

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 57 (1966)  
**Heft:** 23

**Artikel:** Über die Alterungsvorgänge im Dielektrikum von Leistungskondensatoren  
**Autor:** Boletzky, G. v.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916653>

### **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:** 03.04.2026

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

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)  
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

## Über die Alterungsvorgänge im Dielektrikum von Leistungskondensatoren

Von G. v. Boletzky, Basel

621.319.4 : 620.193.918

*Es wird versucht, eine kurze Übersicht über die für die Alterung des Kondensator-Dielektrikums massgebenden Vorgänge zu geben und den komplexen Zusammenhängen durch systematische Betrachtung ihren verwirrenden Charakter zu nehmen.*

*Dans un court aperçu, les facteurs déterminant le vieillissement du diélectrique des condensateurs sont rappelés et les relations complexes entre les processus se déroulant dans le diélectrique soumis à un examen systématique.*

Auf dem Gebiete der Leistungskondensatoren sind in den letzten 30 Jahren grosse technische und wirtschaftliche Fortschritte erzielt worden, die sowohl die Ausgangsmaterialien als auch die Konstruktion und die Herstellungsmethoden betreffen. Obwohl die Leistungskondensatoren, die schon anfangs der 30er Jahre auf den Markt kamen, sich als durchaus zuverlässig und betriebssicher erwiesen haben, gab es in der Folgezeit eine ständige Entwicklung und Verbesserung auf diesem Gebiet, die auf neuen Erkenntnissen fussend zu immer kleineren und billigeren Kondensatoren führte, ohne dass die ansteigende Beanspruchung des Dielektrikums mit einer Herabsetzung der Betriebssicherheit der Kondensatoren erkauft werden musste. Man kann sogar behaupten, dass die heutigen Leistungskondensatoren betriebssicherer sind, da man inzwischen gelernt hat, die Faktoren, die das Betriebsverhalten und die Lebensdauer der Kondensatoren bestimmen, besser einzuschätzen und bei der Dimensionierung der Kondensatoren zu berücksichtigen. Die sehr weitgehenden Qualitätsverbesserungen beim Kondensatorpapier haben diese Entwicklung wesentlich unterstützt. Für den allgemeinen Fortschritt entscheidend war aber der durch die Forschung eröffnete tiefere Einblick in die Zusammenhänge der Alterungsprozesse im Dielektrikum und der sie steuernden Einflüsse. Es ist durchaus anzunehmen, dass der Fortschritt der Erkenntnis immer weiter gehen und zu einem immer besseren Verständnis der im Dielektrikum vor sich gehenden Prozesse führen wird. Es dürfte lohnend sein, sich von Zeit zu Zeit den Stand der Entwicklung vor Augen zu führen. Dies soll die Aufgabe der nachfolgenden Übersicht sein.

Unter der Alterung der Kondensatoren versteht man die Veränderung der Eigenschaften des Dielektrikums Papier/Imprägniermittel im Verlaufe der Lebensdauer des Kondensators, d. h. unter dem Einfluss der elektrischen und thermischen Beanspruchungen. Tatsächlich sind es die elektrischen und thermischen Beanspruchungen, die eine mehr oder weniger schnell fortschreitende Veränderung des Dielektrikums verursachen, und zwar je nach der Höhe dieser Beanspruchungen und je nach der Qualität und dem ursprünglichen Zustand der Hauptbestandteile des Dielektrikums, d. h. des Papiers und des Imprägniermittels.

Das in den Kondensatoren verwendete Papier ist ein Spezialpapier hohen Reinheitsgrades, das zu einem grossen Teil (85...95 %) aus  $\alpha$ -Zellulose besteht. Der Alterungsprozess der Zellulose besteht in einem mechanischen und chemischen Zerfall, der auch eine Veränderung der elektrischen Eigenschaften des Papiers nach sich zieht.

