

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 24 (1933)
Heft: 20

Artikel: Aufgaben der praktischen Isolationstechnik
Autor: Imhof, A. / Stäger, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057259>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

Chapitre VI: Dispositions transitoires et finales.

Les compteurs, qui ont été mis dans le commerce avant le 1^{er} janvier 1918 peuvent y rester, même s'ils ne répondent pas aux points indiqués à l'art. 39 de l'Ordonnance, à condition qu'ils n'accusent pas des écarts supérieurs aux limites des erreurs d'attestation.

L'art. 40 règle d'une façon plus étendue les compétences de la Commission des poids et mesures, conformément aux besoins de la pratique.

Un appendice renferme les définitions des expressions telles que: essai de système, limite d'er-

reur de système, limite des erreurs pour l'attestation, limite des erreurs pour le commerce, erreur sur le courant, erreur sur la tension et angle de déphasage des transformateurs de mesure. Ces définitions étaient non seulement désirables, mais correspondaient en outre à un besoin réel, afin d'éviter des confusions de signes dans les indications relatives aux erreurs, car on avait jusqu'ici l'habitude d'indiquer, pour les transformateurs de mesure, le facteur de correction du rapport de transformation, au lieu de l'erreur sur le courant, resp. sur la tension.

Aufgaben der praktischen Isolationstechnik.¹⁾

Von Prof. A. Imhof, Chefing. der Micafil A.-G., Zürich-Altstetten, und Dr. H. Stäger, Vorstand der Materialprüfanstalt der A.-G. Brown Boveri & Cie., Baden.

621.315.6

Es wird auf eine Anzahl ungelöster Fragen der praktischen Isoliertechnik hingewiesen, wobei die Frage der Alterung der Isolierstoffe besonders berücksichtigt ist. Im Zusammenhang damit werden auch die Fragen der Glimmentladungen und der «X-Wachs-Bildung» erörtert. Ferner wird das Problem der Barrieren diskutiert. Die Autoren regen weitere Forschungen an zur Abklärung der offenen Fragen.

Les auteurs signalent un certain nombre de problèmes non encore résolus de la technique des isolants, en appuyant particulièrement sur la question du vieillissement des matières isolantes, s'arrêtent sur le problème des décharges par effluves et de la formation de «cire X», puis discutent la question des «barrières». Finalement, les auteurs suggèrent de nouvelles recherches pour éclaircir les questions encore obscures.

Die Isolationstechnik der letzten Jahre hat trotz einer mächtigen wissenschaftlichen und praktischen Entwicklung viele grosse Aufgaben noch ungelöst oder wenigstens nur angefangen gelassen. Die Verfasser möchten auf einige dieser offenen Probleme hinweisen, mit dem Zweck, deren intensive Bearbeitung anzuregen.

Ein weites, wenn auch mühsam erfassbares Gebiet ist die Erforschung der *Alterungserscheinungen*. Seitdem mit der steigenden Beanspruchung der elektrischen Maschinen und Apparate auch die Beanspruchung der Werkstoffe wesentlich zugenommen hat, sind eine ganze Menge von Erscheinungen festgestellt worden, die früher nicht in diesem Masse beobachtet werden konnten und als Ermüdung und Alterung bezeichnet werden. Diese beiden Begriffe sind den biologischen Wissenschaften entnommen und die damit zusammenhängenden Erscheinungen und Veränderungen beschäftigen heute den Werkstoffachmann auf allen Gebieten in erster Linie. Schon die genaue Umfassung der beiden Begriffe und die damit zusammenhängenden Vorgänge machen ausserordentliche Schwierigkeiten. Vielmehr aber sind es die Vorgänge selbst und die sie bedingenden Momente, die einer eingehenden Untersuchung und Ordnung bedürfen. Während auf biologischem Gebiete sowohl die Ermüdung als auch die Alterung Erscheinungen umfassen, die zu einer verminderten Lebensfähigkeit und schliesslich zum Tode führen und damit also der Forschung eine Richtlinie gegeben ist, sind sie auf dem Gebiete der Werkstoffe derartig verschie-

den, dass vorläufig noch die grösste Unordnung nicht nur bezüglich der Erforschung, sondern auch rein begrifflich vorhanden ist. Zum ersten Male wurde am internationalen Kongress für Materialprüfungen in Zürich²⁾ 1931 versucht, auf dem Gebiete der organischen Werkstoffe (die ja für die Isolationstechnik in hohem Masse in Frage kommen) eine gewisse Richtlinie für die weitere Bearbeitung des Fragenkomplexes zu schaffen. Im Schosse dieses Verbandes wurde denn auch beschlossen, diesen Fragen in Zukunft erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken, so dass bei einer nächsten internationalen Zusammenkunft die Möglichkeit bestehen sollte, gewisse systematische, geordnete Beiträge vorzulegen. Gerade für die Fachleute der Isoliertechnik wird es von grösstem Interesse sein, wenn sie sich an diesen Arbeiten beteiligen.

Die *Ermüdung* und die *Alterung* haben in den biologischen Wissenschaften, wie bereits bemerkt, eine bestimmte Richtlinie, weil sie Vorgänge beschreiben und erkennen sollen, die einen bestimmten Zielpunkt vor sich haben. Auf dem Gebiete der Werkstoff-Ermüdung und -Alterung kommen nun ganz neue Momente hinzu. Für die Isolierstoffe im besonderen handelt es sich darum, zu erfahren, wie sie sich unter dem Einflusse des *Luftsauerstoffes*, der *Feuchtigkeit*, des *elektrischen Feldes*, von *Glimmentladungen* und von *höherer Temperatur* verändern. Die *Ermüdungsgrenze* ist in allen diesen Fällen dann erreicht, wenn nach *Aufhören des entsprechenden Einflusses die ursprünglichen*

¹⁾ Bericht für die Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques à haute tension, Paris 1933.

²⁾ Siehe Kongressbuch 1932, Verlag des Internat. Verbandes für Materialprüfungen, Zürich, Leonhardstr. 27.

