Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 48 (1957)

Heft: 18

Artikel: Einige Betrachtungen zur Stossspannungsfestigkeit der Transformatoren

Autor: Wellauer, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058692

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: 15.12.2025

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

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

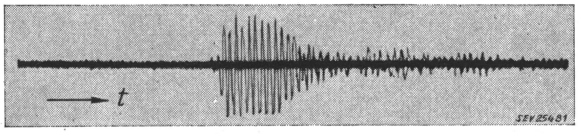

Fig. 9
Aufzeichnung des Öldruckindikators bei einem Stossdefekt
t Zeit

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

teilung zur Endspannungsverteilung erfolgt nun durch eine grosse Anzahl von Eigenschwingungen der Wicklung mit verschiedenen Frequenzen, so dass die Spannungen der Wicklungspunkte gegen Erde in jedem Augenblick eine andere Spannungsverteilung ergeben, wie dies die Kurven bei 9, 18, 28, 50, 80 und 110 µs zeigen. Verbindet man die Höchstwerte dieser Spannungen, so erhält man eine Hüllkurve *H*, die die höchsten Spannungswerte in der Wicklung gegen Erde in einem beliebigen Zeitpunkt angibt. Die Spannungen der Hüllkurve treten also im Gegensatz zu den anderen angegebenen Spannungsverläufen nicht im gleichen Zeitpunkt auf.

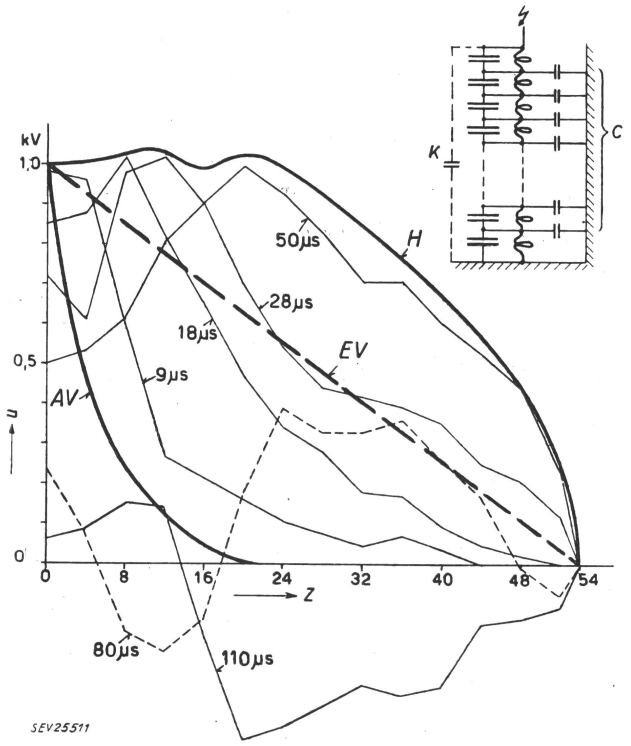

Fig. 1
Stoßspannungsverteilung in einer Scheibenspulenwicklung bei Beanspruchung mit einer Stoßspannung von 1|50 µs

u Spannung; *Z* Nummer der Spule; *AV* Anfangsspannungsverteilung; *EV* Endspannungsverteilung; *H* Hüllkurve; Spannungsverlauf der Spannungen gegen Erde auf der Wicklung nach 9, 18, 28, 50, 80 und 110 µs
K Längskapazität der Wicklung; *C* Querkapazität der Wicklung

Dieser eben beschriebene Ausgleichvorgang lässt sich vergleichen mit den Schwingungen eines am Anfang und am Ende fest eingespannten Gummiseiles, dessen Anfangslage genau derjenigen einer Anfangsspannungsverteilung entspricht, wenn das Seil plötzlich freigelassen wird. Das Gummiseil wird emporschnellen und nach vielen Schwingungen eine gerade Linie, die der Endspannungsverteilung *EV* entspricht, zwischen den eingespannten Enden annehmen.