Das Imprägniermittel, das in Leistungskondensatoren verwendet wird, kann Mineralöl oder Askarel (chlorierte Diphenyle) sein. Die Alterung dieser Isolierflüssigkeiten ist im allgemeinen durch eine chemische Dissoziation charakterisiert, die sich durch Bildung von Gas und freien Ionen äussert. Diese Zersetzungsprodukte beschleunigen ihrerseits die Alterungsvorgänge in den Teilen des Dielektrikums, die elektrisch und thermisch beansprucht sind.

Die *elektrische Beanspruchung* kann eine Alterung des Kondensators bewirken, wenn im Dielektrikum Teilentladungen auftreten und bestehen bleiben oder — in Abwesenheit von Teilentladungen — wenn elektro-chemische Reaktionen erfolgen [1; 2]<sup>1)</sup>.

Eine *Teilentladung (Ionisation) im Dielektrikum* kann auf folgende Ursachen zurückgeführt werden:

- a) Feuchtigkeit im Papier auch in geringen Mengen (daher die Notwendigkeit sorgsamer Trocknung und Imprägnierung bei der Herstellung der Kondensatoren [3]);
- b) Lokale Schwachstellen im Imprägniermittel in den Gebieten maximaler Feldstärke (in der Umgebung von Spitzen oder scharfen Kanten — Sache der Kondensatoren-Konstruktion);
- c) Bereits im Neuzustand vorhandene Gasblasen (Herstellungsverfahren!);
- d) Durch Überspannungen produziertes Gas (Dimensionierung bzw. Konstruktion, bzw. Fabrikation!);
- e) Unterdruckbildung im Kondensator (Konstruktion!);
- f) Erschöpfung des Gasabsorptionsvermögens des Imprägniermittels durch während «intermittierender Teilentladungen»<sup>2)</sup> entstandenes Gas;
- g) Beanspruchung, für die der Kondensator nicht gebaut war.

Die *elektrochemischen Reaktionen* sind auf die Anwesenheit von Ionen (in der Regel aus Verunreinigungen) im

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

<sup>2)</sup> Intermittierende Teilentladungen sind Entladungen, die sich nicht weiterentwickeln und von selbst verlöschen [4].

Die Zeit bis zur Entstehung «anwachsender Teilentladungen» ist durch folgende Faktoren bestimmt:

- a) Qualität des Imprägniermittels (Gasverhalten [5; 6]);
- b) Geschwindigkeit der Gasbildung durch die intermittierenden Teilentladungen;
- c) Diffusionsgeschwindigkeit des Gases im Imprägniermittel;
- d) Ursprünglich im Imprägniermittel gelöste Gasmenge.

festen oder flüssigen Dielektrikum zurückzuführen [7]. Diese Ionen verursachen eine fortschreitende Zersetzung des Dielektrikums, die schliesslich beim Auftreten einer elektrischen Beanspruchung zu einem Defekt führen kann. Den elektrochemischen Reaktionen kann entgegengewirkt werden, indem im Papier, im Imprägniermittel und in den anderen Bestandteilen des Kondensators *der Feuchtigkeitsgehalt so weit wie möglich herabgemindert und die Anwesenheit von Ionenverunreinigungen vermieden wird.*

Die Papierstruktur scheint einen bedeutenden Einfluss auf die örtliche Verteilung der Ionen zu haben [8; 9]. Die Ionen (und eventuell sogar feste Partikel, soweit ihre Abmessungen entsprechend klein sind) sammeln sich nämlich unter dem Einfluss des elektrischen Feldes in den durch die zerklüftete Papieroberfläche gebildeten Hohlräumen (übrigens ebenso wie in Falten, Löchern, Unebenheiten und anderen Unregelmässigkeiten des Dielektrikums). Dadurch können sich in diesen Flüssigkeitstaschen Raumladungen bilden und örtlich erhöhte Beanspruchungen entstehen; auch eine der hohen Ionenkonzentration entsprechende örtlich verstärkte elektrochemische Zersetzung ist infolgedessen zu erwarten.