Eigenschaften nicht mehr vorhanden sind. Dauert dieser Einfluss weiter, dann altert der Werkstoff und wird schliesslich zugrunde gehen. Aus dieser Andeutung ist schon zu ersehen, dass es nicht gleichgültig ist, von welchem Gesichtspunkte aus man die Ermüdungs- und Alterungserscheinungen eines gegebenen Werkstoffes verfolgt. Es kann auch sehr wohl möglich sein, dass eine bestimmte Alterungserscheinung, von einem anderen Standpunkte aus betrachtet, nicht als solche zu bezeichnen ist, sondern eher als Verbesserung in Frage kommt. Daraus ergibt sich für die Forschung eine grosse Mannigfaltigkeit der Methoden, die zu diesem Zwecke herbeigezogen werden müssen. Bei gewissen anorganischen Kolloiden wurde der Begriff der Alterung so angewendet, dass man darunter die Stabilisierung eines labilen oder metastabilen Zustandes zu verstehen hat. Diese Auffassung kann in gewissen Fällen auch für die organischen Werkstoffe eine beträchtliche Bedeutung haben; sie ist aber keineswegs zu verallgemeinern. Eine weitere Erschwerung der richtigen Problemstellung auf dem Gebiete der Werkstoffe rührt daher, dass diese Stoffe in bestimmten Fällen schon vor der Inbetriebnahme, also vor ihrer Zuführung zum endgültigen Verwendungszweck, bereits gewisse Alterungserscheinungen hinter sich haben können, was vielleicht am besten am Beispiel einer sogenannten Hartpapierdurchführung gezeigt wird. Während der Herstellung der Durchführung wird das zu Klebezwecken verwendete Kunstharz durch entsprechende Temperatureinflüsse gealtert. Damit der Elektrotechniker wirklich ein dielektrisch gutes Material bekommt, muss dieser Prozess möglichst weit getrieben werden. Vom Standpunkt des Kunstharzfachmannes ist das Kunstharz in diesem Zustande, in dem der Elektrotechniker die Hartpapierdurchführung übernimmt, bereits wesentlich gealtert; für den Elektrotechniker beginnt die Erforschung des Alterns erst im Momente der Inbetriebnahme. Jetzt treten aber auch neue Einwirkungen hinzu, welche die Alterung im weiteren Verlaufe in andere Bahnen zu lenken vermögen; neben dem Einflusse der Wärme tritt jetzt auch derjenige des elektrischen Feldes und der Oxydation in Erscheinung. Aus solchen Ueberlegungen heraus wurde³⁾ die Unterscheidung in Alterungsvorgänge während der Verarbeitung und in betriebsmässige Alterung gemacht. Es war dies lediglich ein Vorschlag oder, vielleicht besser gesagt, eine Arbeitshypothese. Es wäre sehr zu begrüssen, wenn gerade aus den Kreisen der Isolierfachleute in diesem Zusammenhange die verschiedenen Ermüdungs- und Alterungserscheinungen studiert würden, damit die zur Diskussion stehende Arbeitshypothese ergänzt oder geändert werden kann.

Eine Menge wertvoller Arbeiten beschäftigen sich mit der Alterung der Isolieröle. Bis vor einiger Zeit wurden immer nur die chemischen Veränderungen, die im wesentlichen als sogenannte *Autoxydation* zu bezeichnen sind, untersucht. Da-

³⁾ Stäger, Kongress Zürich 1931.

bei bilden sich gewisse Oxydationsprodukte in Form von Säuren, die unter Wasserabspaltung und Polymerisation in feste, unlösliche Bestandteile übergehen können. Es ist bis heute noch nicht gelungen, diese Vorgänge durch die üblichen analytischen Methoden der Mineralölindustrie zu erfassen. Schon im Jahre 1929 wurden Berichte von Smurow⁴⁾ und von Riley⁵⁾ publiziert, die sich eingehend mit der dielektrischen Veränderung durch den *Alterungsvorgang der Isolieröle* befassen. Es wird in Zukunft unerlässlich sein, diesem Gebiete vermehrte Aufmerksamkeit zu schenken. Durch die Alterung der Isolieröle werden auch gewisse physikalische Eigenschaften, wie z. B. die Oberflächenspannung und damit das Verhalten in Kapillaren und an Membranen, verändert⁶⁾. Diese Erscheinung kann unter Umständen im elektrischen Feld die Ursache von gewissen Vorgängen an Grenzflächen, so z. B. zwischen Öl und Papier (in statischen Kondensatoren) sein, von denen weiter unten noch gesprochen werden soll. Es ist eine längst bekannte Tatsache, dass gewisse Metalle, wie z. B. Kupfer, diese Alterungsvorgänge positiv katalytisch zu beeinflussen vermögen.

Anhand dieses Beispiels ist es ganz lehrreich, einen Vergleich mit den biologischen Alterungsvorgängen anzustellen. Dort ist bei der Alterung ebenfalls zum Teil eine Oxydation als Ursache anzunehmen, die durch gewisse Metalle (Eisen im Blut) positiv katalytisch beschleunigt werden kann. Dadurch wird auch die Oberflächenspannung gewisser Gewebeflüssigkeiten verändert, und als weitere Folge werden die Diffusionsvorgänge an Zellmembranen und die Membrangleichgewichte gestört. Auch die andere, oben erwähnte Auffassung, dass es sich bei der Alterung um einen Stabilisierungsvorgang handelt, kann anhand dieses Beispiels erläutert werden. Durch die Oxydation entstehen stabile, nicht weiter oxydationsfähige, hochmolekulare Polymerisationsprodukte.

Ein Beispiel, bei dem wieder andere Gesichtspunkte massgebend sind, ist in einer Untersuchung von Montsinger⁷⁾ enthalten. Er verfolgte die Veränderung der Isolierstoffe im Zusammenhang mit der Belastung von Transformatoren und stellte dabei fest, dass die Alterung nicht erst bei einer bestimmten Temperatur beginnt. Bei festen Isolierstoffen, wie Isolierleinwand und Isolierpapier, konnten dielektrisch bis kurz vor dem Zusammenbruch keine wesentlichen Veränderungen festgestellt werden. Der Alterungsvorgang wurde daher anhand der Veränderung der mechanischen Eigenschaften der Faserstoffe verfolgt. Wenn auch die mechanische Festigkeit in dieser Hinsicht nicht immer, wie eigene Erfahrungen gezeigt haben, sehr

⁴⁾ Comptes Rendus des Travaux de la 4^{me} Session de la CIGR, Paris 1929, No. 21; ETZ 1930, S. 1515.

⁵⁾ Comptes Rendus des Travaux de la 4^{me} Session de la CIGR, Paris 1929, No. 45.

⁶⁾ Nutall, World Power, 1924, S. 92; Edwards, J. sci. Instruments, 1929, S. 90; Stäger u. Bohnenblust, Arch. Wärmewirtschaft, 1928, S. 59.