Die Hüllkurve zeigt, dass bei normalen Scheibenspulenwicklungen die Hauptisolation, das heisst die Isolation gegen die anderen Wicklungen und gegen Erde, meistens noch um 5...15 % höher beansprucht wird als mit dem Scheitelwert der angewandten Stoßspannung. Ein weiterer ungünstiger Umstand liegt in dem raschen Abfall der Hüllkurve in der Nähe des geerdeten Endes der Wicklung. Nebenbei bemerkt ist dies ein Punkt, wo die Stossprüfung gemäss den Regeln den Betriebsverhältnissen nicht entspricht, wenn der Transformator mit isoliertem Sternpunkt betrieben wird. Bei Transformatoren mit isoliertem Sternpunkt, der jedoch herausgeführt ist, wird dieser bei der Stoßspannungsprüfung geerdet und die Hüllkurve der Spannungen entspricht der in der Figur gezeigten. Tatsächlich wird jedoch die Wicklung im Betrieb nicht so hoch beansprucht, weil die Hüllkurve sich auch über die Wicklungen der anderen Phasen erstreckt, wodurch die Beanspruchungen längs den Spulen wesentlich kleiner werden.

Da die Ausgleichschwingungen den Übergang von der *AV*- zur *EV*-Kurve herbeiführen, sind sie um so kleiner, je weniger die Anfangsspannungsverteilung von der linearen Endspannungsverteilung abweicht. Eine Transformatorenwicklung mit einer günstigen, das heisst flachen Anfangspannungsverteilung, wird nicht nur kleinere Gradienten am Wicklungsanfang, sondern auch eine niedrigere Hüllkurve, das heisst weniger hohe Spannungen im Streukanal und einen weniger steilen Abfall gegen das Wicklungsende aufweisen.

Betrachtet man nun die Massnahmen, die der Konstrukteur ergreift, um diese in verschiedener Beziehung ungünstigen und hohen Beanspruchungen bei der Stoßprüfung zu beherrschen, so unterscheiden sich diese Massnahmen im Streukanal grundsätzlich nicht von den Konstruktionen, die schon vor der Einführung der Stoßspannungsprüfung angewendet wurden, jedoch mit vermehrtem Nachdruck auf sorgfältige Vermeidung von hohen Beanspruchungen längs der Isolierschichten, wie sie zum Beispiel an scharfen Kanten entstehen. Geschichtetes Material ist bei der Isolierung von Transformatoren nicht zu vermeiden, man denke nur an Hartpapierzylinder, an Preßspan- und Papierlagen. Da es sich gezeigt hat, dass die Stossfestigkeit längs der Schichten nicht grösser ist als die Wechselspannungsfestigkeit, der Scheitelwert der Stossprüfspannung jedoch wesentlicher höher ist als der Scheitelwert der 50-Hz-Prüfspannung, liegt die Gefahr auf der Hand. Man muss die Formgebung so gestalten, dass die Isolierschichten möglichst senkrecht zum elektrischen Feld liegen, unter möglichster Vermeidung von Spitzen. Da scharfe Kanten nicht zu vermeiden sind, zum Beispiel an Anzapfstellen und Regelschaltern, verwendet man mehr als früher das bekannte Prinzip der vorgeschobenen Elektroden, die selbst gut mit Papier isoliert werden. Da die notwendige Formgebung der Isolation bei Verwendung von Preßspan und Papier bessere Möglichkeiten bietet, geht die Tendenz dahin, diese Materialien zu bevorzugen.

Es ist jedoch notwendig, um die günstigen Eigenschaften dieser Materialien auszunützen, dass die Transformatoren äusserst sorgfältig getrocknet und imprägniert werden. In dieser Beziehung ist dieses Material viel anspruchsvoller als beim früheren Aufbau aus Hartpapierzylindern und Öl, und hat auch den Nachteil, dass bei Reparaturen und bei langen

Transportwegen auf die höheren Anforderungen Rücksicht genommen werden muss. Der Transport unter Öl ist zur Notwendigkeit geworden.

Ein anderer wichtiger Teil der Hauptisolation ist die Einführung der Klemme und deren Verbindung mit der Wicklung. Auch bei diesem Konstruktionsteil erweist sich die Verwendung von Preßspan als äusserst vorteilhaft, da es möglich ist, aus diesem Material Formstücke wie zum Beispiel Röhren mit Flanschen herzustellen, um wiederum die Ölschichten senkrecht zum elektrischen Feld zu unterteilen. Glücklicherweise haben Ölschichten, die senkrecht zum elektrischen Feld genügend fein unterteilt sind, eine sehr hohe Stossfestigkeit, wodurch es möglich ist, die hohen Beanspruchungen in der Hauptisolation zu beherrschen.