Das Endstadium einer Alterung des Dielektrikums durch die Wirkung elektrischer Beanspruchung ist in der Regel eine Verkohlung an der Stelle, an der die Alterung am weitesten fortgeschritten ist — sei es infolge der sich steigernden Wirkung immer stärker werdender Teilentladungen oder unter dem Einfluss der mit dem Fortschreiten der elektrochemischen Zersetzung ansteigenden dielektrischen Verluste —; an dieser Stelle kann dann der Durchschlag des Dielektrikums sehr rasch erfolgen.

Diesem Endstadium geht in der Regel eine längere Periode voraus, während der sich die Alterung des Dielektrikums je nach den thermischen und elektrischen Bedingungen entwickelt. Beim Auftreten einer Überspannung oder einer örtlichen Erwärmung erfährt der Alterungsprozess dann zu gegebener Zeit eine Beschleunigung, eine starke Ionisation tritt auf und die Entwicklung endet mit einem Durchschlag [10].

Der Verlauf der Alterung unter dem Einfluss elektrischer Beanspruchung, die wegen der ansteigenden dielektrischen Verluste meist mit einer thermischen Beanspruchung Hand in Hand geht, kann durch die *Messung des Verlustfaktors* ( $\text{tg } \delta$ ) kontrolliert werden [11]. Diese Methode ist für die Feststellung einer das Dielektrikum gleichmässig durchsetzenden Alterung wirklich empfindlich, ist aber für das Auffinden einer auf einen oder mehrere Punkte des Dielektrikums beschränkten Zersetzung unbrauchbar. In diesem Fall ist die *Spannungsprüfung* für den Nachweis der Tatsache, dass das Dielektrikum in seiner ganzen Ausdehnung keine schwachen oder defekten Stellen aufweist, immer noch am besten geeignet. Hinsichtlich der *Ionisationsmessung*, die grundsätzlich sehr interessant sein könnte, muss festgestellt werden, dass noch keine Apparatur zur Verfügung steht, die für alle praktisch vorkommenden Fälle geeignet sein würde. Es ist jedoch mit einer breiten Entwicklung auf diesem Gebiete der Messtechnik zu rechnen [12; 13].

Die *thermischen Beanspruchungen*, die zu einer Alterung des Kondensatorpapiers führen, lassen sich wie folgt charakterisieren [14; 15; 16]:

Unter der Einwirkung hoher Temperaturen kann vor allem durch unmittelbare thermische Zersetzung — *Pyrolyse* — ein Zerfall der Molekülstruktur der  $\alpha$ -Zellulose erfolgen. Allerdings fällt der Prozess der reinen Pyrolyse praktisch ausser Betracht, weil ein solcher erst oberhalb einer Temperatur von 250 °C unter hohem Vakuum sowie in Abwesenheit von Feuchtigkeit und jeglicher Säurespuren intensiven Charakter annimmt.

Enthält das Papier Restfeuchtigkeit bzw. Spuren von Säure, so kann ein Prozess der *Hydrolyse* bei Temperaturen ausgelöst werden, die viel niedriger liegen als im vorhergehenden Fall. Die hydrolytische Zersetzung verläuft auf der Stufe der Sauerstoffbindungen von Molekülgliedern der Zellulose. In diesem Fall, ebenso wie zu Beginn eines pyrolytischen Prozesses, findet ein Absinken des Polymerisationsgrades (DP) der  $\alpha$ -Zellulose statt, das von einer Abnahme der mechanischen Festigkeit des Papiers begleitet ist.

Es ist schwer, einen Grenzwert der Temperatur für das Einleiten eines hydrolytischen Zerfalls anzugeben, man kann jedoch annehmen, dass unter den üblichen Bedingungen hinsichtlich der Trocknung und des Gehaltes an anorganischen Verunreinigungen des Kondensatorpapiers, die gefährliche Grenze bei etwa 150 °C liegt.