⁷⁾ J. Amer. Inst. Electr. Engng. 1931, S. 293.

empfindlich ist, so nimmt die Dehnung bei Einsetzen von Alterungserscheinungen doch sofort merklich ab. Montsinger war es möglich, anhand seiner Versuche eine Gleichung für die Alterung in Form der Abnahme der mechanischen Festigkeit in Funktion der Temperatur anzugeben. An gelber und schwarzer Isolierleinwand in Luft und Oel wurde bei verschiedenen Temperaturen festgestellt, dass die Abnahme der Zerreißfestigkeit auf einen bestimmten Betrag des Ausgangswertes in einem Zeitraum $y = A \cdot e^{-mx}$ erfolgt. Dabei sind A und m Konstanten und x bedeutet die Temperatur. Annähernd die gleiche Gesetzmässigkeit wurde an Kabelpapieren festgestellt. Nach den Untersuchungen von Montsinger ergibt sich, dass die Lebensdauer eines faserigen Isolierstoffes bei einer Temperaturerhöhung um 8°C auf die Hälfte der vorausgehenden niedrigeren Temperaturstufe zurückgeht. Es lässt sich hier eine ziemlich gute Uebereinstimmung zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Temperatur feststellen, wie sie in der chemischen Kinetik allgemein bekannt ist. Es wurde dort festgestellt, dass sich die Reaktionsgeschwindigkeit bei einer Temperaturerhöhung von ungefähr 10°C verdoppelt. Das gleiche Gesetz gilt für die Alterung in Luft und in Oel, wobei allerdings die Alterungsvorgänge in Oel wesentlich rascher verlaufen als in Luft. In dem Zeitraume von 0 bis 20 Jahren folgt die Lebenskurve der erwähnten Regel (die Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit bei 8°C Temperatursteigerung). Bei Ueberschreitung dieser Zeit nimmt die Zerreißfestigkeit rascher ab. Selbst bei Raumtemperatur von ungefähr 20°C kann für solche Isolierstoffe keine längere Lebensdauer als 100 Jahre angenommen werden.

Auch bei der *Alterung von faserigen Isolierstoffen* haben wir es mit einem Oxydationsprozess zu tun, dessen Reaktionsgeschwindigkeit verhältnismässig gut den Gesetzen der chemischen Kinetik folgt. Die Veränderungen lassen sich allerdings nicht durch die gleichen Mittel feststellen wie im Beispiel der Isolieröle, sondern lediglich an der Veränderung der mechanischen Festigkeit. Es konnte in solchen Fällen wohl gezeigt werden, dass die sogenannte Kupferzahl, die die Abbauprodukte von Zellulose anzeigt, im Laufe der Zeit zunimmt. Es besteht aber keine Proportionalität zwischen ihr und der Veränderung der mechanischen Festigkeit. Interessant ist die Feststellung, dass die Alterungserscheinungen unter Oel (also scheinbar unter Luftabschluss) rascher verlaufen als an der Luft, wo eine direkte Oxydation möglich ist. Es muss daher die Vermutung ausgesprochen werden, dass wohl die bei der Alterung des Oeles auftretenden Zwischenprodukte (wie Peroxyde), bei deren Zersetzung atomarer aktiver Sauerstoff entsteht, den Alterungsvorgang beschleunigen. Es wäre wünschenswert, wenn ähnliche Untersuchungen auch für andere Isolierstoffe durchgeführt würden. Bei Faserstoffen muss noch beigefügt werden, dass diese bei normalen Bedingungen eine bestimmte Quellfähig-

keit besitzen, durch welche ihre elastischen Eigenschaften bedingt sind. Durch eine rein thermische Alterung kann die sogenannte Quellungsbreite stark beeinflusst werden; sie nimmt im Verlaufe der Zeit infolge Entquellung verhältnismässig rasch ab, und damit gehen auch die elastischen Eigenschaften zurück. Es ist daher, wie bereits angedeutet wurde, in solchen Fällen oft festzustellen, dass die Dehnung im Anfange der Reaktion rascher abnimmt als die Zerreißfestigkeit.

In diesen Beispielen wird die Alterung durch eine chemische Reaktion gekennzeichnet. Unter Berücksichtigung der früheren Definition der Alterung als Uebergang in ein stabiles System ist der chemische Vorgang aber nicht immer erforderlich. Durch Untersuchungen⁸⁾⁹⁾ wurde z. B. bekannt, dass der in der Isoliertechnik in grossen Mengen verwendete Schellack durch Temperatureinwirkung in diesem Sinne verändert werden kann. Der eigentliche harzige Bestandteil des Schellacks, der in der Literatur als Schellackreinharz bezeichnet wird, verändert sich unter dem Einflusse der Temperatureinwirkung in ein höher molekulares, stabileres System. Es handelt sich bei diesem Vorgange neben einer Wasserabspaltung im Anfange um eine sogenannte Aggregation. Harries¹⁰⁾ machte seinerzeit ausdrücklich den Unterschied zwischen Polymerisation und Aggregation. Im ersten Falle handelt es sich nach seiner Definition um ein Aneinanderlagern von Doppelbindungen gleichartiger Moleküle. Wenn aber durch die Betätigung von Restvalenzen Oberflächen- oder kolloiden Kräften die Verknüpfung von gesättigten gleichartigen Molekülen bewirkt wird, dann spricht man von Aggregation. Durch diesen Vorgang geht der Schellack in eine unlösliche und unschmelzbare Form über. Nach eigenen Untersuchungen zeigte sich, dass bezüglich Alkohollöslichkeit und Schmelzpunkt der gleiche Zustand erreicht wird bei 100°C nach 35 h, bei 150°C nach 24 h und bei 180°C schon nach 4 h. Wenn höhere Temperaturen als ungefähr 180°C angewendet werden, so findet der rückläufige Vorgang statt; die grossen Moleküle desaggregieren und der Schellack zersetzt sich unter Bildung niedermolekularer Produkte. Es ist dies ein Beispiel für einen *Alterungsvorgang ohne chemische Reaktion*. Er wird gewöhnlich durchgeführt, bevor der fertige Isolationsteil in Betrieb genommen wird.

Es muss hier in Anlehnung an dieses Beispiel noch eine grundsätzliche Bemerkung betreffend den *Zerteilungsgrad* der Materie, in unserem Falle also der Bausteine der Isolierstoffe, gemacht werden. Von Wo. Ostwald¹¹⁾ wurde bereits zusammenfassend auf die Bedeutung der *Dispersoidik* in der Isoliertechnik hingewiesen. Die Isolierstoffe treten

⁸⁾ Stäger, Elektrotechn. Isoliermaterialien, Stuttgart 1931.

⁹⁾ Nagel und Baumann, Wiss. Veröff. Siemens-Konz., Bd. 1932, S. 99.

¹⁰⁾ Kolloid-Z. 1918, S. 181.

