

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 54 (1963)

Heft: 22

Artikel: Über einige Messwandlerprobleme

Autor: Ringger, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916528>

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: 17.02.2026

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

Über einige Messwandlerprobleme

Von W. Ringger, Basel

621.314.22.08

Das Feuchtwerden älterer, nicht luftdicht abgeschlossener Messwandler und die dadurch bedingte Abnahme der Betriebssicherheit wird beschrieben. Dann wird das Problem der Ionisationsmessung besprochen und zuletzt noch ein Vergleich zwischen magnetischem und kapazitivem Spannungswandler angestellt.

Aus den zahlreichen Messwandlerproblemen, mit denen sich heute die Konstrukteure wie auch die Betriebsingenieure von Hochspannungsnetzen zu beschäftigen haben, sollen drei herausgegriffen und hier kurz beschrieben werden. Es handelt sich um Probleme allgemeiner Bedeutung.

1. Der im Betrieb feucht gewordene Wandler

In den letzten Jahren haben sich an verschiedenen Orten Wandlerexplosionen ereignet, die eindeutig auf die in die Apparate eingedrungene Feuchtigkeit zurückgeführt werden konnten. Dabei handelt es sich meistens nicht um die ältesten Messwandler, die seit 30 Jahren und mehr im Betrieb stehen, sondern um 10- bis 20jährige Einheiten. Wie ist das zu erklären?

Da ein Messwandler nichts anderes ist als ein besonderer Transformator, sind die ersten Wandlertypen ziemlich genau der damals üblichen Transformatoren-Konstruktion entsprechend ausgeführt worden. Die Öl-Barriären-Konstruktion wurde allgemein angewendet. Diese Art Isolation, die in den letzten 10 bis 15 Jahren ebenfalls eine grosse Entwicklung durchgemacht hat, wird von den meisten Transformatoren-Fabrikanten auch heute noch ausgeführt. Im Wandlerbau aber hat man sie verlassen und ist allgemein zu der sog. Ölpapier- oder Kabelisolation übergegangen.

Fig. 1 zeigt einen älteren Stromwandler von 150 kV der Öl-Barriären-Konstruktion. Die Isolierzylinder 7 unterteilen die Ölstrecke zwischen Primär- und Sekundärwicklung. Eine ähnliche Unterteilung wird in der Enddistanz durch die Isolierkragen 10 und zwischen Primär-Zuleitungen und Kessel durch die Isolierzylinder 5 erreicht. Dies zur Erhöhung der Durch- oder Überschlagsspannung der entsprechenden Isolierstrecken. Die Isolierzylinder waren meistens aus Hartpapier und die Enddistanzklötze sowie die Isolierkragen aus Transformerboard. Dank der mässigen Beanspruchung des Dielektrikums konnten die Isolierstrecken derart bemessen werden, dass sich überall reichliche Ölkäne ergaben. Auch war der totale Ölinhalt dieser Wandler verhältnismässig gross.

Fig. 2 zeigt einen Stromwandler von 150 kV heutiger Bauart mit Ölpapier-Isolation. Die Primärwicklung 9 ist ge-

La présence d'humidité dans les transformateurs de mesure sans fermeture étanche et son influence sur la sécurité de fonctionnement est discutée. Le problème de la ionisation est ensuite évoqué et une comparaison entre le transformateur de tension inductif et le transformateur de tension capacitif termine l'exposé.

mäss der Kabeltechnik mit Bändern aus Kabelpapier umwunden, wobei die totale Isolationsdicke je nach Spannung einen bis mehrere Zentimeter betragen kann. Zur besseren Ausnutzung dieser Isolation sowie zur Steuerung des Potentialgefälles längs der Primärzuleitungen 4 wird sie durch Einbau von Potentialbelägen 6 elektrisch unterteilt. Der äusserste Potentialbelag wird im Betrieb an Erde gelegt. Das Ölvolume des Wandlers ist auf ein Minimum reduziert.

Während beim Wandler in Fig. 1 die Isolation zwischen Primär- und Sekundärwicklung aus mehreren, durch Isolierzylinder unterteilten Ölkänen besteht, ist beim modernen Stromwandler also nur eine einzige, mechanisch nicht unterteilte, Papierschicht vorhanden. Da die dielektrische Festigkeit von ölimprägniertem Papier aber sehr gross ist (siehe Fig. 6), erreicht man mit dieser Isolierschicht mit Leichtigkeit Spannungssicherheiten, die über denjenigen der Öl-Barriären-Isolation liegen, obschon diese wesentlich mehr Platz beansprucht.

Bei den Spannungswandlern liegen die Verhältnisse ähnlich. Auch hier wird heute als Hauptisolation ölimprägniertes Papier verwendet. Das Gesagte gilt natürlich auch für Messgruppen, d. h. kombinierte Strom- und Spannungswandler.

Da beim Bau dieser zweiten Generation von Messwandlern auch dem Problem der Stoßspannung grösste Aufmerksamkeit geschenkt wurde, sollte man annehmen dürfen, dass sie der früheren Ausführung in Bezug auf Betriebssicherheit wesentlich überlegen ist. Wie die Erfahrung gezeigt hat, ist dies nur unter der Bedingung der Fall, dass das Wandler-Innere im Betrieb keine Feuchtigkeit aufnehmen kann. Tatsächlich sind die modernen Wandler feuchtigkeitsempfindlicher als die älteren Apparate. Leider hat man diese Tatsache anfänglich nicht richtig erkannt oder in ihrer Tragweite unterschätzt, wodurch die erwähnten Unfälle möglich wurden.

Jeder Wandler, dessen Ölbad mit der Aussenluft in Verbindung steht, sei es direkt oder über einen Luftentfeuchter, atmet. Je grösser die Temperaturschwankungen der Umgebungsluft und die Erwärmung des Wandlers sind, um so stärker variiert das Ölvolume, d. h. um so mehr Luft wird eingesogen und ausgestossen. Die Folge

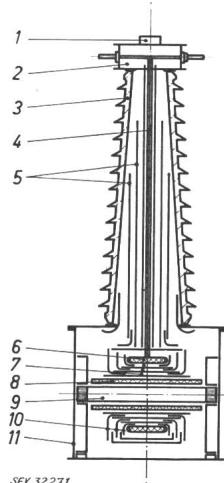


Fig. 1

150-kV-Stromwandler älterer Bauart
1 Luftentfeuchter; 2 Ausdehnungsgefäß; 3 Isolator; 4 Primärzuleitungen; 5, 7 Isolierzylinder; 6 Primärwicklung; 8 Sekundärwicklung; 9 Eisenkern; 10 Isolierkragen; 11 Kessel

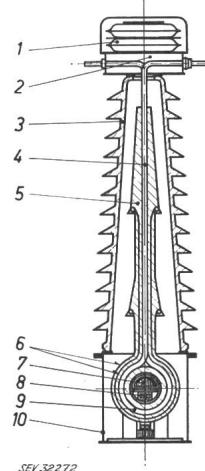


Fig. 2

150-kV-Stromwandler neuer Bauart
1 elastischer Luftabschluss; 2 Öl ausdehnungsgefäß; 3 Isolator; 4 Primär-Zuleitungen; 5 Kabelpapierisolation; 6 Potential-Beläge; 7 Relaiskern; 8 Messkern; 9 Primärwicklung; 10 Kessel

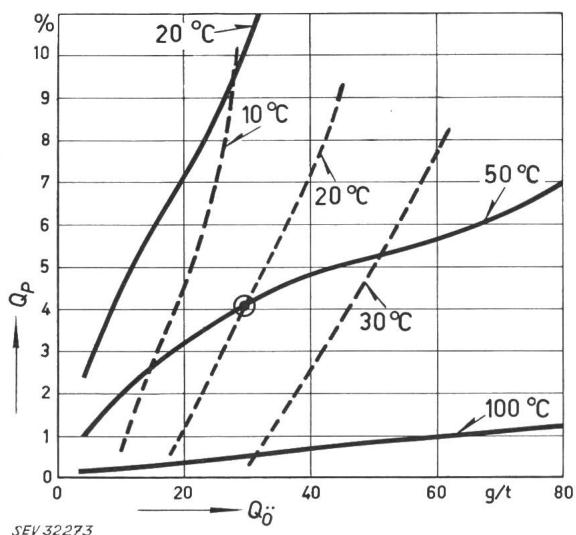


Fig. 3

Feuchtigkeitsgleichgewicht in der Öl-Papier-Kombination

Q_p Wassergehalt des Papiers; $Q_ö$ Wassergehalt des Öls
Lufttemperatur bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 %
Öltemperatur

Beispiel: Bei einer Lufttemperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % stellt sich für eine Öltemperatur von 50 °C folgendes Gleichgewicht ein:

$$\begin{array}{ll} \text{Öl} & 30 \text{ g/t} \\ \text{Papier} & 4 \% \end{array}$$

Hievon ist ein langsames Eindringen von Feuchtigkeit, aus der eingesogenen Umgebungsluft, in das Ölbad und damit in die Isolation.

Aus den vielen Untersuchungen, die diesem Problem in letzter Zeit, und mit besonderer Berücksichtigung der Öl-Papier-Isolation, gewidmet wurden, seien kurz einige wichtige Ergebnisse erwähnt.

Das beim Bau eines Wandlers zur Verwendung gelangende Papier enthält ca. 10 % Wasser. Es ist deshalb nötig, diesen nach Fertigstellung einer gründlichen Trocknung zu unterwerfen. Durch längere Behandlung im Vakuumkessel bei ca. 100 °C und einem Endvakuum von ca. 0,1 mm Hg ist es möglich, den Wassergehalt des Papiers auf ca. 0,3 % zu reduzieren. Ist man so weit, so wird der Wandler mit ebenfalls unter Vakuum vorbehandeltem Öl gefüllt. Der Wassergehalt dieses Öles beträgt ca. 10 g/t [ppm]. In einem Wandler mit z. B. 1000 kg Öl und 100 kg Papier-Isolation würden sich also nur noch 10 g Wasser im Öl, aber 300 g Wasser im Papier befinden. Die auf diese Weise erhaltene Öl-Papier-Isolation hat eine sehr hohe dielektrische Festigkeit und kleine dielektrische Verluste.

Ist nun ein solcher Apparat mit der Außenluft in Verbindung, so dringen, wie bereits erwähnt, Luft und Feuchtigkeit ins Innere. Zwischen dem Wassergehalt des Öls und demjenigen des Isolierpapiers stellt sich ein gewisses Gleichgewicht ein, das stark von der Lufttemperatur, der Öltemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängt (Fig. 3).

Die Erwärmung eines Wandlers ist, verglichen mit derjenigen eines Leistungstransformators, bekanntlich sehr bescheiden. Dies hat einerseits den Vorteil, dass eine Zerstörung der Papierisolation zufolge hoher Betriebstemperaturen nicht vorkommt, andererseits aber kann die einmal aufgenommene Feuchtigkeit nie mehr durch Verdampfen teilweise ausgestossen werden. Umfangreiche Untersuchungen haben denn auch gezeigt, dass bei Messwandlern die grössten prozentualen Feuchtigkeitsgehalte auftreten. Sie betragen für

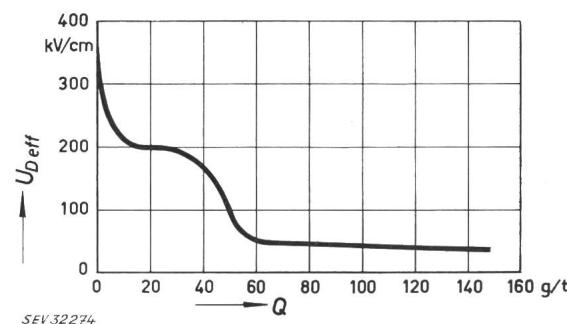


Fig. 4
Durchschlagfestigkeit $U_{D\text{eff}}$ eines Mineralöls in Funktion des Wassergehaltes Q

sehr feuchte Apparate ca. 60 g/t [ppm] für das Öl und ca. 8 % für das Papier. Im erwähnten Wandler würde man im ungünstigsten Fall also ca. 60 g Wasser im Öl, aber schon 8 kg Wasser in den 100 kg Isolierpapier finden. Das heisst aber nichts anderes, als dass eine Papierisolation in einem mit der Aussenluft in Verbindung stehenden Ölbad gleich viel Feuchtigkeit aufnimmt, als wenn sie frei an der Luft wäre. Entgegen der allgemein verbreiteten Ansicht stellt ein solches Ölbad also keinen Feuchtigkeitsschutz dar und verzögert lediglich die Wasseraufnahme der Papierisolation.