Eine dritte Art des Zerfallprozesses, der die Zellulose bei thermischer Einwirkung unterworfen sein kann, ist die *Oxydation*. Bei Atmosphärendruck kann die Oxydation bereits bei Temperaturen von 60...70 °C einsetzen. Zu Beginn verursacht sie keine Zerstörung der Moleküle, sondern führt zur Bildung von Carboxylgruppen (COOH), die für organische Säuren charakteristisch sind. In diesem Stadium ist eine gewisse Oxydation der Zellulose für das Kondensatorpapier sogar nützlich, weil dadurch die Zeitkonstante der Kondensatoren erhöht wird und ihre Lebensdauer bei Gleichspannung ansteigt [17]. Dies lässt sich offenbar auf eine Vergrösserung der Reaktionsfähigkeit der Zellulose in bezug auf Ionenaustausch und die damit verbundene Leitfähigkeitsabnahme des Imprägniermittels im fertigen Kondensator zurückführen. In den weiteren Stadien der Oxydation kann die steigende Anzahl der Carboxylgruppen den Prozess der Hydrolyse unterstützen, der zum Bruch der Molekülketten führt.

Während der Trocknung und der Imprägnierung befindet sich das Kondensatordielektrikum unter Ausschluss des Luftsauerstoffs; eine Oxydation der Zellulose kann unter diesen Umständen nur eine untergeordnete Rolle spielen, wenn nicht eine ungeeignete Behandlung des Papiers bereits vorher stattgefunden hatte [11]. Ist jedoch ein Bereich des Papiers innerhalb des Kondensators einer hohen thermischen und elektrischen Beanspruchung in Anwesenheit z. B. von Zersetzungsprodukten des Askarels ausgesetzt, so kann eine intensive Oxydation der Zellulose auftreten [18; 19].

Aus der grundsätzlichen Betrachtung der möglichen Zersetzungs Vorgänge in der Zellulose bei ihrer Erhitzung kann geschlossen werden, dass diese Zersetzung im wesentlichen mit dem Bruch der langen Molekülketten beginnt. Dieser Prozess, bei dem der durchschnittliche Polymerisationsgrad sinkt, bedingt eine Herabsetzung der mechanischen Festigkeit des Papiers, während seine elektrischen Eigenschaften in den frühen Stadien nicht schlechter zu werden brauchen.

Zur Beurteilung des Alterungszustandes von Papier verfolgt man deshalb gewöhnlich die Veränderung seiner

mechanischen Eigenschaften. Dadurch ist es zwar möglich, einen fortgeschrittenen Zerfall zu entdecken, für eine eingehende Erforschung der Alterungsursachen und zum Erkennen der Strukturveränderungen eines Dielektrikums ist diese Methode jedoch zu wenig differenziert.

Zu diesem Zweck bedient man sich physikalisch-chemischer Methoden, unter denen die nachfolgenden als die wichtigsten Verfahren bezeichnet werden können, die zu den schlüssigsten Resultaten führen [u. a. 18; 19; 20]:

a) Die Messung des Polymerisationsgrades (DP): Diese Methode wird angewandt, um den Zerfall durch Bruch der Molekülketten z. B. unter der thermischen Einwirkung ohne Sauerstoffzutritt zu beurteilen.

b) Die Messung des Kupferindex: Diese Methode erlaubt eine indirekte Messung der Kettenlänge und die Feststellung von Keton-Gruppen (C = O) oder Aldehyd-Gruppen  $\left( \begin{array}{c} -C=O \\ | \\ H \end{array} \right)$ .