¹¹⁾ Kolloidwissenschaft, Elektrotechnik und heterogene Katalyse. Kolloidchem. Beihefte, Bd. 32, 1930.

nicht nur in den drei bekannten Aggregatzuständen auf, sondern auch in den drei allgemeinen Zerteilungsformen der Materie, nämlich als *lamellare*, *fibrillare* und *totaldisperse* oder korpuskular-disperse Systeme. Die Mannigfaltigkeit der möglichen Zustände wird noch wesentlich erhöht, wenn man berücksichtigt, dass in diesen drei Zuständen die einzelnen Stoffe wieder in verschiedenen Dispersitätsgraden auftreten können, also in verschiedenen Schichtdicken, Fadendurchmessern usw. Es hat sich gezeigt, dass die verschiedenen Isolierstoffe gerade in dem Gebiete des kolloidalen Zerteilungsgrades ganz ausgesprochene, abweichende Eigenschaften bezüglich des dielektrischen Verhaltens aufweisen. Schon vor längerer Zeit wurde z. B. nachgewiesen¹²⁾, dass vor allem das Wasser in kolloidaler Zerteilung die elektrische Festigkeit von Isolierölen herabsetzen kann. In grobdispenser Zerteilungsform als Tropfen ist der Einfluss von Wasser kaum festzustellen, ebensowenig in molekular-dispenser Zerteilung als gelöstes Wasser. Als weiteres Beispiel kann hier angeführt werden, dass bei gewissen Mehrstoffsystemen, wie sie als Verguss- und Füllmassen in der Elektrotechnik verwendet werden, oft der kolloidale Zerteilungsgrad angetroffen wird, und dass gerade in diesem Gebiete ganz sprunghafte Änderungen der dielektrischen Eigenschaften festgestellt werden können. Damit im Zusammenhang stehen z. B. Feststellungen, die an anderer Stelle veröffentlicht wurden¹³⁾. Es konnte bei gewissen Füllmassen festgestellt werden, dass sie unter gegebenen Bedingungen bei höheren Temperaturen starke Druckerhöhungen im Isolator erzeugen. Es hängt dies damit zusammen, dass infolge eines zu geringen Aggregationsgrades die plastifizierenden Eigenschaften (die eine Funktion der Aggregation bzw. Desaggregation sind) ungenügend waren, so dass z. B. im kalten Teile des Isolators die Druckerhöhungen von der warmen Seite her nicht durch plastische Deformation der Masse ausgeglichen wurde. Der örtliche Druckanstieg kann zur Störung des Isolators führen. Für die Herstellung sowohl hinsichtlich der Ausgangsstoffe als auch der Weiterverarbeitung des Mehrstoffgemisches zu Isoliermassen sind diese Erkenntnisse ausserordentlich wichtig. Es ist bedauerlich, dass gerade auf diesem Gebiete immer noch rein empirisch gearbeitet wird und leider fast keine systematischen Untersuchungen durchgeführt worden sind. Die kolloidalen Systeme neigen nun alle mehr oder weniger zum Uebergang in den grobdispersen Zustand, womit wiederum die Alterung verknüpft ist.

Die Alterung der Isolation bringt in die Konstruktion etwas Unsicheres. Wir wissen beispielsweise wenig über die Alterung eines elektrostatischen Kondensators, dessen Dielektrikum aus öl-impregniertem Papier besteht. Die Alterungsvorgänge während der Verarbeitung verbessern in den

meisten Fällen die Eigenschaften, sie stabilisieren die Materialeigenschaften und sind deshalb grösstenteils beabsichtigt. Richtiger ist das Wort Alterung angewandt für die betriebsmässige Alterung, die meist eine Verschlechterung der Eigenschaften herbeiführt und sich in der Regel langsam vollzieht. F. A. Schäfer¹⁴⁾ stellte an Paraffin-Kondensatoren bei Messungen, die über viele Monate dauerten, fest, dass die dielektrischen Verluste Schwankungen wechselnder Höhe um einen Mittelwert ausführen. Eine Alterung in ungünstigem Sinne fand nicht statt, sondern die Verluste zeigten eher eine abnehmende Tendenz. Die gleichen Erscheinungen wurden an Kondensatoren mit ölgetränkter Papierisolation wahrgenommen. Auch von uns wurde an Kondensatoren mit ölgetränkter Papierisolation in einigen Fällen eine deutliche Abnahme der dielektrischen Verluste nach einer Zeit von vielen Monaten festgestellt. Die genannten Verlustschwankungen sind, wie die Untersuchungen zeigten, nicht durch Temperaturschwankungen bedingt. Während die normalen Schwankungen etwa in den Grenzen ± 5 bis 10% des Mittelwertes stattfinden, wurde von Schäfer noch eine sehr eigenartige Erscheinung beobachtet, darin bestehend, dass die Verluste anfänglich die bereits bekannten «normalen» Schwankungen zeigten, um nach mehrtägiger Betriebszeit plötzlich auf einen Wert anzusteigen, der etwa dem doppelten bisherigen Mittelwert entsprach. Beispielsweise stieg $\text{tg } \delta$ nach 35tägigem ununterbrochenen Betriebe von etwa $6 \cdot 10^{-3}$ innerhalb 24 h auf $15 \cdot 10^{-3}$, um nach weiteren 48 h wieder auf einen Wert herunterzusinken, der unterhalb des niedrigsten bisher gemessenen Minimalwertes lag. Die gleiche Erscheinung hat sich bei einem Kondensator dreimal innert 30 Tagen wiederholt, ohne zu einem Zusammenbruch des Dielektrikums zu führen. Auch an aus Hartpapier bestehenden Kondensator-Durchführungen wurde die selbsttätige Zu- und Abnahme der Verluste wahrgenommen¹⁵⁾; Schäfer und Estorff deuten Ursachen für die von Ihnen beobachtete Erscheinung an, die aber nur als Vermutungen zu bezeichnen sind.

Eine besondere Art der Alterung ist der Einfluss der *Glimmentladungen* bei Isolierstoffen, worüber unsere Kenntnisse noch sehr in den Anfängen sind. Allgemein besteht gegen Glimmentladungen eine grosse Aengstlichkeit, ohne generell durch bestimmtes Wissen verursacht zu sein. Wir wissen aus Erfahrung, dass Porzellan durch dunkle Entladungen nicht angegriffen wird, ebenso gewisse Glimmersorten, während andere (lufthaltige) empfindlich sind. Die organischen Isolierstoffe erfahren unbedingt Veränderungen, die meist nach einiger Zeit zur Zerstörung führen. Die englischen Firmen verwenden oft die Methode des Abhorchens der Hartpapier-Isolatoren, um in äusserst empfindlicher

¹²⁾ Stäger: Kolloid-Z. 1928, S. 61.

¹³⁾ Stäger: Elektrotechnische Isoliermaterialien, Stuttgart 1931.

¹⁴⁾ Ueber das dielektrische Verhalten von Niederspannungskondensatoren mit geschichteter Papier-Isolation. Diss. der Techn. Hochschule Darmstadt 1929.

¹⁵⁾ ETZ 1926, S. 1001.