Wie steht es nun mit der dielektrischen Festigkeit der feuchtgewordenen Wandlerisolation und deren Verlustwinkel?

Fig. 4 zeigt die Durchschlagfestigkeit eines neuen, normalen Transformatorenöls in Funktion des Wassergehaltes. Zwischen 40...60 g/t findet eine sehr rasche Abnahme der Durchschlagfestigkeit statt. Für grössere Wassergehalte bis ca. 1 % (max. möglicher Wert bei 20 °C) bleibt die Durchschlagfestigkeit praktisch konstant und gleich 30 kV/cm. Für gebrauchte, feuchte Öle liegen die Werte noch tiefer und erreichen ein Minimum von ca. 20 kV/cm.

Der Verlustfaktor in Funktion des Feuchtigkeitsgehaltes steigt gemäss Fig. 5 stark an.

Für die Kombination Öl—Papier liegen die Verhältnisse ähnlich. Fig. 6 zeigt die Durchschlagsspannung der Öl—Papier-Kombination in Funktion des Wassergehaltes des Papiers.

Die Durchschlagsspannung im Dauerbetrieb nähert sich gefährlich der Betriebsspannung. Da die dielektrischen Verluste mit der Feuchtigkeit ebenfalls stark ansteigen, ist nicht nur ein rein elektrischer Durchschlag, sondern auch der Wärmedurchschlag bzw. der wärmeelektrische Durchschlag zu befürchten. Es ist also leicht einzusehen, dass ein feucht gewordener Wandler mit Öl—Papier-Isolation nicht mehr betriebssicher ist und für Anlagen und Personal eine wirkliche Gefahr darstellt.

Es wurde bereits erwähnt, dass die neue Wandlerisolation feuchtigkeitsempfindlicher sei als die alte. Tatsächlich liegen

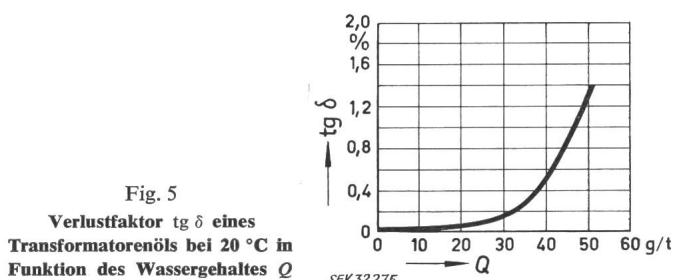


Fig. 5
Verlustfaktor $\tan \delta$ eines Transformatoröls bei 20 °C in Funktion des Wassergehaltes Q

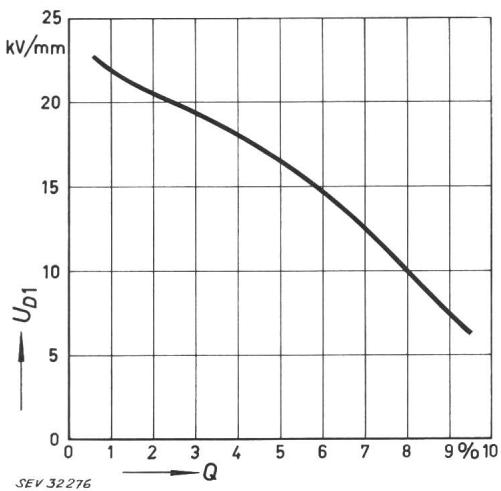


Fig. 6

1-Minuten-Durchschlagspannung U_{D1} (Effektivwert) von ölimprägniertem Papier für Dicken > 10 mm in Funktion des Wassergehaltes Q des Papiers

die Verhältnisse beim feuchten Wandler mit Öl-Barrieref Konstruktion besser. Trotz der gewaltigen Abnahme der dielektrischen Festigkeit des Öles (minimum ca. 30 kV/cm) liegen die Durchschlagwerte immer noch wesentlich über den Betriebsgradienten. Natürlich gibt es auch für diese Wandler eine Grenze, da auch sie Isoliermaterial aufweisen, das sehr feucht wird. Man hat aber schon oft solche Apparate gefunden, die, ohne ihren Dienst zu versagen, auf dem Kesselboden einige cm^3 Wasser hatten. Aus diesen Betrachtungen ergeben sich zwei wichtige Schlüsse:

1. Ältere, im Betrieb feucht gewordene Wandler müssen getrocknet und abgeschlossen werden.
2. Neue Wandler sind unbedingt mit Luftabschluss auszurüsten.

Da sich, wie bereits erwähnt, zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt des Öles und der Papierisolation immer ein Gleichgewichtszustand einstellt, genügt es, den Feuchtigkeitsgehalt des Isolieröles zu bestimmen, um sich Rechenschaft darüber geben zu können, ob ein Wandler getrocknet werden muss oder nicht. Es sei aber zum vornherein bemerkt, dass es schwierig ist, hier eine genaue Grenze zu ziehen. Der innere Aufbau der Apparate und die gewählten dielektrischen Beanspruchungen können dieselbe stark verschieben.

Eine genaue Bestimmung des Wassergehaltes des Öles kann nur der Chemiker ausführen. Deshalb schlägt der Ingenieur einen indirekten Weg ein. Die Messung der dielektrischen Festigkeit führt nicht zum Ziel. Selbst ein feuchtes Öl kann noch Durchschlagwerte von ca. 60...70 % des Neuwertes aufweisen, wenn es sauber geblieben ist. Dies ist für Wandler in starkem Masse der Fall. Da eine einfache «Ölprobe» also nicht die gewünschte Auskunft geben kann, misst man den Verlustfaktor $\tan \delta$, obschon er für Wassergehalte unter 20 g/t nicht mehr stark abnimmt. Damit der $\tan \delta$ eine möglichst deutliche Auskunft gibt, misst man ihn in Abhängigkeit der Temperatur. Fig. 7 zeigt 3 typische Kurven: Kurve 1 entspricht einem sehr feuchten, Kurve 3 einem neuen, normal evakuierten Öl. Obschon es, wie bereits erwähnt, sehr schwer ist, hier die Grenze zwischen gut und schlecht zu ziehen, ist in die Figur Kurve 2 als ungefähre Grenzkurve eingezeichnet. Ist dieselbe erreicht, d. h. beträgt der Verlustwinkel ca. 5 % bei 20 °C und damit ca. 20 % bei 50 °C, so ist es empfehlenswert, den Messwandler innerhalb der nächsten 1...2 Jahre zu trocknen.

Wie soll diese Trocknung vorgenommen werden? Am einfachsten ist die Trocknung an Ort und Stelle mit einer modernen Ölaufbereitungsanlage. Das Öl wird im Umlaufverfahren getrocknet und entgast und entzieht beim Durchlaufen durch den Wandler dem Isoliermaterial einen Teil seiner Feuchtigkeit. Leider ist mit diesem Verfahren, selbst bei mehrtägiger Behandlung, keine wirkliche Trocknung des aktiven Teils zu erreichen, da es sich oft um relativ dicke Isolierschichten handelt und die Ölzirkulation im allgemeinen durch den Wandlerkopf behindert ist. Selbstverständlich tritt eine Besserung ein, sie steht aber nicht im Verhältnis zu den Aufwendungen. Besteht die Isolation aus dünnen Transformerboard-Zylindern und -Platten, so sind die Verhältnisse natürlich wesentlich besser.

Eine wirklich gute Trocknung ist nur durch eine gründliche Vakuumbehandlung in der Fabrik zu erreichen. Es muss festgehalten werden, dass ein feucht gewordener Wandler seinen ursprünglichen Trocknungsgrad nie mehr erreicht. Nur kommt er ihm durch eine gute Vakuumbehandlung sehr nahe.

Da das Trocknen feuchter Wandler sehr kostspielig ist, sollten sie nachher, entsprechend der heute üblichen Praxis, mit einem Luftabschluss ausgerüstet werden. Der Luftabschluss des Ölbades eines Messwandlers gegen die Außenluft kann auf verschiedene Arten ausgeführt werden. Alle Lösungen haben ihre Vor- und Nachteile, wichtig ist nur, dass sie ihren Zweck erfüllen. Vom Standpunkt der elektrischen Sicherheit aus ist der beste Wandlerabschluss derjenige, der verhindert, dass das getrocknete und entgaste Öl wieder Luft und Feuchtigkeit aufnehmen kann und der nur mit kleinen Über- und Unterdrücken arbeitet.

Die Bedingung, dass das Öl keine Luft mehr aufnehmen darf, ist aber nur dann gerechtfertigt, wenn der Apparat elektrisch sehr hoch beansprucht ist. Im Messwandlerbau trifft dies praktisch nur für die Hochspannungs-Kondensatoren zu, die für kapazitive Spannungswandler verwendet werden. Bei den magnetischen Strom- und Spannungswandlern sind die elektrischen Beanspruchungen viel bescheidener. Hier darf ohne Schaden ein Luft- oder Gaskissen über dem Ölbad vorgesehen werden, das dann seinerseits gegen die Außenluft abgeschlossen werden muss. Bei diesen Abschlüssen sättigt sich das Öl mit Luft oder Gas, was bekanntlich die Durchschlagfestigkeit des Öles etwas herabsetzt. Dies ist aber nicht von Bedeutung. Wichtig hingegen ist, dass im Betrieb keine zu grossen Unterdrücke auftreten, da sonst

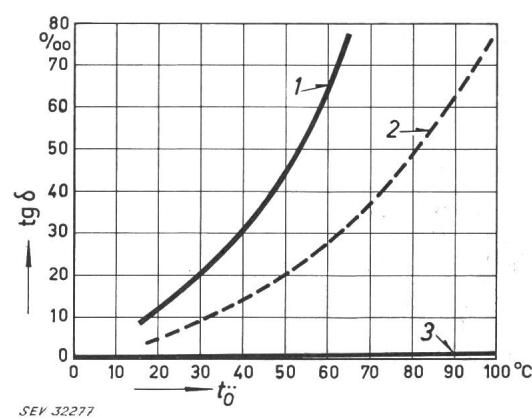
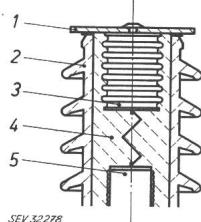


Fig. 7
Verlustfaktor $\tan \delta$ von Transformatoröl in Funktion der Temperatur t_0
1 sehr feuchtes Öl; 2 Grenzkurve; 3 trockenes Öl

Fig. 8

Negativer Metallbalg

1 Eisendeckel; 2 Isolator; 3 negativer Metallbalg; 4 Öl; 5 Kondensator-Aktivteil



die Ionisationsspannung auf ein unzulässiges Mass sinken kann. Da die Öltemperatur der Wandler klein ist, tritt, im Falle eines Luftkissens, die von den Transformatoren her bekannte Oxydation des Öles praktisch nicht in Erscheinung.