c) Analyse der Carboxyl-Gruppen (COOH): Diese chemische oder spektrographische (Infrarot-) Methode eignet sich für das Studium der Oxydation der Zellulose, die unter der Einwirkung der Temperatur und in Anwesenheit oxydierender Körper, wie z. B. der Zersetzungsprodukte des Imprägniermittels, vor sich geht. Die IR-Spektroskopie erlaubt, die Veränderung der Papierstruktur im Verlaufe der Alterung zu verfolgen. Eine Analyse der anorganischen Verunreinigungen, die den durch thermische und elektrische Beanspruchungen in Mitleidenschaft gezogenen Zellulosefasern anhaften, kann evtl. die Abklärung der Ursachen der stattgefundenen beschleunigten Alterung des Papiers erlauben. Ionen von Mineralien können tatsächlich eine deutliche Wirkung auf die dielektrischen Verluste (Na u. a.), auf die elektrische Durchschlagsfestigkeit (Fe, Cu) und auf den Wassergehalt (Ca, Mg) haben.

Es ist ein weites Forschungsgebiet, das konsultiert werden muss, wenn man den Alterungsvorgängen im Kondensator-Dielektrikum nachgehen und sie deuten will.

#### Literatur

- [1] Z. Krasucki, H. F. Church et C. G. Garton: Facteurs déterminant la durée de vie utile de condensateurs de puissance. CIGRE-Rapport No. 138, 1962.

- [2] Y. S. Pinal: Ionisationscharakteristiken und Alterung des Papier-öl-Dielektrikums von Kondensatoren. Elektrotechnika 36(1965)1, S. 58...60, ref. in: Bull. SEV 56(1965)14, S. 567...568.
- [3] I. F. Peresselenzew: Der Einfluss der Vakuum-Wärme-Behandlung auf die elektrischen Eigenschaften von Leistungs-Kondensatoren mit Papier-dielektrikum. Elektrotechnika 35(1964)6, S. 48...50, ref. in: Bull. SEV 55(1964)20, S. 1033...1034.
- [4] G. S. Kuischinskij und O. O. Tapupere: Registrierung der Ionisationscharakteristiken von Isolationen. Elektritschestwo -(1960)11, S. 42...48, ref. in: Bull. SEV 52(1961)12, S. 461...462.
- [5] S. A. Clarke and E. H. Reynolds: The Influence of the Constitution of Oils upon their Gassing under Electric Stress. Dielectrics 1(1963)1, S. 26...44.
- [6] A. Nosseir and R. Lawrence: Effects of the Constituents of Insulating Oils on their Gassing Properties and Breakdown Strength. Nature (London) 206(1965)-, S. 85...86.
- [7] M. J. Coquillon: Contrôle des isolants liquides par les mesures de résistance et de pertes diélectriques. Rev. gén. Electr. 73(1964)12, S. 603...614.
- [8] H. F. Church et Z. Krasucki: Vieillissement des condensateurs de puissance. Rapport CIGRE No. 112, 1966.
- [9] J. A. Kok: Der elektrische Durchschlag in flüssigen Isolierstoffen. Philips Technische Bibliothek. N. V. Philips' Gloeilampenfabrieken Eindhoven 1963, ref. in: Bull. SEV 54(1963)19, S. 813.
- [10] P. Gaussens et al.: Le comportement des condensateurs sous l'influence des contraintes thermiques. CIGRE-Rapport No. 160, 1962.
- [11] R. Fournié: Contribution à l'étude du vieillissement des condensateurs de puissance sous l'influence de contraintes thermiques et électriques. CIGRE-Rapport No. 145, Annexe 1, 1966.
- [12] F. H. Kreuger: Discharge Detection in High Voltage Equipment. Temple Press London 1964.
- [13] K. A. Sajzew und A. A. Scharlot: Automatische Registrierung von Teilentladungen in der elektrischen Isolation. Elektrotechnika 37(1966)6, S. 51...54, ref. in: Bull. SEV 57(1966)19.
- [14] W. T. Renne und G. P. Ssoja: Untersuchung der Wärmebeständigkeit von Kondensator-Papier. Elektritschestwo -(1964)9, S. 76...80, ref. in: Bull. SEV 56(1965)5, S. 170...171.
- [15] K. Potthoff: Zum Langzeitverhalten elektrischer Isolierstoffe bei thermischer Beanspruchung. ETZ-A 85(1964)15, S. 449...454.
- [16] N. W. Edgerton: The Philosophy of Thermal Aging Tests of Materials. AIEE-Conference Paper CP 63-415, Winter General Meeting, New York 1963.
- [17] D. A. MacLean: Paper Capacitors Containing Chlorinated Impregnants. Benefits of Controlled Oxidation of the Paper. Industrial and Engineering Chemistry 39(1947)11, S. 1457...1461.
- [18] R. Fournié, Y. Le Gall et C. Roulet: Etude de la dégradation des papiers de condensateurs sous l'influence de contraintes thermiques et électriques par spectrographie infrarouge. Bull. Soc. franç. Electr. 8/5(1964)53, S. 321...331.
- [19] R. Fournié, Y. Le Gall et C. Roulet: Etude de la dégradation des papiers pour condensateurs par spectrographie infrarouge. Bull. Association Technique de l'Industrie Papetière 19(1965)2, S. 106...109.
- [20] R. F. Schwenker and L. R. Beck: Study of the Pyrolytic Decomposition of Cellulose by Gas Chromatography. J. Polymer Science Part C -(1963)2, S. 331...340.