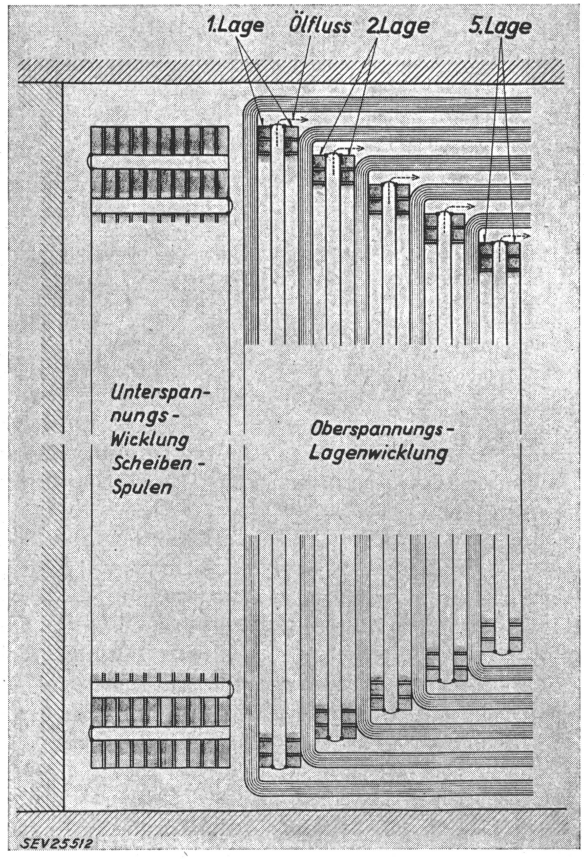

Fig. 2
Transformatorwicklung mit Lagenspulen

Füllt man den Streukanal vollständig mit Papierschichten aus, verwendet man also die sogenannte feste Isolation, so erhält man selbst bei einer Reduktion der Dicke des Streukanals eine sehr hohe Sicherheit gegen Stoss. Voraussetzung für diese Konstruktion ist jedoch, dass grössere Ölkanäle besonders an der Oberfläche des Wicklungskörpers vermieden werden, damit keine Glimmentladungen und dadurch die Gefahr eines späteren Durchschlages entsteht. Sind jedoch solche Ölkanäle zur Kühlung notwendig, so müssen sie elektrisch entlastet werden. Aus diesen Gründen kann die hervorragende elektrische Festigkeit des Papiers im Transformatorenbau nicht voll ausgenützt werden.

Eine ideale Anordnung in bezug auf die Spannungsbeanspruchung bei Stoßspannung ergibt sich bei der Lagenwicklung, im Besonderen auch dann, wenn jede Lage in zwei parallel geschaltete Wicklungszylinder unterteilt ist (Fig. 2). Die elektrische Beanspruchung liegt vollständig im Papierkörper. Das Öl ist elektrisch ganz entlastet und dient nur der Kühlung.

Dass die Lagenwicklung in bezug auf Stossbeanspruchung hervorragende Eigenschaften hat, erkennt man sofort, wenn man die eingangs angestellten Betrachtungen auf sie anwendet. Die Kapazität zwischen den Lagenspulen, die Längskapazität K, ist gross im Verhältnis zur Erdkapazität C dieser Spulen, denn die äusserste Spulenlage oder ein statischer Schirm und innerste Spulenlage schirmen die inneren Lagen vollständig gegen Erde ab. Die Verhältnisse sind also gerade umgekehrt wie bei der Scheibenspulenwicklung. Da die Anfangsspannungsverteilung um so besser ist, je kleiner das Verhältnis von $\sqrt{C/K}$, und dieses Verhältnis bei einer Lagenwicklung kleiner als eins wird, gegenüber 10...20 bei der Scheibenspulenwicklung, erhält man eine praktisch lineare Anfangsverteilung, die mit der Endverteilung fast zusammen fällt. Die Wicklung wird vollständig schwingungsfrei. Fig. 3 zeigt die gemessene Hüllkurve an einem 225-kV-Transformator und Fig. 4 den aktiven Teil eines dieser Transformatoren.