Die Fig. 8 bis 15 zeigen einige übliche Luftabschlüsse. Der negative Metallbalg in Fig. 8 und 9 kann in das Porzellan eingebaut werden, ohne dass dieser dadurch länger gemacht werden müsste, d. h. ohne dass dadurch die Überschlagspannung herabgesetzt würde. In gewissen Fällen wirkt er sogar elektrisch eher günstig. Er hat den Nachteil, dass eine sog. Balganzeige schwierig auszuführen ist, so dass sein Zustand von aussen her nicht erkannt werden kann. Die Fig. 10 und 11 zeigen den positiven Metallbalg. Er bedingt eine Vergrösserung der totalen Höhe, erlaubt aber eine einfache Balganzeige. Im Falle einer Undichtheit tritt Ölverlust auf, was aber leicht festzustellen ist.

Der einfachste Luftabschluss besteht im dichten Zuschrauben der Wanderköpfe, wobei die Schwankungen des Ölniveaus infolge Temperaturänderungen durch das vorhandene Luft- oder Gaskissen aufgenommen werden. Der Wandler steht also immer unter einem inneren Über- oder Unterdruck. Sind diese Druckunterschiede sehr gross, d. h. ist das Gaskissen über dem Ölspiegel klein, so besteht die Gefahr, dass mit der Zeit, infolge Nachlassens der Dichtung doch Luft, und damit Feuchtigkeit eingesogen werden. Eine andere Lösung besteht darin, das Gaskissen gemäss den Fig. 12 und 13 so gross zu machen, dass überhaupt nur ganz mässige Über- und Unterdrücke auftreten. Der Nachteil

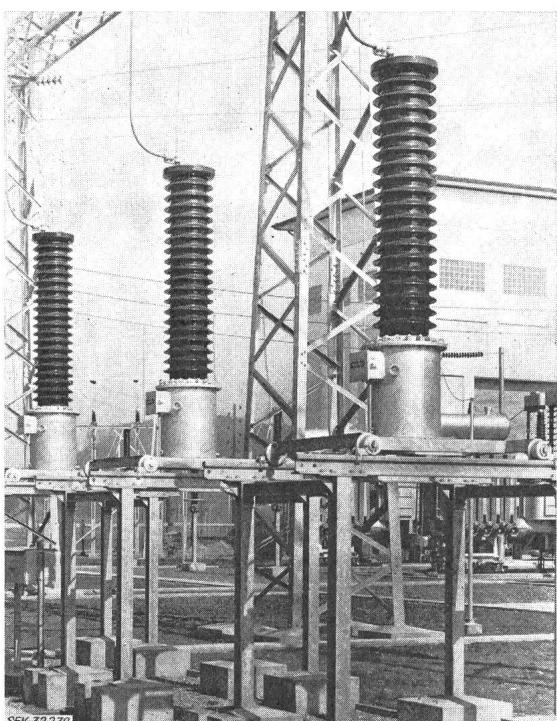
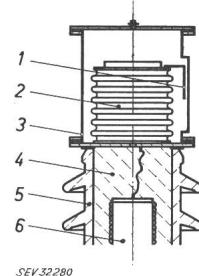


Fig. 9
Kapazitiver Spannungswandler, 220 kV, mit negativem Metallbalg

Fig. 10

Positiver Metallbalg

1 Balganzeige; 2 positiver Balg; 3 Schutzhäuse; 4 Öl; 5 Isolator; 6 Kondensator-Aktivteil



dieser Lösung besteht in der Vergrösserung der Gesamthöhe der Apparate.

Fig. 14 und 15 zeigen einen gummi-elastischen Luftabschluss. Die Schwankungen des Ölniveaus werden vom Ausdehnungsgefäß aufgenommen, während die über dem Ölspiegel liegende Luft mehr oder weniger in die Gummisäcke gedrückt wird. Der maximal auftretende Überdruck beträgt nur ca. 4 Torr.; ein Unterdruck tritt nicht auf. Bei jedem Gummiabschluss muss natürlich mit einer gewissen Diffusion von Wasserdampf ins Innere gerechnet werden. Bei den verwendeten Gummiqualitäten, den üblichen Materialdicken und vorkommenden Temperaturen, handelt es sich aber um derart kleine Mengen von Feuchtigkeit, dass auch ein solcher Abschluss die Lebensdauer eines Apparates vervielfacht.

2. Ionisationsmessungen an Messwandlern

Ausser den üblichen Prüfungen, welche bisher an Messwandlern vorgenommen wurden, wie Genauigkeitsmessungen, Verlustfaktormessungen, 1-Minuten- und Stoßspannungsprüfungen, hat sich in den letzten Jahren die Ionisationsprüfung stark eingebürgert. Obschon die Resultate einer solchen Prüfung mit Vorsicht zu interpretieren sind, darf gesagt werden, dass sich dieselbe bereits als eine sehr wertvolle, zusätzliche Kontrolle erwiesen hat.

Was versteht man unter Ionisation? Es handelt sich hier um kleine energiearme Teilentladungen in der Isolation eines Apparates. Sie treten meistens in kleinen Luft- oder Gaseinschlüssen von festen oder flüssigen Dielektrika auf oder haben ihren Sitz an Orten sehr hoher Feldstärke, wie z. B. an scharfen Kanten von Elektroden usw. Es ist leicht einzusehen, dass es Ionisationserscheinungen gibt, die in Bezug auf Sicherheit und Lebensdauer eines Apparates ohne Bedeutung sind, während andere hiefür absolut bestimmend sind.

Fig. 16 zeigt eine Elektrode im Ölbad, wie sie z. B. zur Abschirmung irgendeines scharfkantigen Eisenteils ver-

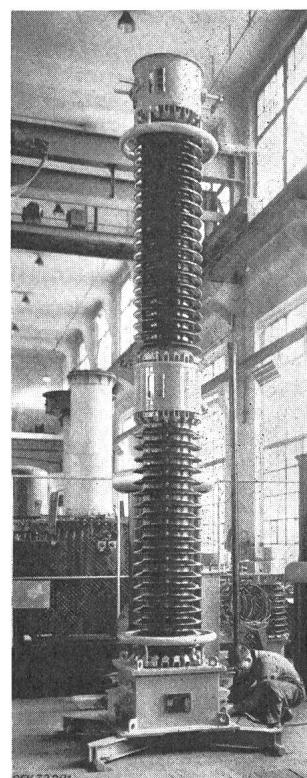
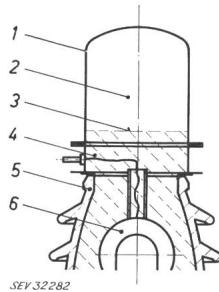


Fig. 11
Kapazitiver Spannungswandler,
400 kV, mit positivem Metallbalg

Fig. 12

Grosser Luftabschluss

- 1 Abdeckhaube; 2 grosses Luftpolumen; 3 minimaler Ölstand; 4 Öl; 5 Isolator; 6 Wandler-Aktivteil



wendet wird. Ist die Oberfläche der Elektrode richtig dimensioniert und absolut sauber, so wird an ihr die für das Öl zulässige Feldstärke nicht überschritten. Handelt es sich aber um eine z. B. bei der Montage verletzte Elektrode, wie in Fig. 16 angedeutet, so können an der Spitze kleine Entladungen auftreten, d. h. man hat es mit einer Ionisationserscheinung zu tun, die mit sehr empfindlichen Messinstrumenten eindeutig festgestellt werden kann. Man spricht also ausdrücklich nur von Ionisation, d. h. energiearmen Entladungen, und nicht etwa von sichtbarem Glimmen oder gar Büschelentladungen. Während diese beiden Erscheinungen im Betrieb absolut unzulässig sind, darf eine bescheidene Ionisation an einer solchen Elektrode im Öl ohne Bedenken zugelassen werden. Wie man später sehen wird, sind die Energiemengen, die bei einer als bescheiden erachteten Ionisation im Spiele sind, tatsächlich derart klein, dass sie keine Verschlechterung des Öls bewirken können.

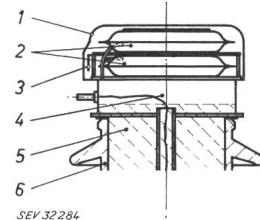
Anders liegen die Verhältnisse, wenn sich der Ort der Ionisation im Innern einer festen Isolierschicht befindet.

Die Fig. 17 soll ein Papier—Öl-Dielektrikum darstellen, in welchem infolge unzureichender Evakuierung kleine Luftblasen zurückgeblieben sind. Wird diese Isolierschicht unter Spannung gesetzt, so übersteigt der Spannungsgradient innerhalb der Lufteinschlüsse sehr bald den zulässigen Wert. Es erfolgt ein Durchschlag der Luftsicht infolge Ionisation

Fig. 14

Gummielastischer Luftabschluss

- 1 Abdeckhaube; 2 Gummibalge; 3 Balganzeige; 4 Ölausdehnungsfäss; 5 Öl; 6 Isolator



der Luft. Sind viele solcher Ionisationspunkte vorhanden, so kann die dort entwickelte Wärme unter Umständen eine unzulässige örtliche Erhöhung der Betriebstemperatur zur Folge haben, was im Extremfall zu einem wärmelektrischen Durchschlag führen würde. Bei sorgfältiger Trocknung, Evakuierung und Imprägnierung der Wandler kommt das nicht vor. Dieses Beispiel zeigt aber, warum öfters von der Notwendigkeit gesprochen wird, die bei der Ionisation umgesetzte Energie zu kennen.

Es gibt noch eine weitere Art von Ionisation, die auch in einem sorgfältig imprägnierten Papier—Öl-Dielektrikum vorkommen kann. Treten infolge unrichtiger Bemessung oder schlechter Ausführung der Isolation örtlich unzulässige Feldstärken auf, ionisiert das Öl, so dass ein Durchschlag der Ölschichten stattfindet. Bei dieser Ionisation werden die Öl-Moleküle zerstört, was mit der Zeit zu Gasbildung führen kann. Diese Erscheinung ist bei den Kondensatoren, die elektrisch sehr hoch beansprucht sind, wohl bekannt und tritt für luftgesättigtes Öl früher auf als für sorgfältig entgastes Öl.

Die Ionisation ist eine altbekannte Erscheinung. Man denke nur an Generatorwicklungen mit Micafoliumkanälen, die weder einer Vakuumbehandlung unterworfen, noch imprägniert wurden. Als man begann, den Verlustfaktor $\tan \delta$ der Kanalisolation zu messen, fand man das gefürchtete «Knie», welches in ein scharfes Ansteigen der Verlustkurve überführte (Fig. 18). Bei diesen Messungen wurden außer den eigentlichen dielektrischen Verlusten der Isolation bereits auch Ionisationsverluste mitgemessen. Das starke An-

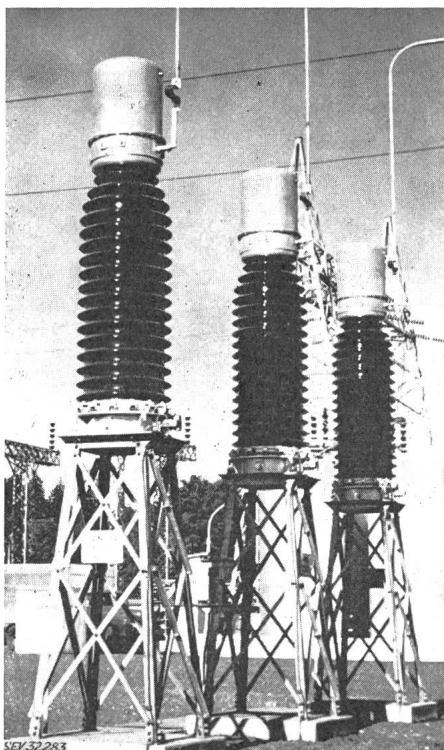


Fig. 13

Induktive Spannungswandler, 230 kV, mit grossem Luftkissen

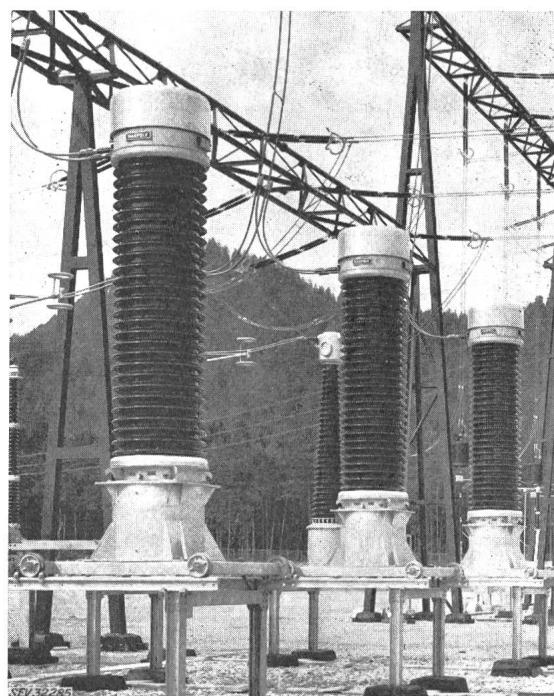


Fig. 15

Induktive Spannungswandler, 400 kV, mit elastischem Luftabschluss

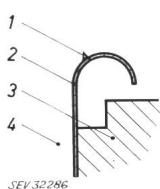


Fig. 16
Ionisation an einer Elektrode
1 Elektroden-Verletzung; 2 Elektrode;
3 Eisenteil; 4 Ölbad