Weise festzustellen, ob bei betriebsmässiger, also dauernder Spannung Glimmentladungen vorhanden sind oder nicht. Indes darf angenommen werden, dass zahlreiche solche Isolatoren seit vielen Jahren im Betrieb sind, die nicht frei des «hiss»-Geräusches sind und sich trotzdem gut hielten. Systematische Versuche, die mit Feldern bekannter Stärke und allgemein genau definierten Zuständen vorgenommen wurden, fehlen bis heute vollständig, wahrscheinlich wegen der hiezu nötigen grossen Geduld. Solche Untersuchungen würden der Industrie von ganz bedeutendem Nutzen sein, da heute in zahlreichen Unsicherheitsfällen vielleicht übergrösse, teure Vorsicht angewandt wird, in andern Fällen aber bittere Erfahrungen teuer bezahlt werden.

Durch diese wenigen Beispiele sollte lediglich gezeigt werden, wie mannigfaltig sich das Altern von Werkstoffen darstellt. Es sollte dadurch ange-regt werden, diese Vorgänge von den verschiedensten Standpunkten aus zu erforschen, da nur dadurch eine Möglichkeit der Erkenntnis des wirklichen allgemeinen Verhaltens von Isolierstoffen gegeben ist.

Eine in neuerer Zeit bedeutungsvolle Erscheinung ist die *Glimmentladung in Oel*, namentlich in feinsten Oelschichten. Vorsichtiger sollten wir sagen, die Wirkung starker Wechselfelder in dünnen Oelschichten bei ölprägniertem Papier. Die Erscheinung ist vom Kabelbau her bekannt als X-Wachs-Bildung und gewinnt neuerdings Bedeutung bei den statischen Kondensatoren.

Bei sehr hohen Wechselfeldern scheidet sich unter Umständen auf dem Papier unter Gasentwicklung eine gelbliche Schicht ab. Nach Stunden, Tagen oder Wochen, je nach Intensität der Erscheinung, folgt der Durchschlag. Hat die geringste Oelzersetzung einmal begonnen, so liegt die Grenzspannung, bei welcher die Erscheinung aufrecht erhalten bleibt, tiefer als vor ihrem Beginn. In einigen Fällen haben wir beobachtet, dass vorangehende Belastung mit kleineren Wechselfeldern, die unter Zwischenschaltung von Pausen schrittweise erhöht werden, die Grenzspannung gehoben werden kann. Indes steht noch nicht fest, wie lange diese Verbesserung anhält. Sind mehrere Papiere aufeinandergeschichtet, so beachtet man die Wachsstellen stets auf den Papieren, welche bei den Elektrodenfolien anliegen. Für Transformatorenöl scheint eine Wechselfeldstärke (50 Per./s) von mindestens etwa 130 kV/cm notwendig zu sein, um den Vorgang der Wachs-bildung einzuleiten. In den meisten Fällen haben noch sehr viel höhere Felder keine Oelzersetzung herbeigeführt. Die uns bekanntesten Fälle betreffen die Beanspruchung mit Wechselfeldern. Mit Gleichspannung traten sogar bei einer 24 h lang dauernden Feldstärke von 670 kV/cm keine Blasen auf, selbst dann nicht, wenn zuvor durch Wechselfeldspannung Blasen erzeugt wurden. Es wurden auch Fälle beobachtet, wo erst nach langer Feldbeanspruchung die Zersetzung begann.

Die ersten Beobachtungen ähnlicher Art sind wohl an Hochspannungskabeln gemacht worden. Das Forschungslaboratorium der Brocklin-Edison Comp.¹⁶⁾ und Delmar¹⁷⁾ berichten von einem teigartigen Zersetzungsprodukt bei öl- und petrolat-imprägnierter Papierisolation. Interessant sind die Feststellungen von F. A. Schäfer¹⁸⁾ an paraffin-imprägnierten Papierkondensatoren. Bei Ueber-schreitung einer gewissen Grenzspannung entstand zwischen einem Belag und der ihm anliegenden Papierschicht eine ausgedehnte Glimmstelle; die spezifische Beanspruchung betrug 89 kV/cm. Das Zersetzungsprodukt stellte nach mehrmonatigem Betrieb eine feste braune Kruste dar, nach deren Entfernung sich feine, wie mit einer Stecknadelspitze gestochene Löcher im Papier zeigten. Die Ausbildung der Glimmstellen war übrigens bei Verwendung von Zinn als Elektrodenmaterial wesentlich stärker als bei Verwendung von Aluminium. Schäfer denkt an eine Ionisationserscheinung infolge der Anwesenheit dünner Luft- bzw. Gasschichten im Kondensatorinnern. Höhere und längere Evakuierung und Imprägnierung änderten nichts an den Erscheinungen. Auch rechnerische Ueberlegungen zeigten, dass die Erklärung durch Ionisation nicht einfach ist. Zwei Beobachtungsergebnisse stehen sich widerspruchsvoll gegenüber: 1. Die Bestätigung des Bestehens einer untern Spannungsgrenze für den Eintritt der Glimmentladung und 2. die Tatsache der Bildung von Ionisationsstellen bei Teilspannungen, die weit unterhalb dieser Spannungsgrenze liegen. Unter Pres-sung stehende Flächenteile zeigten keinerlei Zersetzungsercheinungen, woraus geschlossen wird, dass die an diesen Stellen vorhandenen Lufteinschlüsse weniger als die zur Stossionisation erforderlichen Mindestweglänge aufweisen. Schäfer bemerkt als auffallend, dass auch bei fallender Tendenz der Kurve $\text{tg } \delta = f(U)$ und beim Betriebe mit unterhalb des Kurvenknickpunktes liegenden Spannungen eine Glimmerscheinung in den geschichteten Isolierstoffen vorhanden sein könne und dass demnach eine Ionisierungskurve allein nicht als kennzeichnend für das Vorliegen einer Glimmentladung angesehen werden dürfe. Dieser Schluss ist vielleicht nicht richtig, denn es ist wohl klar, dass eine Zersetzung ohne vorhandene Gaseinschlüsse stattfindet.

Wohl aber findet, wie im Laboratorium der *Micafil A.-G.* an ölgetränkten geschichteten Isolierstoffen beobachtet wurde, bei der Braunfärbung stets eine Gasentwicklung statt. Es ist denkbar, dass die Zersetzung des Oeles die primäre Erscheinung ist und erst die dann entstehenden Gase Anlass zu Ionisationserscheinungen geben. Die Feststellungen im Laboratorium der *Micafil A.-G.* er-

¹⁶⁾ J. Amer. Inst. Electr. Engng. 1925, S. 141, Referat ETZ 1925, S. 424.