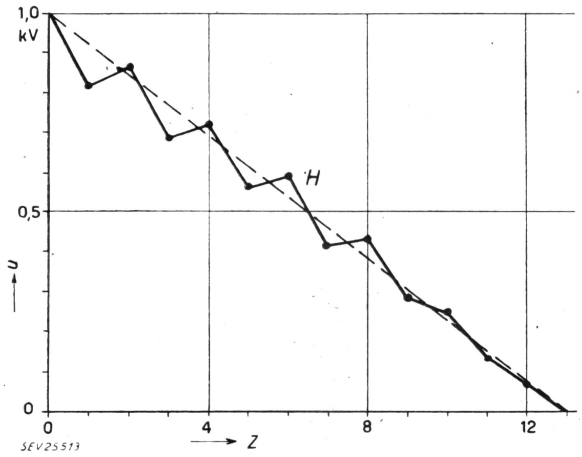

Fig. 3
Stoßspannungsverteilung in der Wicklung des Transformators in Fig. 4 bei Beanspruchung mit einer Stoßspannung 1|50 µs
u Spannung; Z Lagenzahl; H Hüllkurve

Wie das Beispiel der Lagenwicklung zeigt, ist der beste Weg zur Beherrschung der hohen Beanspruchungen bei einer ungünstigen Anfangsspannungsverteilung der, dass man diese selbst radikal verbessert. Für Spannungen bis etwa 220 kV ergibt jedoch die Lagenwicklung gegenüber der Scheibenspulenwicklung etwas grössere Abmessungen und Gewichte, und man hat diese Wicklungsart aus diesem Grunde in der Schweiz relativ wenig oder nur in gewissen Wicklungsteilen angewendet. Bei wesentlich höheren Spannungen dürfte jedoch die Lagenwicklung infolge ihrer Eigenschaften, auch in bezug auf Kurzschlussfestigkeit, gute Aussichten auf vermehrte Anwendung haben.

Man hat intensiv nach Möglichkeiten gesucht, die Stosseigenschaften der Scheibenspulenwicklung zu verbessern. Die seit langer Zeit bekannten statischen Schirme sind unwirtschaftlich und bei gewissen Anordnungen, zum Beispiel bei doppelkonzentrischen Wicklungen, kaum anwendbar.

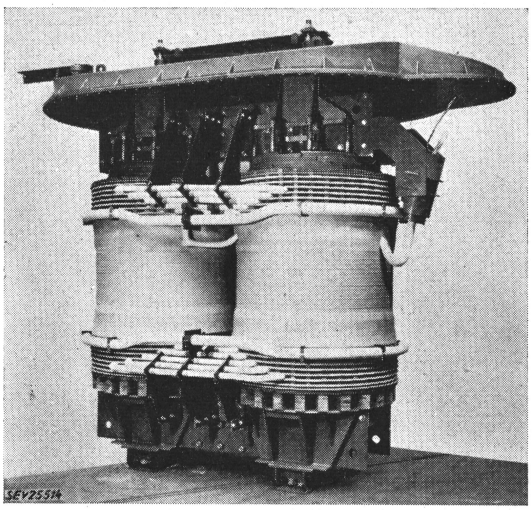

Fig. 4
Aktiver Teil eines Einphasentransformators 10/225 kV mit Lagenwicklung

Seit einigen Jahren ist nun ein neuer, sehr wirtschaftlicher Weg bekannt geworden, wie durch eine neue Wicklungsart eine starke Vergrösserung der Längskapazität K und damit das Ziel einer besseren Spannungsverteilung in einer Scheibenspulenwicklung erreicht werden kann. Man bezeichnet diese Wicklungsart mit «Verschachtelung der Windungen». Fig. 5 zeigt die Anfangsspannungsverteilung AV und die Hüllkurve H einer verschachtelten Scheibenspulenwicklung. Das Wesen der Verschachtelung zeigt ein Schnitt durch zwei normale a und zwei verschachtelte b Doppelspulen. Im Fall a wird so gewickelt, dass die aufeinander folgenden Windungen 1, 2, 3, bis 10 nebeneinander liegen. Die Längskapazität K_s einer solchen Doppelspule kann man sich zwischen die erste Windung 1 und die letzte Windung 10 konzentriert denken. Sie ist nicht viel grösser als die Kapazität zwischen der 1. und 10. Windung. Die übrigen Windungskapazitäten sind wenig wirksam. Bei verschachtelten Windungen ist beispielsweise die Reihenfolge der nebeneinander liegenden Windungen 1, 6, 2, 7, 3, 8, 4, 9, 5, 10, usw. Durch diese Vermischung wird die Längskapazität K_s einer Doppelspule ein Vielfaches einer gewöhnlichen Doppelspule bei sonst gleichen Abmessungen und Kühlverhältnissen.