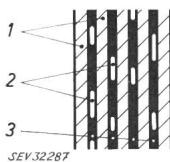


Fig. 17
Papier-Öl-Dielektrikum
1 Papierlagen; 2 Luft- oder Gaseinschlüsse;
3 Ölschlitz

steigen der Kurve trat bei derjenigen Spannung auf, bei welcher die sehr zahlreichen Lufteinschlüsse der Kanalisation zu ionisieren begannen. Selbstverständlich hätte das «Knie» immer oberhalb der Betriebsspannung liegen müssen. Wenn es aber dennoch viele Maschinenwicklungen gab, die trotz Ionisation 30 und mehr Jahre ihren Dienst versahen, so deshalb, weil wirklich nur kleine Energien im Spiel sind und der in der Isolation enthaltene Glimmer der Ionisation gut standgehalten hat.

Es ist leicht einzusehen, dass die $\operatorname{tg} \delta$ -Messung als Ionisationsmessung nicht sehr empfindlich ist und deshalb für Wandler nicht in Frage kommt. Fig. 19 zeigt eine Nullpunktstromschaltung, wie sie z. B. zur Messung einer Stromwandler-Primärwicklung verwendet werden kann.

Treten Ionisationsentladungen in der Hochspannungsleitung C_E des Stromwandlers auf, so bewirken die davon ausgehenden hochfrequenten Ströme einen Spannungsabfall an L , der mit M gemessen wird. C sorgt dafür, dass die netzfrequente Komponente des Stromes in einem günstigen Verhältnis zum hochfrequenten Teil steht.

Wird als Messinstrument M ein Oszilloskop verwendet, so erhält man bei Abwesenheit jeglicher Ionisation die netzfrequente Spannungskurve gemäß Fig. 20a.

Ionisiert der Wandler, so treten an den Scheitelpunkten der Sinuskurve «Ionisations-Bärte» nach Fig. 20b auf.

In Fig. 21 ist eine Meßschaltung nach NEMA-Vorschriften wiedergegeben und zwar für die Prüfung eines Spannungswandlers.

Der Wandler wird von der Unterspannungsseite her erregt. 2 Sperren verhindern, dass Störungen von der Speiseseite her eindringen können.

Die Oberspannungswicklung, welche einseitig geerdet ist, wird an den Messkondensator C angeschlossen. Nach NEMA-Vorschriften ist als Messinstrument ein selektives Radiostörmessgerät, das Ferrismeter, zu verwenden. Es wird auf 1 MHz abgestimmt. C und L sind so gewählt, dass sie für

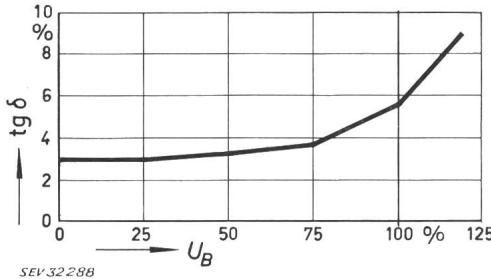


Fig. 18

Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ eines alten Generator-Micafoliumkanals
(bei 20 °C)
 U_B Betriebsspannung

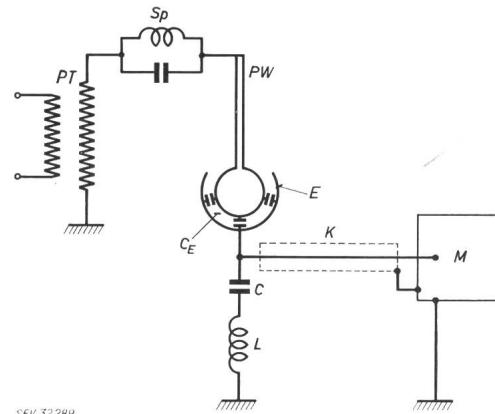


Fig. 19
Ionisations-Nullpunktstrom-Meßschaltung

PT Prüftransformator; Sp HF-Sperre; PW Primärwicklung eines Stromwandlers; E Erdbelag des Stromwandlers; C_E Öl-Papier-Isolation; K Koaxialkabel; M Messgerät; C Messkondensator, 40 μF ; L HF-Spule, 2,5 mH

diese Frequenz in Serie-Resonanz sind, d. h. einen Kurzschluss darstellen, während die 50-Hz-Spannung durch C abgeriegelt ist. Tritt im Wandler Ionisation auf, so finden die hochfrequenten Schwingungen einen Pfad minimaler Impedanz über C , L und R_1 , nach Erde. Die Störspannung wird an R_1 abgenommen.

Wie aus der Literatur hervorgeht, ist die Zahl der Schaltungen, welche für Ionisationsmessungen verwendet werden, schon recht gross. Je nachdem, ob es sich um eine Durchführung, einen Kondensator, einen Wandler oder einen Transformator handelt, wird die eine oder die andere Methode vorgezogen. Sie haben alle ihre Vor- und Nachteile und es wird noch viele Jahre dauern, bis sich die Spezialisten auf eine oder einige Messmethoden geeinigt haben werden. Die Interpretation der Messresultate und der Vergleich verschiedener Messungen sind außerordentlich schwierig.

Man ist sich auch noch gar nicht darüber einig, was eigentlich zu messen ist. Soll es eine Spannung [μV], eine

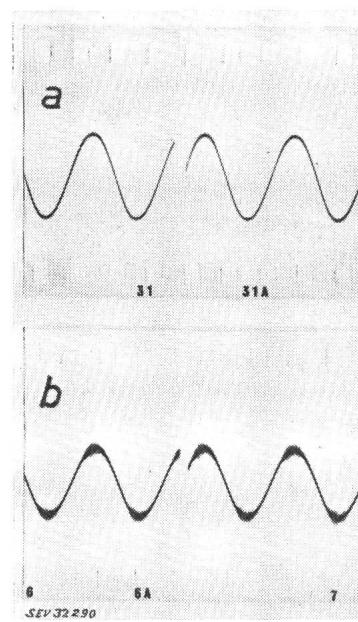


Fig. 20
Ionisationsspannungs-Messung mit dem Oszillosgraphen
a ungestörte Spannungskurve; b Spannungskurve mit Ionisationsbärten

Elektrizitätsmenge [μC], eine Energie [μJ] oder eine Leistung [μW] sein.

Die elektro-magnetischen Schwingungen, die von den Ionisationsherde ausgehen, umfassen einen weiten Frequenzbereich. Wird als Messgerät ein Oszilloskop verwendet, so können die der netzfrequenten Spannung überlagerten Störspannungen sehr schön verfolgt werden. Bedingung hiefür ist natürlich, dass die Meßschaltung derart gewählt wird, dass sie ein breites Frequenzband erfasst und dass das Verhältnis von netzfrequenter Spannung zur Störspannung günstig eingestellt ist (Fig. 19). Der Nachteil dieser Methode liegt in der Schwierigkeit, die aufgenommenen Störkurven auszumessen und einen eindeutigen Wert der Störspannung in μV anzugeben. Aus diesem Grunde wird oft vorgezogen, Radiostörmessgeräte zu verwenden. An einem Scheitelwert-Voltmeter kann die Störspannung in μV abgelesen werden. Besser wäre es, zu sagen, es kann «eine Störspannung» abgelesen werden, denn diese Messung gibt kein ehrliches Bild der Störspannungen. Da, wie gesagt, der Frequenzbereich der Ionisations-Störspannungen sehr weit ist, werden z. T. auch Breitbandstör-Messgeräte mit einem Frequenzband von 30 kHz bis 3 MHz angewendet. Leider lassen sich diese Apparate aber stärker durch fremde Störer beeinflussen als die selektiven Apparate, weshalb diesen doch der Vorzug gegeben wird. Sie können auf eine Frequenz zwischen ca. 0,5 bis 2MHz abgestimmt werden, ihre Bandbreite beträgt meistens 9 kHz. Da sie, wie gesagt, selektiv sind, greifen sie nur ein schmales Frequenzband aus dem breiten Frequenzspektrum heraus. Dies wäre an und für sich nicht schlimm. Unangenehmer ist hingegen, dass die Anzeige dieser Messgeräte die Anzahl Störimpulse pro Zeiteinheit nicht recht widergibt. Ob wenige oder viele Impulse pro Zeiteinheit eintreffen, verändert die Anzeige der Messinstrumente nur wenig, d. h. die totale Energie der Störung kommt bei diesen Messungen nicht recht zum Ausdruck. Das ist ein Nachteil, wenn man versucht, einen Zusammenhang zwischen der Zerstörung eines Dielektrikums und der durch die Ionisation freiwerdenden Energie abzuleiten.

Wählt man eine bestimmte Schaltung zur Ionisationsmessung und verwendet man verschiedene Störmessgeräte (Ferrismeter, CISPR, Koske, Siemens etc.), die für eine sinusförmige Eichspannung die genau gleichen Werte geben, so gehen die Störspannungsmesswerte trotzdem gewaltig auseinander, manchmal bis 1 : 10. Dieser Umstand zeigt,

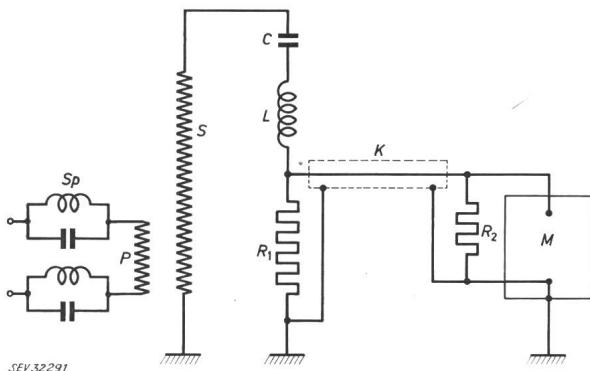


Fig. 21

Ionisations-Meßschaltung nach NEMA-Vorschriften

Sp HF-Sperre; P Primärwicklung des Spannungswandlers; S Sekundärwicklung des Spannungswandlers; C Messkondensator; L Abstimmdrosselspule; K Koaxialkabel; R_1 Widerstand, 600 Ω ; R_2 Abschlusswiderstand; M Messinstrument

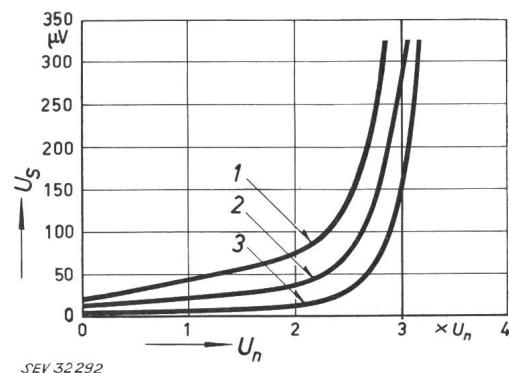


Fig. 22

Ionisations-Störspannungsmessungen nach drei Methoden (1, 2 und 3)

U_s Störspannung; U_n Nennspannung

dass es ausserordentlich schwierig ist, Ionisationsmesswerte, die in verschiedenen Prüffeldern und mit verschiedenen Instrumenten gemessen wurden, miteinander zu vergleichen. Wenn die Ionisationsmessung trotzdem aber heute schon eine ausserordentlich wichtige Kontrollmessung geworden ist, so ist das dem folgenden glücklichen Umstand zu verdanken. Alle Messmethoden und Messinstrumente ergeben Ionisationskurven, deren Verlauf ähnlich ist, d. h. der «gefährliche» Kurvenanstieg, wie in Fig. 22 veranschaulicht, liegt praktisch bei der gleichen Spannung. Die Messwerte für kleine Spannungen hingegen können sehr stark auseinandergehen, was aber ohne Bedeutung ist.

