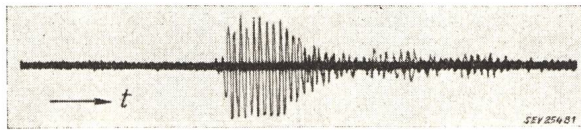


Fig. 9

Aufzeichnung des Öldruckindikators bei einem Stossdefekt
t Zeit

verlangt die hochwertige Messeinrichtung geschultes Personal zu ihrer Bedienung und zum Auswerten der Aufzeichnungen. Hier vermag ein speziell für die Prüfung ölisolierter Transformatoren ge-

schaffenes Kontrollgerät Abhilfe zu bringen. Nachdem jeder Defekt an die Bildung eines Funkens geknüpft ist und hiebei Druckstösse im flüssigen Medium entstehen, lag es nahe, eine hochempfindliche Sonde in das Öl einzuführen und die von dieser abgenommenen Spannungsschwankungen nach Verstärken sichtbar zu machen. Der so gegebene Öldruckindikator kommt mit einem der bekannten Kleinoszillographen zur Niederschrift der Vorgänge aus. Daneben wird die Bewegung des Lichtzeigers beim Stoss auch beobachtet. Das Ergebnis der Prüfung ist dann sofort bekannt. Fig. 9 zeigt eine Aufnahme mit dem Indikator bei einem Stossdefekt. Sogar bei abgeschnittenen Stössen ermöglicht der Indikator eine sichere Beurteilung des Prüfausganges.

Adresse des Autors:

Dr.-Ing. B. Gänger, A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Einige Betrachtungen zur Stoßspannungsfestigkeit der Transformatoren

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV am 7. März 1957 in Bern,
von M. Wellauer, Zürich

621.317.333.8 : 621.314.21

Nach der einleitenden Feststellung über den Fortschritt, den die Stoßspannungsprüfung der Transformatoren mit sich bringt, gibt der Verfasser einen kurzen Überblick über die Anforderungen an die Isolation der Wicklungen durch die Stoßspannungsbeanspruchung. Anschliessend werden einige wichtige Konstruktionsmassnahmen beschrieben, die ergriffen werden können, um diesen Anforderungen gerecht zu werden.

L'auteur commence par démontrer les progrès qu'apportent les essais de tension de choc des transformateurs, puis donne un court aperçu sur les exigences imposées aux isolations des enroulements par les sollicitations dues à la tension de choc. Ensuite quelques données constructives importantes permettant d'atteindre ces exigences sont décrites.

Die in den Koordinationsregeln und in den Regeln für Transformatoren des SEV verlangten Stossalterspannungen stellen beträchtliche Anforderungen an die Hersteller der Transformatoren.

In allen Firmen wurden umfangreiche Untersuchungen und Forschungen gemacht, damit die schweizerischen Konstruktionen, die aus bekannten Gründen nicht überdimensioniert sind, dieser neuen Prüfung entsprechen. Man darf heute sagen, dass nach einigen anfänglichen Schwierigkeiten dieses Ziel erreicht wurde, ohne zu einer Typen- bzw. zu einer Preiserhöhung zu führen.

In Anbetracht dessen, dass so hohe Überspannungen, wie sie die Stoßspannungsprüfung wiedergibt, in den meisten örtlichen Lagen überhaupt nicht und an wenigen Lagen nur äusserst selten auftreten, darf man stossgeprüfte Transformatoren als sehr betriebssicher und damit die neuen Prüfungen als einen Fortschritt zu grösserer Betriebssicherheit ansehen.

Einen grossen Gewinn bedeutet die Stoßspannungsprüfung auch insofern, als sie eine äusserst scharfe Fabrikationskontrolle darstellt, die viel strenger aber auch zuverlässiger ist als die bisherige Windungsprobe.

Es sollen nun einige Gesichtspunkte behandelt werden, die zu diesem Resultat geführt haben.

Die elektrische Beanspruchung der Isolation in Transformatoren, die bei der Stoßspannungsprüfung entsteht, ist heute durch die Untersuchungen an ausgeführten Transformatoren gut bekannt. Massgebend ist die Spannungsverteilung, die den

zeitlichen Verlauf der Spannung in jeder Spule der Wicklung gegen Erde angibt und sie soll deshalb zum Ausgangspunkt der folgenden Betrachtungen gemacht werden.

Im ersten Augenblick, beim Aufbau der Front am Wicklungseingang, stellt sich in der Wicklung die Anfangsspannungsverteilung ein. Der Verlauf dieser Anfangsverteilung hängt von der Wurzel des Verhältnisses der Kapazität gegen Erde C der ganzen geprüften Wicklung, der sog. Querkapazität, zur Längskapazität K , das ist die Kapazität der ersten zur letzten Spule der Wicklung, also vom Verhältnis $\sqrt{C/K}$ ab. Da die Querkapazität C bei normalen Scheibenspulenwicklungen immer sehr viel grösser ist als die Längskapazität K , beträgt der Zahlenwert der Wurzel 10...20. Dies bedingt eine Anfangsspannungsverteilung in einer gewöhnlichen Scheibenspulenwicklung, wie dies die Linie AV der Fig. 1 zeigt. Man entnimmt aus ihrem Verlauf, dass die ganze Stoßspannung im ersten Augenblick an den ersten 10...20 % der Windungen liegt. Daraus resultiert ein grosser Potentialgradient und dementsprechend grosse Spannungen zwischen den Scheibenspulen in diesem Bereich. Dieser ungünstige Verlauf der Anfangsspannungsverteilung ist grundlegend für das weitere Verhalten der Wicklung.

In einem späteren Zeitpunkt der Stoßspannung verhält sich eine Transformatorenwicklung wie eine Induktivität und der Spannungsverlauf, die sog. Endspannungsverteilung, ist linear und wird durch die Linie EV (Fig. 1) wiedergegeben. Der zeitliche Übergang von der Anfangsspannungsver-