¹⁷⁾ Elektr. Wirtsch. 1927, S. 147.

¹⁸⁾ Ueber das dielektrische Verhalten von Niederspannungskondensatoren mit geschichteter Papier-Isolation. Diss. der Techn. Hochschule Darmstadt 1929; Arch. Elektrotechn. 1929, Bd. XXIII, Heft 3.

gaben auch bei ölimprägniertem Papierdielektrikum, dass 1. die Zersetzung in der Schicht stattfindet, welche direkt den Elektrodenfolien anliegt, 2. mit Druck glatt aufeinanderliegende Schichten nicht oder erst bei viel höheren Spannungen zur Zersetzung führen, 3. bei einmal begonnener Zersetzung eine viel kleinere Spannung genügt, um die Zersetzung weiter zu führen, und 4. die Erscheinung stets nach einiger Zeit zum Durchbruch führt.

Die Feststellung, dass

1. die Zersetzung des Imprägniermittels sowohl bei Oel wie bei Paraffin stattfinden kann,
2. dass nicht alle Elektrodenmaterialien die gleiche Neigung für den Zersetzungsprozess aufweisen, und
3. dass die Zersetzung in den an den Elektroden anliegenden Schichten beginnt,

legt die Vermutung ausserordentlich nahe, dass die in den Elektroden absorbierten und die adherierten Gase es sind, welche unter dem Einflusse des starken elektrischen Feldes austreten und Anlass zu Glimmentladungen geben. Durch den der Imprägnierung vorangehenden Vakuumprozess ist es nicht möglich, diese Gase zu entfernen, da einerseits die Widerstände in den engen Schichten sehr gross sind, andererseits die Temperatur der Metallfolien nicht hoch genug getrieben werden kann. Die weitere Forschung muss sich u. a. mit Versuchen beschäftigen, die Metallelektroden z. B. durch langdauernde Erhitzung im Vakuum zu entgasen und dann in Kondensatoren einzuführen, ohne sie wieder mit Gasen in Berührung zu bringen.

Eine weitere Hypothese für die Einleitung der genannten Zersetzungserscheinungen besteht in der Annahme, dass das Oel noch gewisse Mengen von Wasser enthalte, das unter der Einwirkung des elektrischen Feldes verdampft oder zersetzt wird.

Der X-Wachs-Bildung liegen grundsätzliche chemische Vorgänge zugrunde. Es ergibt sich aus den Arbeiten der verschiedensten Autoren, dass Kohlenwasserstoffe unter dem Einflusse elektrischer Entladungen hochmolekulare Polymerisationsprodukte bilden können. Wir müssen dabei zwei grundsätzliche Reaktionsmöglichkeiten unterscheiden:

1. die Polymerisation, d. h. die Bildung höherer Kohlenwasserstoffe, ohne Gasentwicklung, und
2. die Polymerisation und Kondensation, wobei die höheren Verbindungen sich nur unter Gasentwicklung bilden können.

Für den grössten Teil der flüssigen Isolierstoffe, wie sie in Kondensatoren, Kabeln usw. verwendet werden, kommt der zweite Vorgang in Frage. Die Menge der entwickelten Gase hängt ab von der Art der Kohlenwasserstoffe. Die Paraffinkohlenwasserstoffe entwickeln wesentlich grössere Mengen Gas bei gleicher Beanspruchung als die Naphtenkohlenwasserstoffe. Die Hauptmenge der frei werdenden Gase besteht aus Wasserstoff, mit ganz geringen Mengen niederer Kohlenwasserstoffe. Die zurück-

bleibenden ungesättigten Reaktionsprodukte polymerisieren spontan an der Entstehungsstelle. Die Bildung des X-Waxes ist also ein ausgesprochener Polymerisationsvorgang. Ueber den Polymerisationsgrad kann heute noch nichts ausgesagt werden. Es wird wohl auch schwer fallen, in dieser Hinsicht Angaben zu machen, da bei dauerndem Einflusse der Polymerisationsgrad zunehmen wird.

Nach den neuesten Untersuchungen von Hayatt¹⁹⁾ kann der Vorgang sich ohne primäre Gasentwicklung abspielen. Es würde sich also in diesem Falle um eine reine Polymerisation im elektrischen Felde handeln. Die bereits erwähnten Feststellungen bezüglich der Gasentwicklung bei Paraffinölen konnten bestätigt werden. Die Entwicklung von Gas ist entsprechend dem grösseren Wert für $tg \delta$ bei Paraffinöl grösser als bei Naphtenöl. Da der Hauptanteil der entwickelten Gase Wasserstoff ist, ist die Möglichkeit einer pyrogenen Zersetzung, also eines örtlichen Crackings infolge stellenweiser Ueberhitzung, ausgeschlossen.

Unter dem Einflusse des elektrischen Feldes wird auch die Oberflächenspannung der flüssigen Dielektrika verändert. Im Zusammenhang mit der Alterung von Isolierölen durch Sauerstoff und Wärme haben wir bereits darauf hingewiesen, dass die Oberflächenspannung und damit die Kapillarkräfte durch die sich bildenden Reaktionsprodukte vermindert wird. Infolge geringerer Kapillarität geht bei gealterten Oelen auch die Imprägnierfähigkeit zurück. Unter dem Einflusse des elektrischen Feldes entstehen nun bei der X-Wachsbildung in geringem Masse ungesättigte Verbindungen. Eingehende Versuche haben uns gezeigt, dass diese auf die Oberflächenspannung einen wesentlichen Einfluss auszuüben vermögen. Bezüglich der Vorgänge an Grenzflächen, in diesem Falle Isolieröl-Papier, sind also zwei Gesichtspunkte zu berücksichtigen: Die Veränderung der Kapillarkräfte durch die Alterung durch Oxydation und die Bildung ungesättigter Verbindungen im elektrischen Feld. Da beide Erscheinungen von der Zeitdauer des betreffenden Einflusses abhängig sind, werden auch die Veränderungen der Kapillarkräfte zeitabhängig sein, so dass also nicht von einem konstanten Zustand gesprochen werden kann.