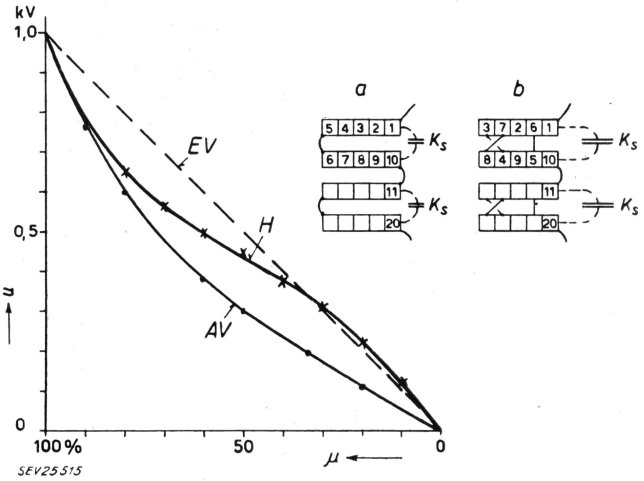

Fig. 5
Stoßspannungsverteilung in einer Wicklung mit verschachtelten Scheibenspulen
Stoßspannung 1|50 μs
u Spannung; μ prozentuale Verteilung; AV Anfangsspannungsverteilung; EV Endspannungsverteilung; H Hüllkurve; a normale Wicklungsart; b verschachtelte Wicklungsart; K_s Längskapazität einer Doppelspule

Die Verschachtelung bedeutet einen grossen Fortschritt, denn durch sie ist die Scheibenspulenwicklung wieder stark aufgewertet und ihre Anwendung, die in vielen Fällen und gerade bei komplizierten Wicklungen sehr vorteilhaft ist, wieder bei den höchsten Spannungen interessant geworden.

Es ist leider nicht möglich, hier auf nähere Einzelheiten einzugehen. Man kann nur betonen, dass die Hersteller heute der Stoßspannungsbeanspruchung mit verschiedenen Massnahmen begegnen und eine Anzahl von Anordnungen zur Verfügung haben, die den gestellten Anforderungen entsprechend angewendet werden können.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *M. Wellauer*, Maschinenfabrik Oerlikon, Zürich 50.

Diskussionsbeiträge

Dr.-Ing. A. J. Ess, Emil Haefely & Cie. A.-G., Basel: Das in der Emil Haefely & Cie. A.-G., Basel, entwickelte Stossvoltmeter dient zur Messung des Scheitelwertes von einmaligen, flüchtigen Vorgängen, d. h. nicht wiederkehrenden Spannungsimpulsen, im besonderen von Stoßspannungen (Fig. 1). Das Schaltschema des Apparates zeigt Fig. 2. Die Funktion beruht auf dem Prinzip der Impulsspeicherung. Der zu messende Spannungsimpuls lädt über eine Diode einen kleinen Kondensator C_1 auf. Der maximale Durchlaßstrom der Diode ist durch deren Charakteristik gegeben und kann nicht beliebig erhöht werden. Da dieser Strom ungefähr proportional der aufzuladenden Kapazität und dV/dt ist, so ist bei gegebenem dV/dt C_1 bestimmt. Die exakte Theorie ist in der Dissertation von E. Trümpy (ETH) beschrieben. Wenn der zu messende Impuls abgeklungen ist, entlädt sich der Kondensator auf die gesperrte Diode, ihren Sperrwiderstand und den Isolationswiderstand der Schaltung. Bevor aber die Ladung merklich abgenommen hat, wird ein zweiter Kondensator C_2 über eine Röhre und eine weitere Diode aufgeladen. Da C_2 grösser ist als C_1, wird auch bei gegebenem Durchlassstrom der Röhre und der Diode und bei gegebener Impulsamplitude zur Aufladung von C_2 mehr Zeit benötigt. Aus demselben Grund ist auch die Entladezeitkonstante von C_2 entsprechend grösser. Die gleichen Überlegungen gelten für den noch grösseren Kondensator C_3, welcher so gross gewählt ist, dass seine Entladezeitkonstante einige Minuten beträgt. Während dieser Zeit kann die Ladung von C_3 mit einem eingebauten Röhrenvoltmeter gemessen werden. Der Zeiger