#### Adresse des Autors:

Dipl.-Ing. G. v. Boletzky, Leiter der Abteilung Kondensatoren der Emil Haefely & Cie. AG, 4000 Basel 28.

## Modelltheorie und Modellmessung

Von F. Schwab, Zürich

621.7.072

Nach einem kurzen Überblick über die Modelltheorie wird auf die Bedeutung der Proportionalitätsfaktoren für die Modellherstellung hingewiesen. Dann werden die Modell-, Sonden- und Isoliermaterialien, die Elektrolyte und Diaphragmen, die im elektrolytischen Trog zur Anwendung gelangen, diskutiert. Zudem werden praktische Betrachtungen über die Modellmessung im elektrolytischen Trog bei stationären und dynamischen Vorgängen angestellt.

Après un bref aperçu de la théorie du modèle, l'auteur démontre l'importance des facteurs proportionnels au point de vue de l'exécution des maquettes. Il discute ensuite des matériaux servant aux maquettes, aux sondes, les matériaux isolants, les électrolytes et diaphragmes utilisés dans les cuves électrolytiques. L'auteur présente également des considérations pratiques au sujet des mesures sur maquettes dans la cuve électrolytique lors de réactions stationnaires et dynamiques.

### 1. Einleitung

Unter Modellen versteht man Nachbildungen von elektrischen Apparaten oder Schaltungen mit kleineren Abmessungen, die die gleichen elektrischen Eigenschaften aufweisen wie das entsprechende Objekt in Originalgrösse. Die Entwicklungsarbeiten an Modellen werden viel einfacher und wirtschaftlicher, als wenn die Versuche an Objekten in Originalgrösse, die heute meistens hohe Spannungen, grosse Ströme und Leistungen haben, ausgeführt werden müssen. Die Ähnlichkeitsgesetze, die bei der Transformation vom Original zum Modell eingehalten werden müssen, sind zusammengefasst unter dem Ausdruck Modelltheorie.

### 2. Gesetze der Modelltheorie

Unter der Annahme, dass das Modell geometrisch ähnlich dem Original ist, wird auch die räumliche Verteilung der elektromagnetischen Eigenschaften, d. h. die relative Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$ , die relative Permeabilitätskonstante  $\mu_r$ , und die elektrische Leitfähigkeit  $\gamma$  ähnlich. Somit müssen als Grundbedingung in isotropen Medien die Maxwell'schen Gleichungen für das Modell genau so stimmen wie für das Original. Im Allgemeinen werden aber die Zeitmaßstäbe des Modells verschieden denen des Originals sein.

Die Maxwell'schen Gleichungen für das Original (Index O), deren Differentiation nach den Originalkoordinaten ausge-