Was soll nach all dem der Betriebsingenieur seinen Wandlerlieferanten als zulässige Ionisations-Störspannung vorschreiben? Am besten keine! Wichtig ist, dass er in seine Lieferanten volles Vertrauen hat, und dass diese Ionisationsversuche gemeinsam und in aller Offenheit durchgeführt werden. Auf diese Art sind sie nämlich von grösster Nützlichkeit.

Wie sind sie nun zu interpretieren?

Betrachte man noch einmal die Fig. 21 und zeichne in Fig. 23 das kapazitive Schema der Hochspannungswicklung S.

Da man es bei der Ionisation mit hochfrequenten Schwingungen zu tun hat, ist der Weg ihrer Ausbreitung durch das kapazitive Schema der Wicklung gegeben. Tritt z. B. im Punkt a der Wicklung Ionisation auf, so wird der grösste Teil der Energie über die Streukapazität gegen Erde abflies-

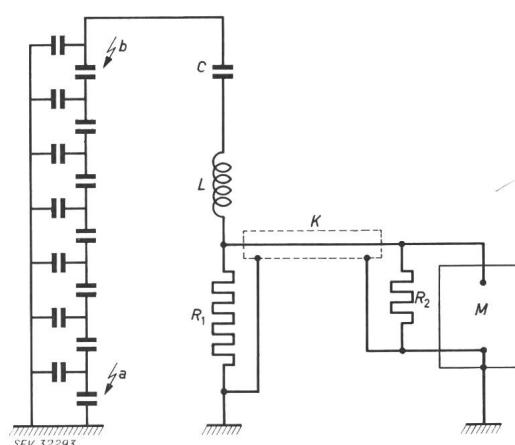


Fig. 23

Kapazitives Schema des induktiven Spannungswandlers in der Schaltung nach Fig. 21

a, b Ionisations-Herde

Weitere Bezeichnungen s. Fig. 21

sen und nur wenig über den Messkreis CLR_1 . Liegt die Störung aber auf dem hochspannungsseitigen Wicklungsende bei b , so wird der grösste Teil der Energie den Messkreis durchfliessen.

Misst man also z. B. an 2 Spannungswandlern verschiedene grosse Störspannungen, so will damit noch nicht gesagt sein, dass derjenige Wandler welcher eine höhere Störspannung hat, auch eine grössere Ionisation aufweist. Das Gegenteil ist möglich. Auch kann der Ionisationsherd nicht in der Wicklung, sondern in einem unter Spannung liegenden Eisenkörper, d. h. an einem relativ harmlosen Ort liegen.

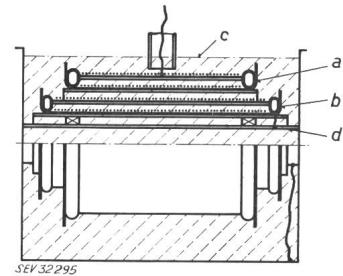
Trotz all diesen Unsicherheiten weiss der Konstrukteur aus Erfahrung, wie hohe Störspannungswerte [μV] zulässig sind. Ein Wandler, der sich im Betrieb bewährt hat und der in vielen Exemplaren hergestellt wird, hat einen Ionisationsverlauf, der nur wenig variiert. Fällt ein Exemplar dieses Wandlertyps ausserhalb der Erfahrungswerte, so darf mit Sicherheit angenommen werden, dass etwas in der Fabrikation nicht richtig ausgeführt wurde. Es ist also der Konstrukteur, der seinen Kunden darauf aufmerksam machen sollte, wenn die Ionisationsmessung nicht seinen Erwartungen entspricht. Damit er das machen kann, ist es aber nötig, dass der Kunde aufgeschlossen ist und nicht um einige μV rechtes.

Wird die Ionisationsmessung vernünftig betrieben, so stellt sie eine zerstörungsfreie Prüfung der Wandlern dar, die die 50-Hz-Prüfung und die Stoßprüfung sehr wertvoll ergänzt. Verschobene Potentialbeläge oder Schutzringe von Strom- und Spannungswandlern, schlechte Evakuierung und Imprägnierung usw. ergeben z. T. sehr hohe Störspannungswerte und können sofort erkannt werden, während das bei der 50-Hz- und der Stoßspannungsprüfung nicht der Fall ist.

Tatsächlich ist es eher selten, dass der Betriebsingenieur dem Konstrukteur für Messwandler einen Grenzwert der Störspannung vorschreibt. Was er aber von ihm verlangt, ist, dass die Ionisationsspannung vor und nach der Prüfung mit 50-Hz- bzw. mit Stoßspannung ungefähr denselben Wert aufweist. Natürlich ist es nötig, dass eine Ionisation, die durch die Prüfspannung der 50-Hz-Prüfung eingeleitet wird, bei der maximalen Betriebsspannung nicht aufrecht erhalten bleibt.

Für Messwandler, deren Isolation richtig bemessen wurde, besteht diese Gefahr nicht. Fig. 24 zeigt eine an einer 220-kV-Messgruppe aufgenommene Ionisationskurve. Die Prüffeldseinrichtung gestattete nicht, die Ionisationsmessung bis zur Höhe der 50-Hz-Prüfspannung durchzuführen, doch erkennt man deutlich eine sehr bescheidene «Hysteresis». Es ist übrigens gar nicht einzusehen, warum bei einer 50-Hz-Prüfspannung, die im allgemeinen das 3...4fache der Betriebsspannung erreicht, an den besonders beanspruchten

Fig. 25
Ionisationsversuch an zwei Probewicklungen
 a, b Wicklungen; c Ölspiegel;
 d Erdungsrohr



Punkten nicht ein kleiner Ionisationseinsatz auftreten soll. Wichtig ist nur, dass dadurch keine Verschlechterung der Isolation eintritt und dass die Ionisation erst weit oberhalb der maximalen Betriebsdauer auftritt. Zeigt ein Wandler nach der Prüfung mit 50-Hz-Spannung eine kleine Zunahme der Ionisation, so muss dieselbe nach einer bestimmten Zeit wieder verschwinden und man muss wieder die erste Kurve vor der Prüfung mit 50 Hz finden. Wenn nicht, wäre das ein Zeichen dafür, dass der Wandler bei der Prüfung mit 50 Hz gelitten hat. Die Zeit, die es braucht, bis die Ionisationszunahme wieder verschwindet, gibt dem Konstrukteur einen ersten Hinweis, wo ungefähr diese Ionisation zu suchen ist.

Um keine Zweifel aufkommen zu lassen, muss noch erwähnt werden, dass eine Stoßspannung, sei es im Prüffeld oder im Betrieb, keine bleibende Ionisation eines Wandlers herbeizuführen vermag. Natürlich tritt bei der stoßartigen Spannungsbeanspruchung eine kleine Stossionisation auf, doch ist ihre Dauer zu kurz um die Verhältnisse unter Betriebsspannung verändern zu können.

Bei diesen Ionisationserscheinungen, sofern sie solche bleiben, sind nur ganz kleine Energien im Spiele. Da man sich aber unter einem μJ nicht viel vorstellen kann, sei zum Abschluss noch das Resultat eines einfachen Versuches erwähnt.

Zwei Versuchswicklungen a und b eines Prüftransformators, bestehend je aus zwei Isolierzylindern mit aufgewickelter Drahtlage und Schutzringen an beiden Enden, wurden, gemäss Fig. 25, in einem Ölgefäß eingebaut. Die Wicklung b war über das Rohr d an den Kessel und damit an Erde gelegt, während die Wicklung a durch ein dickes Aluminiumrohr mit dem Blockkondensator C (Fig. 21) und einem störungsfreien Prüftransformator verbunden war. Die Prüfspannung wurde gesteigert bis die Störspannung ca. 1000 μV betrug.

Wenn man an die 15 μV , die eine 220-kV-Messgruppe bei $1,2 \sqrt{3} \times$ Betriebsspannung aufweist, denkt, so stellen diese 1000 μV einen sehr hohen Wert dar. Um sich ein Bild der hier umgesetzten Energie machen zu können, wurde diese Spannung dann verdreifacht, womit die Ionisationsspannung natürlich unmessbare Werte annahm. Dann wurde sie während 60 h aufrecht erhalten und die Wicklung, die nur wenig mit Öl bedeckt war, beobachtet. Während dieser 2½ Tage war absolut nichts zu hören, nichts zu sehen und die Oberfläche blieb absolut ruhig und spiegelglatt. Die entwickelte Energie muss also trotz der unmessbar hohen Ionisationsspannung ausserordentlich klein gewesen sein.

3. Kapazitiver oder induktiver Spannungswandler

Es handelt sich hier nicht etwa um die Streitfrage, ob dem kapazitiven oder dem induktiven Spannungswandler

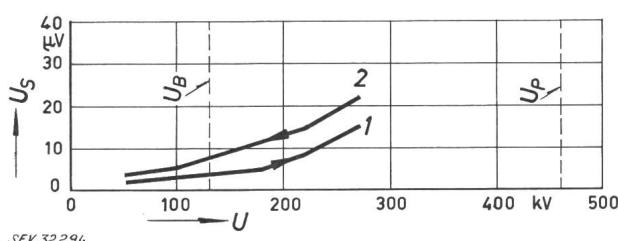
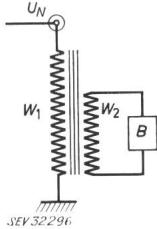


Fig. 24
Ionisations-Störspannungsmessung an einer 220-kV-Messgruppe

U_s Störspannung; U Prüfspannung; U_p Prüfspannung 460 kV; U_B Betriebsspannung
1 vor der Prüfung mit 50 Hz; 2 nach der Prüfung mit 50 Hz

Fig. 26



Schema eines induktiven Spannungswandlers
 U_N Hochspannungsnetz; W_1, W_2 Primär- bzw.
 Sekundärwicklung; B Bürde

der Vorzug gegeben werden soll. Obschon der kapazitive Wandler ca. 25 Jahre jünger ist als sein induktiver Kollege, schaut er auch schon auf eine ca. 20jährige Existenz zurück. Dass er in den letzten Jahren etwas «aufgeholt» hat, ist kein Grund dafür, dass sich die beiden Wandlertypen nicht sehr gut vertragen, nebeneinander existieren und sich sogar ergänzen.