Zur Gasentwicklung führt auch die noch zu wenig beachtete *Oelverdrängung an Elektrodenrändern* bei ölimprägnierten Faserstoffen. In der neuzeitlichen Isolationstechnik spielen gerade diese Dielektrika eine hervorragende Rolle. Prüft man z. B. eine ölimprägnierte Papierschicht von mehreren Millimetern Dicke zwischen aufgesetzten Elektroden, so beobachtet man von einer gewissen Spannung an, dass das Oel von den Elektroden weggedrängt wird und so das Dielektrikum nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Innern allmählich immer trockener wird, so dass schliesslich bei einer zu niedrigen Spannung der Durchschlag erfolgt. Glücklicherweise sind bei praktischen Anordnun-

¹⁹⁾ Electr. W. N. Y. 1932, S. 152.

gen die Elektroden meist nicht direkt aufliegend, sondern infolge ihres Abstandes vom Faserstoff-Dielektrikum ölumschwemmt. In diesem Falle wird die Oelabdrängung nicht beobachtet. Die Oelverdrängung wird an scharfen Elektrodenrändern, z. B. Metallfolien, die zwischen Papierschichten liegen, beobachtet, wobei die Ränder deutlich infolge der Entladungen in den sich bildenden Gasblasen leuchten. Dieses Abdrängungsphänomen ist z. B. der Hauptgrund, dass Kondensatoren für hohe Wechsellspannungen nicht in einer Wickelheit, sondern durch Serieschaltung mehrerer Wickelkondensatoren kleinerer Einzelspannung gebaut werden. Das hier nur andeutungsweise genannte Oelverdrängungsphänomen verdient zufolge seiner praktischen Wichtigkeit die weitestgehende Beachtung und Erforschung.

Solange Oel in der Isolationstechnik verwendet wird, solange kennt man schon die *Anwendung von festen Barrieren zur Erhöhung der Gesamtdurchschlagsfestigkeit*²⁰⁾. Die Lehrbücher weisen auf die Barrierentechnik hin, aber man beobachtet, dass nur wenige Konstrukteure verstehen, die Barrieren an Zahl und Stärke richtig zu dimensionieren. Die eigentlichen Gesetze der Barrierentechnik sind merkwürdigerweise noch nicht aufgestellt; die Konstrukteure gehen noch recht gefühlsmässig vor.

Für die Barrierentechnik ist wiederum der Dispersitätsgrad der im flüssigen Dielektrikum enthaltenen Verunreinigungen von grösster Bedeutung. Es sind nicht so sehr die Verunreinigungen als solche, als eben gerade der spezielle Zerteilungsgrad der entsprechenden Materie. Da mit diesem, wie schon früher bemerkt, z. B. im Gebiete der kolloidalen Zerteilung ganz spezielle Erscheinungen verbunden sind, so ist es selbstverständlich, dass einwandfreie Konstruktionsgrundlagen für die Anordnung von Barrieren nur dann geschaffen werden können, wenn auf diese Punkte geachtet wird.

In Oel sind bei allen praktischen Anwendungen Fasern vorhanden, welche sich im elektrischen Feld richten; sie formen Brücken, längs denen der Durchschlag eingeleitet wird. Wahrscheinlich ist es die in den Fasern konzentrierte Feuchtigkeit, die einen wenig widerstandsfähigen Pfad bildet. Auch ohne zusammenhängende Brücken können die Fasern durch ihre Spitzenwirkung den Durchschlag herbeiführen. Durch eingefügte isolierende Trennwände kann der Durchschlag verhindert werden. Für deren Verteilung und Eigenschaften haben sich durch die Erfahrung etwa folgende Lehrsätze ergeben:

1. Die Verteilungsdichte ist proportional der Feldstärke zu wählen, soweit dies praktisch möglich ist, d. h. an den Stellen grosser Spannungsgradienten sind die Barrieren am dichtesten zu lagern.

2. Die Zahl der Barrieren ist so gross zu wählen, als dies mit Rücksicht auf andere Bedingungen (Preis, mechanische Festigkeitsforderungen, Oelzirkulation usw.) möglich

²⁰⁾ Imhof, Barrieren unter Oel zur Beherrschung des elektrischen Feldes. Micafil N. 1933, Nr. 4.

ist; deren Stärke ist in Abhängigkeit von deren Zahl zu wählen, und zwar so, dass für die gesamte dielektrische Schicht die grösstmögliche elektrische Festigkeit erreicht wird. (Es gibt in jedem Falle ein Minimum an Materialaufwand.)

3. Die Momentan-Durchschlagsfestigkeit der Barrieren muss so gross sein, dass die gesamte Prüfspannung im Dielektrikum kurzzeitig durch die Barrieren allein getragen werden kann.

4. Die Barrieren sollen möglichst senkrecht auf die dielektrischen Feldlinien stehen.

5. Eine Angleichung der Dielektrizitätskonstante an diejenige des Oeles hat nur insofern einen Vorteil, als dann auch im Dauerzustand die Barrieren einen grösseren Teil des Spannungsgefälles auf sich nehmen als bei niedrigen Dielektrizitätskonstanten.

6. In vielen Anwendungsfällen müssen die Barrieren Rücksicht nehmen auf die Möglichkeit der Oelbewegung.

Es ist eine dankbare und reizvolle Arbeit, diese Regeln durch systematische Versuche auszubauen, um damit der elektrischen Festigkeits- und Konstruktionslehre ein noch wenig geschärftes Instrument zu voller Brauchbarkeit zu entwickeln.

Zu den Fragen, die sich stellen, gehören u. a. die folgenden: Unterscheiden sich direkt auf den Elektroden anliegende Barrieren in ihrer Wirkung von den davon wegstehenden? Wie wirken Elektrodenränder bei dicht anliegenden Barrieren und bei wegstehenden Barrieren? Sind ölsaugende oder nicht ölaufnehmende Barrieren vorteilhafter und in welcher Hinsicht? Bei hohem Druck dürfte diese Frage anders zu beantworten sein als bei normalem Druck. Wie gross ist die optimale Dichte der Barrieren zu wählen? Wie hängt sie zusammen mit der Oelqualität? Wie verhalten sich die Barrieren in wasserhaltigem Oel bei langer Einwirkung, wie, wenn das Oel durch trockenes ersetzt würde? Wirken auch leitende Trennwände als Barrieren? In vielen Fällen sind leitende Trennwände, welche die Rolle von Potential-Steuerungsflächen erfüllen, durchaus möglich. In Durchführungsisolatoren wurden solche schon viel angewandt, sowohl in Verbindung mit isolierenden Barrieren wie auch ohne solche.

Es wurde nachgewiesen²¹⁾, dass die an den Elektroden anhaftende Grenzschicht eine grosse Rolle auf die Durchschlagsfestigkeit ausübt. Die Oele enthalten im allgemeinen eine grössere Menge gelöster Gase oder leicht flüchtiger Bestandteile. Der Durchschlag kann durch eine Art Gas- bzw. Dampfentbindung eingeleitet werden. Der Mechanismus der Gasentbindung wird durch örtliche Erwärmungen, wie sie etwa an der Oberflächenschicht der Elektrode durch den Stromdurchgang erzeugt werden könnten, erklärt. Isolierende Elektrodenüberzüge würden in dieser Hinsicht eine Rolle spielen.