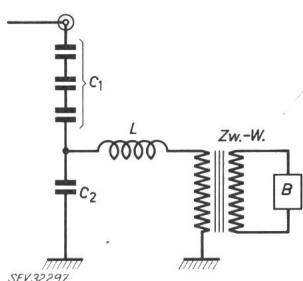
Der induktive Spannungswandler hat in den letzten 20 Jahren ganz wesentliche Fortschritte gemacht. Die Wicklungen sind heute stößsicher bis zu den höchsten Spannungen, die Genauigkeitsklasse 0,2 % ist eine Selbstverständlichkeit geworden, und die Gewichte und Dimensionen wurden beträchtlich reduziert. Ist dafür gesorgt, dass er keine Feuchtigkeit aufnehmen kann, so ist der induktive Wandler heute ein sehr zuverlässiger und in seinem Betriebsverhalten durchaus stabiler Messwandler.

In dieser Stabilität, die ihm sozusagen von Natur aus gegeben ist, findet man ein erstes Merkmal, das ihn vom kapazitiven Wandler unterscheidet. Natürlich werden heute auch diese so gebaut, dass sie im Betrieb stabil sind. Dies muss aber durch besondere konstruktive Massnahmen erkauft werden. Warum dem so ist, sieht man am besten aus den beiden Schemata in Fig. 26 und 27.

Der induktive Spannungswandler gemäss Fig. 26 besteht lediglich aus einem Eisenkörper, welcher eine Primärwicklung (Hochspannung) und eine Sekundärwicklung (Niederspannung) trägt. An diese wird die Bürde B angeschlossen.

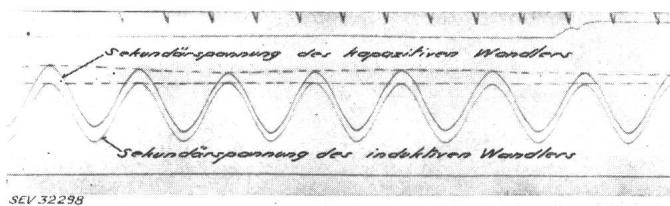
Das Schema des kapazitiven Spannungswandlers gemäss Fig. 27 ist hingegen wesentlich komplizierter. Hier hat man es mit einer Kombination von mindestens zwei Kondensatoren, einer Drosselpule und einem induktiven Zwischenwandler zu tun.

Es ist bekannt, dass elektrische Kreise, in welchen Kapazitäten und Induktivitäten vorkommen, sog. Schwingungskreise sind, und dass es genügt, diese Gebilde an einem Punkt elektrisch anzustossen um sie in Schwingungen zu versetzen. Ein Spannungsstoss, der beim plötzlichen Einschalten der Wandler auf das Netz auftritt, genügt schon, um im kapazitiven Wandler eine kleine Schwingung auszulösen; der induktive Wandler hingegen überträgt diese Spannungsänderung praktisch starr auf die Sekundärseite. Fig. 28 (Versuch der FKH) zeigt das entsprechende Oszillogramm der Sekundärspannungen der beiden Wandler. Der netzfrequenten Sinuslinie ist beim kapazitiven Wandler eine schwache langsame Eigenschwingung überlagert. Übersteigt diese langsame Schwingung die Grenze eines gewissen Masses, so kann der Netzschatz gestört werden.



Schema eines kapazitiven Spannungswandlers

C_1 Primärkondensatoren; C_2 Sekundärkondensator; L Kompressions-Drosselpule; $Zw.-W.$ Zwischen-Wandler; B Bürde



Sekundärspannung beim Einschalten der Spannungswandler

che langsame Eigenschwingung überlagert. Übersteigt diese langsame Schwingung die Grenze eines gewissen Masses, so kann der Netzschatz gestört werden.

Es ist nun bekannt, dass es keine Transformatoren- oder Maschinen-Wicklungen irgendwelcher Art gibt, die nicht sog. Eigen- und Streukapazitäten aufweisen. Sie sind deshalb auch alle schwingungsfähige Gebilde, in diesem Falle also auch die Wicklungen des induktiven Wandlers.

Um diese Schwingungsverhältnisse zu übersehen, ist es nicht notwendig, die vielen Teilkapazitäten zwischen Windungen und Spulen zu berücksichtigen. Man kann sich mit einer sog. Ersatzkapazität begnügen. Am einfachsten bestimmt man sie aus der Eigenfrequenz der Wicklungen.

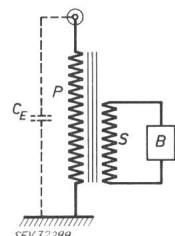
Die Schemata in Fig. 26 und 27 müssen deshalb ergänzt werden (Fig. 29 und 30). Bei diesen Ersatzkapazitäten C_E handelt es sich nur um kleine Werte, die gegenüber denjenigen von C_1 und C_2 des kapazitiven Wandlers vernachlässigbar sind. Man benötigt sie aber zur Erklärung der beobachteten Schwingungen.

Da die meisten Wandler außer zu Messzwecken auch zur Speisung von Distanzschutzrelais dienen, ist ihr Verhalten beim primären Kurzschluss von grösster Bedeutung. Fig. 31 zeigt ein typisches Oszillogramm der Sekundärspannungen eines induktiven und eines kapazitiven Spannungswandlers beim primären Kurzschluss (Versuch FKH).

Es wurde bereits erwähnt, dass der induktive Wandler eine Spannungsänderung praktisch starr auf die Sekundärseite überträgt. Wie Fig. 31 zeigt, ist dies tatsächlich der Fall; die ganz kurze Schwingung im Kurzschlussmoment entsteht dank der Kapazität C_E . Es ist eine Eigenschwingung von einigen wenigen kHz Frequenz, die stark gedämpft und nach $1/100$ s bereits abgeklungen ist.

Der kapazitive Wandler zeigt zwei Schwingungen, eine mittelfrequente von einigen 100 Hz und eine langsame Schwingung von ca. 10 Hz. Im Oszillogramm sind sie der Deutlichkeit halber noch verstärkt aufgezeichnet. Um besser zu sehen, wie diese Schwingungen entstehen, sei das Schema in Fig. 30 nochmals und zwar für den Fall des primären Kurzschlusses aufgezeichnet (Fig. 32).

Da die Leerlaufinduktivität L_{fe} des Zwischenwandlers viel grösser ist als die Induktivität L der Kompressionsdrosselpule, und die Eigenkapazität C_E viel kleiner als $C_1 + C_2$, so ist die Frequenz der schnelleren Schwingungen praktisch nur durch L und C_E bestimmt. Die langsame



Induktiver Spannungswandler
 C_E Eigenkapazität; P, S Primär- und Sekundärwicklung; B Bürde

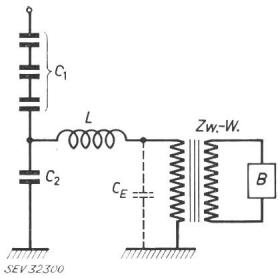


Fig. 30
Kapazitiver Spannungswandler
 C_E Eigenkapazität des induktiven Zwischenwandlers
Weitere Bezeichnungen s. Fig. 27

Schwingung hingegen ist durch die grosse Leerlaufinduktivität L_{fe} und die grosse Kapazität $C_1 + C_2$ gegeben.

Da diese Schwingungen das korrekte Funktionieren der Schutzrelais verhindern können, müssen sie auf ein zulässiges Mass reduziert werden. Wie aus Fig. 32b hervorgeht, wäre die wirksamste Massnahme die Vergrößerung der Dämpfung durch Erhöhung des Widerstandes R . Leider ist man aber in seiner Wahl nicht frei, da mit grösserwerdendem R die Übersetzungs- und Winkelfehler des Spannungswandlers zunehmen. Hieraus ergibt sich bereits eine erste Erkenntnis, und zwar diejenige, dass von einem kapazitiven Wandler für Relaisspeisung keine grosse Genauigkeit verlangt werden sollte.

Damit in diesen Schwingungskreisen überhaupt Schwingungen auftreten, ist es notwendig, dass irgendwo Energie aufgespeichert ist, die im Moment des primären Kurzschlusses frei wird. Je grösser diese Energie, umso stärker werden die Schwingungen.

Aus Fig. 32 erkennt man sofort, dass die Energie der mittelfrequenten Schwingung im Magnetfeld der Drosselspule L und im elektrischen Feld der Eigenkapazität C_E des Zwischenwandlers steckt. Die Energieanteile richten sich nach dem Zeitmoment des Kurzschlusses.

Was die langsame Schwingung anbelangt, ist sicher ein Energiebeitrag im magnetischen Feld (L_{fe}) des Zwischenwandlers zu suchen. Es kommt aber noch ein wesentlicher Beitrag von den Kondensatoren C_1 und C_2 , was nicht ohne weiteres einzusehen ist, da man ja einen primären Kurzschluss betrachtet, und nach Fig. 32 die Kondensatoren C_1 und C_2 kurzgeschlossen sind. Um dieses Problem besser zu verstehen, betrachtet man Fig. 33 mit dem zugehörigen Vektor-Diagramm.

Ist der kapazitive Wandler unbelastet, d. h. der Sekundärkreis offen und wäre die Leerlaufleistung des Zwischenwandlers gleich Null, dann würde der Strom I_B nicht existieren und I_{C1} wäre gleich I_{C2} . Mit anderen Worten, die Spannungsverteilung an den Kondensatoren C_1 und C_2 würde im umgekehrten Verhältnis ihrer Kapazitätswerte erfolgen.

Wird nun der Wandler mit der Bürde B belastet, zu der sich noch die Eigenleistung des Spannungswandlers gesellt,

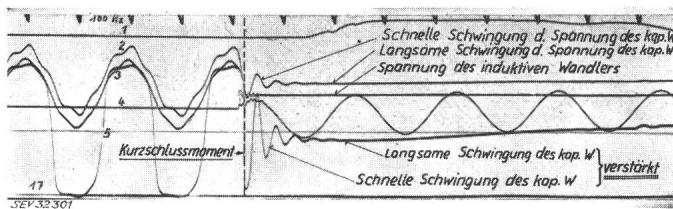


Fig. 31

Schwingungen der Sekundärspannungen bei Kurzschluss auf der Primärseite
Kurve 1: Auslösestrom des Schalters; Kurve 2: kapazitiver Wandler;
Kurve 3: induktiver Wandler; Kurve 4: Kurzschlußstrom; Kurve 5:
kapazitiver Wandler, verstärkt

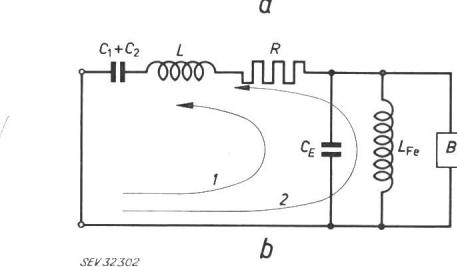
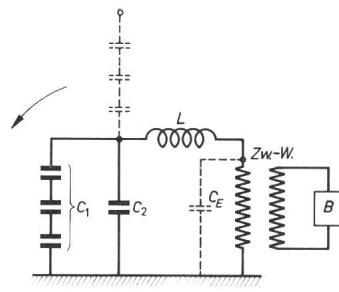


Fig. 32
Kapazitiver Spannungswandler beim primären Kurzschluss

a Schaltschema; b Ersatzschema
1 schnelle Schwingung; 2 langsame Schwingung
 L_{fe} Leerlaufinduktivität des Zwischenwandlers

Weitere Bezeichnungen s. Fig. 27

so entsteht der Belastungsstrom I_B . Da, wie aus Fig. 33a hervorgeht, $I_{C1} = I_{C2} + I_B$ ist und I_B einer mehr oder weniger induktiven Last entspricht, ergeben sich die Strom-Vektoren nach Fig. 33b. Man sieht also, dass I_{C2} grösser ist als I_{C1} und dass beide Ströme gegeneinander phasenverschoben sind. Die Spannung am Kondensator C_2 wird umso grösser, je grösser die Sekundärleistung ist, während die Spannung an C_1 abnimmt. Diese Erkenntnis ist sehr wichtig, denn sie lehrt, dass eine grosse, wenn auch kurze Überlastung des kapazitiven Wandlers absolut unzulässig ist, während dies von einem induktiven Wandler als selbstverständlich verlangt wird. Zwar ist der kapazitive Wandler nicht thermisch gefährdet, aber elektrisch, da die Spannung an C_2 unzulässig hohe Werte annehmen kann. Da jeder sekundäre Kurzschluss eine solche Überlastung darstellt, muss der Kondensator C_2 durch eine spezielle Funkenstrecke geschützt werden (A in Fig. 33).