Unsere Untersuchungen haben ergeben, dass auch isolierende Querwände im Feld denkbar sind, welche die Festigkeit des Oeles herabsetzen. Dies gilt z. B. von Wandungen aus eingestampfter Watte, von Quarzsandschichten usw. Bei lockeren Faser-

²¹⁾ H. Edler und C. A. Knorr, Ueber den Einfluss von Wasser und gelösten Gasen auf die elektrischen Eigenschaften dielektrischer Flüssigkeiten. Forschungshefte der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen 1930, 2. Heft.

gebildet richten sich zahlreiche Fasern in Feldrichtung; bei Pulvern, Sand usw. ist die Erklärung nicht so leicht.

Zweifellos wirken Barrieren unter Oel in Gleichspannungsfeldern wesentlich anders als in Wechselfeldern. Die Spannungsverteilung bei Isolierschichten ist, auch wenn das Feld auf Grund der geometrischen Anordnung homogen sein müsste, nicht mehr eine gleichmässige, sondern wird durch Ladungswolken stark gestört. Die Spannungsverteilung ist dann anders bei angelegter Spannung, als wenn sich nach kurzzeitigem Elektrodenkurzschluss und Wiederisolierung der Maximalwert der Rückspannung eingestellt hat, und endlich bei Dauerkurzschluss der Elektroden. Es sei diesbezüglich besonders auf die sehr zahlreichen Messungen von Paul Böning hingewiesen²²⁾. Diese Erscheinungen müssen bei der Entwicklung von Gesetzen über Barrieren berücksichtigt werden. Die zur Bildung von Raumladungen erforderliche Zeit ist so kurz, dass deren Einfluss auch in Wechselfeldern studiert werden muss.

Auch in Gasen können Barrieren angewandt werden. Dünne Schirme, welche im unhomogenen Feld senkrecht zur Entladerichtung angebracht sind, ergaben sowohl bei Stoss-, Gleich- und Wech-

²²⁾ Mitteilung aus den technischen Instituten der staatlichen Tung-shi-Universität, Woosung, 1932, Heft 5.

selfspannung eine Erhöhung der Durchschlagsspannung, Begrenzung der Vorströme und eine Stabilisierung der leuchtenden Vorentladungen²³⁾. Besonders häufig macht die Technik Anwendung von Barrieren gegen Oberflächenentladungen. Hierüber bestehen schon mehrere Untersuchungen²⁴⁾. Wir verzichten deshalb hier, näher darauf einzugehen.

Die Entwicklung der Barrieren nach den angegebenen Prinzipien führt zu fabrikatorischen Problemen der Isoliertechnik, die erst in den Anfängen ihrer Entwicklung stehen. Es erhebt sich der Wunsch nach grossen Isolierflächen verschiedenster Formen. Bis heute sind solche erst mit Hilfe von Wickel-, Segmentier- und sehr teuren Pressverfahren erreichbar, während der Giessprozess leider noch keine elektrisch hochwertigeren, chemisch stabilen, ölbeständigen und nicht fliessenden Isolierstoffe liefert. Das Giessen und eventuelle Blasen (wie Glas) oder Aufspritzen (wie Gummi in dünnen Schichten) ist eines der grossen fabrikatorischen Zukunftsprobleme, dessen Bedeutung nur richtig eingeschätzt wird, wenn bedacht wird, dass die Barrierentechnik von nicht geringerer Bedeutung ist wie die Feldformung und wichtiger als das Kondensatorprinzip zur Feldsteuerung.

²³⁾ H. Roser, EZT 1932, Nr. 17, S. 411.

²⁴⁾ U. a. Hescho-Mitteilungen Nr. 63.

Ueber eine Anwendung der Nomographie auf die Berechnung der Spannungsänderung eines Transformators.

Von Alexander Fischer, Prag.

518.3:621.314.21

Es wird der Entwurf eines Rechenbildes (Nomogramms) besprochen, welches ermöglicht, das bei der Berechnung der Spannungsänderung eines Transformators auftretende System von vier simultanen Gleichungen zu lösen.

L'auteur discute un projet d'abaque qui permet de résoudre un système de quatre équations simultanées que l'on rencontre lors du calcul de la variation de tension d'un transformateur.

1. Problemstellung.

§ 16 der Regeln für die Bewertung und Prüfung von Transformatoren (RET) (VDE 0532/1930) lautet¹⁾:

Spannungsänderung eines Transformators bei einem anzugebenden Leistungsfaktor ist der Abfall der Sekundärspannung, der bei Uebergang von Leerlauf auf Nennbetrieb auftritt, wenn Primärspannung und Frequenz ungeändert bleiben. Die Spannungsänderung wird in Prozenten der Nennsekundärspannung ausgedrückt. Die Spannungsänderung u_φ wird ermittelt aus der Nennkurzschlussspannung u_K in Prozenten und der relativen Ohmschen Spannung u_r in Prozenten, die dem Wicklungsverlust entspricht.

Die Spannungsänderung u_φ wird allgemein nach folgender Formel berechnet:

$$u_\varphi = u'_\varphi + 1 - \sqrt{1 - u''_\varphi{}^2} = u'_\varphi + 0,5 u''_\varphi{}^2 \quad (a)$$

Hierin bedeutet:

$$\begin{aligned} u'_\varphi &= u_r \cos \varphi + u_s \sin \varphi, \\ u''_\varphi &= u_r \sin \varphi - u_s \cos \varphi. \end{aligned} \quad (b)$$

¹⁾ VDE-Vorschriftenbuch, 19. Aufl., 1933, S. 663.

Die Streuspannung ist

$$u_s = \sqrt{u_K^2 - u_r^2} \quad (c)$$

Für die Vertafelung des Systems (a) bis (c) finden sich im Schrifttum bereits einige Arbeiten^{2) 3) 4)}, die die gestellte Aufgabe aber nicht unmittelbar bzw. vollständig lösen. Dies soll im folgenden geschehen.

2. Tafelentwurf.

Wie aus den Grundlehren der Nomographie bekannt, sind die Funktionsbeziehungen (a) und (c) am zweckmässigsten durch Tafeln mit drei parallelen Leiterträgern für u_φ , u'_φ , u''_φ bzw. u_s , u_K , u_r darstellbar. Hierzu tritt nun die Vertafelung des Systems (b), die das Hauptinteresse bietet.

²⁾ E. Bihari-G. Stein, Transformatorenberechnung mittels Nomogramm, ETZ 1930, Nr. 11.

³⁾ F. Dantscher, Nomographische Bestimmung der Spannungsänderung und des Wirkungsgrades bei Transformatoren. Siemens-Z. 1933, Nr. 3.

⁴⁾ E. Mittelmann, Graphische Darstellung der Spannungsänderung von Transformatoren, E. u. M. 1923, H. 12 und 40.