Um den kapazitiven Wandler überhaupt zu Messzwecken verwenden zu können, ist es natürlich nötig, diese grosse

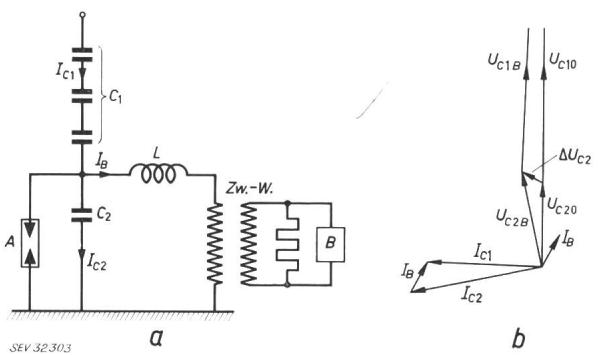


Fig. 33
Kapazitiver Spannungswandler bei Belastung

a Schaltschema; b Vektoriendiagramm
 I_{C1}, I_{C2} Kapazitätsströme; I_B totaler Bürdenstrom; C_1, C_2 Primär- und Sekundär-Kapazität; L Kompensationsdrosselspule; A Ableiter; B Bürde; $Zw.-W.$ Zwischen-Wandler; U_{C1B}, U_{C2B} Belastungs-Spannung an C_1 und C_2 ; U_{C10} Leerlaufspannung an C_1 ; U_{C20} Leerlaufspannung an C_2 ; ΔU_{C2} Spannungserhöhung an C_2

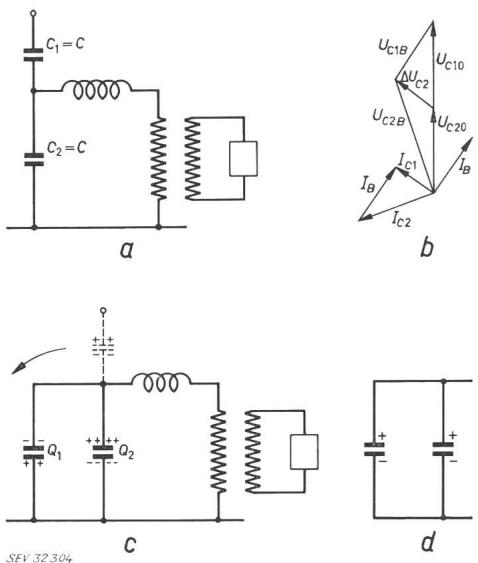


Fig. 34

Energiebeitrag der Kondensatoren C_1 und C_2

a Schema für $C_1 = C_2 = C_2$, d. h. für Übersetzungsverhältnis 2; b Vektor-Diagramm zu a (nicht maßstäblich); c Primärer Kurzschluss des Wandlers a; d Restliche Elektrizitätsmenge verteilt auf C_1 und C_2 . Q_1, Q_2 den verschiedenen Belastungsspannungen entsprechenden Elektrizitätsmengen

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 33

Spannungserhöhung an C_2 , welche zwischen 10 und 20 % liegen kann, zu kompensieren, was mit Hilfe der Kompensationsdrosselspule L geschieht. Die Spannung am Ende der Drosselspule und damit am induktiven Zwischenwandler erreicht dadurch wieder praktisch genau den Wert der Leerlaufspannung an C_2 .

Was den Energiebeitrag von C_1 und C_2 betrifft, ist es selbstverständlich, dass die Tatsache der Spannungserhöhung an C_2 bei Belastung des kapazitiven Wandlers für alle Übersetzungen gilt. Es sei daher ein einfaches Beispiel gewählt, in welchem $C_1 = C_2 = C$ ist, d. h. das Übersetzungsverhältnis ist 2.

Dem Schema in Fig. 34a entspricht das Vektor-Diagramm Fig. 34b, worin die Vergrößerung der Spannung an C_2 gegenüber derjenigen an C_1 deutlich zu erkennen ist. In Fig. 34c sind diese ungleichen Spannungen durch verschiedene Elektrizitätsmengen Q_1 und Q_2 dargestellt. Tritt nun ein primärer Kurzschluss auf, so ist zwischen C_1 und C_2 kein vollständiger Ladungsausgleich möglich. Es bleibt eine restliche Elektrizitätsmenge, die sich gleichmäßig auf die beiden Kondensatoren verteilt, wie dies in Fig. 34d angedeutet ist. Sie stellt die erwähnte Schwingungsenergie dar.

Es ist leicht einzusehen, dass nicht alle Kurzschlussmomente in Bezug auf Sekundärschwingungen gleichwertig sind. Tritt ein primärer Kurzschluss ein, wenn der Spannungsvektor ΔU_{C2} in Fig. 34b gleich Null ist, so weisen C_1 und C_2 die gleichen momentanen Spannungswerte auf, so dass in ihnen keine Energie zurückbleibt. Die Energie des Zwischen-Transformators vermag dann nur eine ganz schwache Schwingung auszulösen.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen induktivem und kapazitivem Spannungswandler besteht in ihrer Frequenzabhängigkeit. Obschon Frequenzänderungen in Hochspannungsnetzen heutzutage nur noch klein, oder wenn grösser, nur kurzzeitig sind, soll dieser Vergleich der Vollständigkeit halber doch noch angeführt werden.

Eine kleine Frequenzänderung führt beim induktiven Wandler zu einer umgekehrten, prozentual gleichen Änderung der Induktion im Eisenkörper. Da es sich maximal nur um einige Prozente handeln kann, tritt nicht die geringste Veränderung in der Messgenauigkeit des Wandlers auf.

Wie bereits erwähnt, ist es nötig, die Spannungserhöhung an C_2 des kapazitiven Wandlers durch die Drosselspule L zu kompensieren. Genau muss die Kompensation nach der Formel

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f (C_1 + C_2)}$$

vorgenommen werden. Sie kann also nur für eine bestimmte Frequenz f , die Nennfrequenz, genau sein. Tritt z. B. eine Frequenzänderung von +1 % auf, so nimmt die Spannungserhöhung an C_2 um 1 % ab, während die Spannung an der Kompensationsdrosselspule um 10 % zunimmt. An Stelle der vollständigen Kompensation tritt ein zusätzlicher Fehler-Vektor von 2 % der ursprünglichen Spannungserhöhung an C_2 auf, was unter Umständen unzulässig sein kann. Für Relaiswandler ist dies weniger wichtig; für genaue Messwandler hingegen müssen aus diesem Grunde die Kapazitäten C_1 und C_2 vergrössert werden.

Auch in der Temperaturabhängigkeit zeigen beide Wandlertypen ein verschiedenes Verhalten. Da im Betrieb Unterschiede in den Temperaturen von C_1 und C_2 auftreten, die sich in einer kleinen Kapazitätsänderung auswirken, so muss mit einer gewissen Änderung des Übersetzungsverhältnisses gerechnet werden. Die Temperaturabhängigkeit der Drosselspule und des Zwischenwandlers ist dagegen vernachlässigbar. Dasselbe gilt vom induktiven Wandler, dessen Übersetzungsverhältnis von der Temperatur praktisch unabhängig ist.

Wenn gegen die bisher erwähnten besonderen Eigenschaften des kapazitiven Wandlers nichts vorgekehrt würde, wäre das für den Betrieb unangenehm oder unzulässig, für den Wandler selbst aber nicht gefährlich. Er besitzt aber noch eine weitere Eigenheit, die ohne besondere Massnahmen seine Zerstörung herbeiführen kann: Das ist seine Neigung zur Ferroresonanz.

Aus dem Ersatzschema in Fig. 32b ist ersichtlich, dass die Kapazitäten $C_1 + C_2$ und die Induktivitäten L und L_{fe} in Serie geschaltet sind. Nun ist bekannt, dass bei Serieschaltung von Kapazitäten und Induktivitäten mit Eisenkernen sog. Kippschwingungen und unterharmonische Schwingungen auftreten können. Bedingung hierfür ist, dass sich der oder die Eisenkerne sättigen, was zum Beispiel durch eine primäre Überspannung oder durch das Öffnen eines sekundärseitigen Kurzschlusses hervorgerufen werden kann. Ohne auf diese sehr komplizierten Vorgänge einzugehen, sei nur erwähnt, dass als erste Vorsichtsmassnahme die im Kreise vorhandenen Eisenkerne nur schwach gesättigt werden. Als dann ist auf der Sekundärseite eine Ohmsche Belastung als Dämpfung vorgesehen. Diese darf aber keine zu grossen Leistung aufnehmen, da sonst wieder die Genauigkeit des Wandlers darunter leiden würde. Es werden deshalb noch zusätzliche Induktivitäten, Kapazitäten oder Kombinationen beider eingebaut. Auch kann in einem gewissen Bereich der in Fig. 33 eingezeichnete Überspannungsableiter bei der Bekämpfung der Ferroresonanz wirksam mithelfen. Tritt an einem kapazitiven Wandler Ferroresonanz auf, so kann er in kurzer Zeit elektrisch und thermisch zu Grunde gehen.

Die Spannungsanzeige auf der Sekundärseite wird unrichtig, die Kurve stark verzerrt und der effektive Wert der Spannung übersteigt den Nennwert ganz beträchtlich. Wenn also an einem kapazitiven Spannungswandler zu viel Spannung gemessen wird, muss er als ferroresonanzgefährdet betrachtet und möglichst schnell abgeschaltet werden.

Fig. 35a zeigt das Oszillogramm der Sekundärspannung eines kapazitiven Wandlers bei Ferroresonanz, Fig. 35b den Verlauf der Spannung, nachdem der Wandler mit einem Schutz gegen Ferroresonanz ausgerüstet worden ist. Es darf wohl gesagt werden, dass an den modernen kapazitiven Wandlern diese höchst unangenehme Erscheinung nicht mehr auftritt.

Nachdem der kapazitive Wandler bei diesem Vergleich eigentlich schlecht davongekommen ist, muss man sich fragen, warum er dann überhaupt gebaut wird. Offenbar hat er doch auch viel Positives an sich, was tatsächlich der Fall ist.

Der Hochspannungsteil des kapazitiven Wandlers, d. h. der Kondensator, darf auch für die höchst vorkommenden Spannungen als absolut stoßspannungssicher betrachtet werden. Diese Sicherheit liegt eigentlich in der Natur des Kondensators, der eine grosse Zahl in Serie geschalteter Elemente enthält, wodurch eine praktisch lineare Verteilung der Stoßspannung über seine ganze Höhe erfolgt. Die gleiche Stoßspannungssicherheit weisen heute auch gut gebaute induktive Spannungswandler auf, doch muss sie teuer erkauft werden, weshalb der kapazitive Wandler für die Höchstspannungen billiger ist als der induktive Wandler. Dies allerdings nur unter der Voraussetzung, dass keine grossen Messleistungen und Genauigkeiten verlangt werden. Auch ist es möglich, den Hochspannungskondensator des Wandlers für die Trägerfrequenzübertragung zu verwenden, wodurch separate Kopplungskondensatoren überflüssig werden, was sich natürlich in einer Verbilligung der Anlage auswirkt.

Zusammenfassend darf gesagt werden, dass für hohe Messleistungen und höchste Genauigkeiten induktive Spannungswandler zur Verwendung gelangen sollten und dies unabhängig von der Betriebsspannung. Für bescheidenere Ansprüche an Messleistung und Genauigkeit und Spannungen über 100 kV, sind die billigeren kapazitiven Wandler zu berücksichtigen.

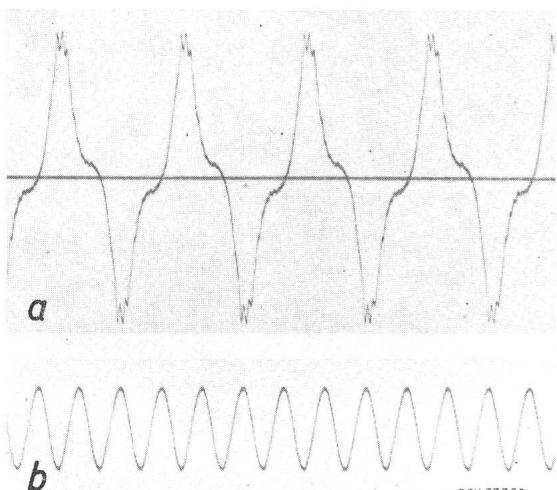


Fig. 35

Ferroresonanz des kapazitiven Spannungswandlers

a Spannungskurve bei Ferroresonanz; b Spannungskurve nach Einbau des Schutzes

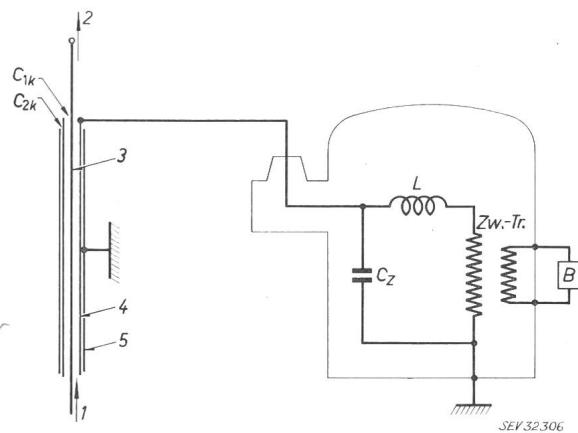


Fig. 36

Anschlußschema des Kabelspannungswandlers

1 vom Transformator; 2 zur Hochspannungsleitung; 3 Hochspannungskabel; 4 Messbelag; 5 Bleimantel; C_{1k} , C_{2k} Kabelkapazitäten; L Kompensationsdrosselpule; C_Z Zusatzkapazität zu C_{2k} ; Zw.-Tr. Zwi-schenwand'er; B Bürde

Es ist unrichtig, von einem kapazitiven Wandler die maximal mögliche Messleistung zu verlangen und ihn nachher zur Speisung von Distanzschutzrelais zu verwenden. Es wird dann die Dimensionierung eine Kompromisslösung. Kapazitive Wandler, die für den Netzschatz bestimmt sind, sollten nur eine minimale Leistung abgeben müssen und dies bei Übersetzungsfehlern von einem bis mehreren Prozenten. Dann können sie für die günstigsten Schwingungseigenschaften vorgesehen werden.

Zum Schluss sei noch kurz auf eine Spezialausführung des kapazitiven Wandlers, den sog. Kabelspannungswandler, hingewiesen. Er kann überall dort verwendet werden, wo zwischen Transformatoren und Schaltstationen eine Kabelverbindung besteht.

Fig. 36 zeigt das Schaltschema eines solchen Wandlers. Das Hochspannungskabel wird mit einem zusätzlichen Messbelag ausgerüstet, der einige wenige Millimeter unter dem

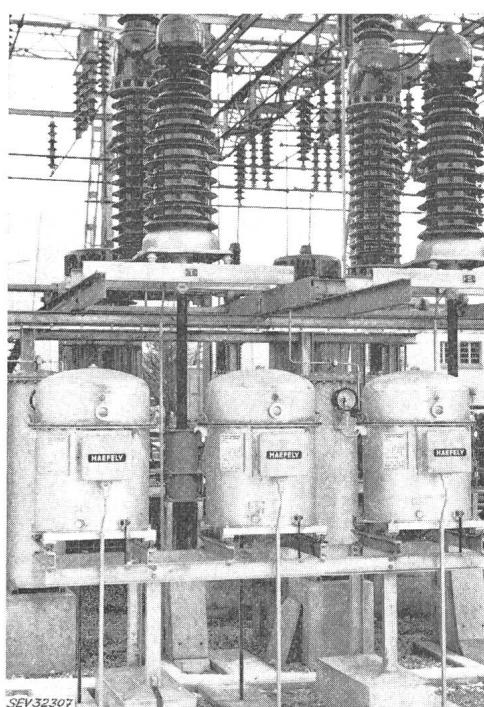


Fig. 37

Kabel-Spannungswandler an 150-kV-Kabel

Bleimantel liegt. An diesem Belag erfolgt der Anschluss der Sekundäreinheiten, die in einem separaten Kessel untergebracht sind. Um nicht allzu stark vom Übersetzungsverhältnis der Kabelkapazitäten C_{1K} und C_{2K} abzuhängen und zur Erhöhung der elektrischen Sicherheit von C_{2K} , enthält die sekundäre Messeinheit ausser der Drosselspule und dem Zwischen-Wandler noch eine regulierbare Zusatzkapazität C_Z .

Verglichen mit einem normalen kapazitiven Wandler sind die Kapazitäten, die dem Kabel-Spannungswandler zur Verfügung stehen, meistens sehr gross. Es ist deshalb auch möglich, normale Messleistungen mit Genauigkeit nach Klasse 0,2 zu garantieren. Infolge dieser grossen Kapazitäten ist auch das Schwingungsverhalten bei primärem Kurzschluss wesentlich besser und bedingt meistens keine besondern Vorkehrungen. Fig. 37 zeigt drei solcher Kabel-Messwandler in einer 150-kV-Schaltstation.

Literatur

- [1] Roth, A.: Hochspannungstechnik. Wien: Springer 1959.
- [2] Fabre, J. und A. Pichon: Processus et agents de dégradation du papier dans l'huile. Application aux transformateurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 18. Session 1960, Bd. 2, Rapp. 137.
- [3] Gertsch, G. A.: Transformateurs de tension capacitifs et leur fonctionnement avec les relais de protection de réseaux. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 18. Session 1960, Bd. 3, Rapp. 318.
- [4] Gertsch, G. A.: Fortschritte auf dem Gebiet der kapazitiven Spannungswandler. Scientia electr. 6(1960)1, S. 1...27.
- [5] Moser, H. P.: Trocknung und Entgasung der in Hochspannungs-Leistungstransformatoren verwendeten Isolierstoffe. ETZ-A 81 (1960)2, S. 41...47.
- [6] Stoll, P. und R. Schmid: Neue Erkenntnisse über die Eigenschaften der Mineralöle im Hinblick auf die Pflege von Transformatorenölen. Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn. 26(1960)12, S. 455...477; Micafil-Nachr. —(1961), April.
- [7] Aigner, V. O.: Détection de l'effet de couronne dans les transformateurs. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 19. Session 1962, Bd. 2, Rapp. 145.
- [8] Gänger, B., W. Siemer und H. J. Vorwerk: Ionisation interne dans les transformateurs (de puissance et de mesure) et mesure des perturbations radiophoniques qui en résultent. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 19. Session 1962) Bd. 2, Rapp. 111.
- [9] Grüss, H.: Zur analytischen Bestimmung von Wasser, Wasserstoff und Sauerstoff im Transformatorenöl. ETZ-B 14(1962)1, S. 6...9.
- [10] Hartill, E. R., D. H. Ryder, L. Smith, F. W. Taylor und R. E. James: Décharges par effet de couronne dans les transformateurs et méthodes de détection. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 19. Session 1962, Bd. 2, Rapp. 102.
- [11] Hyltén-Cavallius, N. und J. Fryxell: Effet de couronne dans les transformateurs de puissance et problèmes d'essai correspondants. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 19. Session 1962, Bd. 2, Rapp. 104.

Adresse des Autors:

Dipl. Ing. W. Ringger, Direktor, Emil Haefely & Cie. AG, Basel.

Über das Messen und Abschmelzen von Zusatzlasten

Kurzvortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 9. April 1963 in Zürich,
von H. Dauwalder, Bern

621.315.1.086.5

Zusatzlasten in Form von Rauhreif können die Betriebssicherheit von Leitungen ernstlich gefährden. Wenn Rauhreibildungen an den Seilen von Freileitungen rechtzeitig erkannt und gemeldet werden, so ist es möglich durch Heizen der Leiter den Behang abzuschmelzen solange er noch klein ist und sein Abfallen noch keine Schäden an der Leitung verursacht. Zum Heizen muss die Leitung ausser Betrieb genommen und am Ende kurzgeschlossen werden. Den Heizstrom liefert ein Stufentransformator.

Das Höchstspannungsnetz, das die Bernische Kraftwerke AG (BKW) als Betriebsinhaber betreuen, ist rund 600 km lang und reicht vom Tessin und Wallis über die Alpen und das Mittelland bis zum Nordfuss des Juras. In diesem ausgedehnten Netz, in welchem recht verschiedene klimatische Verhältnisse auftreten, werden auf etwa 20 km Leitungslänge Zusatzlasten $> 2 \text{ kg/m}$ beobachtet (Fig. 1). Sie können im gleichen Winter an der gleichen Stelle mehrmals auftreten. Die Zonen, in welchen diese Zusatzlasten vorkommen, liegen sowohl in den Hochalpen als in den Voralpen und im Jura. Im Mittelland dagegen treten auf gewissen Leitungen nur etwa alle 20 Jahre grössere Zusatzlasten auf, die Störungen an Weitspannleitungen verursachen könnten.

Die Starkstromverordnung verlangt für die mechanische Berechnung einer Leitung die Annahme einer Zusatzlast von 2 kg/m bei 0 °C. Das Eidg. Starkstrominspektorat kann die Annahme grösserer Zusatzlasten an Orten verlangen, wo diese zeitweise vorkommen. Leider sind dem Leitungsbauer diese Orte nur selten zum voraus bekannt und noch viel weniger weiß er etwas über die Grösse der Last. Der Projektierende stützt sich gewöhnlich auf die Erfahrungen, die

Les surcharges provoquées par le givre peuvent mettre sérieusement en danger la sécurité d'exploitation de lignes électriques aériennes. Lorsqu'une formation de givre sur les conducteurs est constatée et signalée à temps, il est alors possible de les chauffer et de faire fondre le givre avant qu'il soit important et que sa retombée n'endommage la ligne. Pour le chauffage des conducteurs, la ligne doit être mise hors service et son extrémité court-circuitée. Le courant de chauffage est fourni par un transformateur à gradins.

man an anderen Leitungen gemacht hat. Eine allzugrosse Annahme der Zusatzlasten ergibt teure Leitungen, zu kleine Werte führen zu einer schlechten Betriebssicherheit. Bei Leitungen, die dem Wind ausgesetzt sind und die im Jura höher als 900 m und in den Alpen höher als etwa 1200 m ü. M. liegen, ist bei der Annahme der Zusatzlasten Vorsicht am Platze.

In einem Fall konnte sich die BKW auf gemessene Werte stützen.

Während 10 Wintern, nämlich von 1946...1957 besass die BKW auf dem Grimselpass (2200 m ü. M.) eine Eislastmess-einrichtung, die ausserdem einen Thermographen aufwies. Die Anlage war jeweilen von anfangs September bis anfangs Juni in Betrieb und sollte für die projektierte Grimselleitung Angaben über die vorkommenden Zusatzlasten liefern (Fig. 2). Es wurden hier Zusatzlasten bis 7 kg/m beobachtet. Trotzdem die Anlage nicht ganz Fr. 8000.— kostete, konnten damit für den Bau der Grimselleitung, welcher 1957/58 erfolgte, wichtige grundlegende Hinweise ermittelt werden. Auf Grund der Ermittlungen wurde die Leitung über den Pass für eine Zusatzlast von 10 kg/m ausgelegt.