

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 100 (2009)
Heft: 8

Artikel: Regeneration von gealtertem Isolieröl mit Fullererde
Autor: Köstinger, Paul
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856401>

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: 14.01.2026

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

Regeneration von gealtertem Isolieröl mit Fullererde

Dielektrische Eigenschaften von Transformatorenöl wiederherstellen

Das Isolieröl in Leistungstransformatoren altert unter dem Einfluss von Wärme, Sauerstoff und Kupfer. Dabei werden Alterungsprodukte erzeugt wie Alkohole, Säuren und schliesslich Schlamm. Diese Produkte beeinflussen die Alterung der Papierisolation des Transformators und somit auch dessen Lebenserwartung negativ. Bei einem Ölwechsel wird nur ein begrenzter Teil dieser Alterungsbeschleuniger entfernt, da sich diese zum grossen Teil im Papier ansammeln. Bei einem Umlaufprozess mit Fullererde wird dagegen die gesamte Isolation gewaschen und ein Grossteil der Alterungsrückstände entfernt. Dies führt zu einem wesentlich besseren Langzeitergebnis als bei einem konventionellen Ölwechsel an den Transformatoren.

Die Erhöhung der technischen Lebenserwartung von Leistungstransformatoren ist ein wichtiges Thema, da sich ein Grossteil der in der westlichen Welt installierten Ein-

Paul Köstinger

heiten in der «zweiten» Lebenshälfte befinden. Ein Hauptaugenmerk gilt dabei dem Zustand des Isolationssystems, das auf organischen Materialien basiert: Mineralöl

und Papier. Diese Komponenten altern und verlieren über die Zeit ihre Widerstandskraft gegenüber den Belastungen, denen sie ausgesetzt sind (Kurzschlüsse, Vibrationen etc.). Hauptfaktoren für die Alterung der organischen Materialien sind Temperatur, Feuchtigkeit, Säuren und Sauerstoff.

Vor allem die Wirkung der Säuren interessiert hier, denn neue Forschungsergebnisse zeigen, dass insbesondere die niedermolekularen Säuren, d.h. die wasserlösli-

chen, einen wichtigen Einfluss auf den Alterungsprozess haben. Diese Säuren sind gleichzeitig Nebenprodukte des Alterungsprozesses. Dies löst eine Negativspirale aus, bei welcher die Alterung auch bei gleichbleibender Belastung (Temperatur) beschleunigt wird. Will man diese Entwicklung bremsen, müssen die Abfallprodukte der Alterung so effizient und früh wie möglich aus dem Transformator entfernt werden.

Öl- und Papieralterung

Das Isolieröl im Transformator altert über die Zeit durch den ständigen Einfluss von Wärme, Sauerstoff und metallischen Katalysatoren (Kupfer und Aluminium). Der Hauptprozess ist dabei die Oxidation der Ölmoleküle. Dabei werden polare Alterungsprodukte wie Ketone, Aldehyde und Säuren gebildet, welche verschiedene Ölparameter beeinflussen:

- Grenzflächenspannung
- Verlustfaktor, $\tan \delta$
- Farbe
- Säuregehalt

Bei diesem Zersetzungsprozess ist Schlamm das Endprodukt. Bisher galt diesem das Augenmerk, da er einzelne Kühlkanäle blockieren kann. Die daraus folgende lokale Überhitzung konnte zu einer forcierten Papieralterung führen. Neuere Forschungen zeigen zudem deutlich, dass bereits die produzierten Säuren einen stark negativen Einfluss auf die Papieralterung haben.

Die Alterung des Isolationspapiers bestimmt als einer der Hauptfaktoren die technische Lebenserwartung des Transformators. Wenn das Papier altert, verändern sich die mechanischen Eigenschaften irreversibel. Das Papier wird spröde und zerfällt bei kleinen Belastungen in kleine Stücke (vergleichbar mit Backpapier nach dem Backen). Die Reduktion der Widerstandskraft hängt mit der «Zerstückelung» der Zelluloseketten zusammen. Neues Papier hat eine Kettenlänge von ca. 1200, dies wird auch als Polymerisierungsgrad bezeichnet (DP = Degree of Polymerisation). Die Zugfestigkeit hängt mit dem DP-Wert zusammen. Typischerweise wird ein DP-Wert von

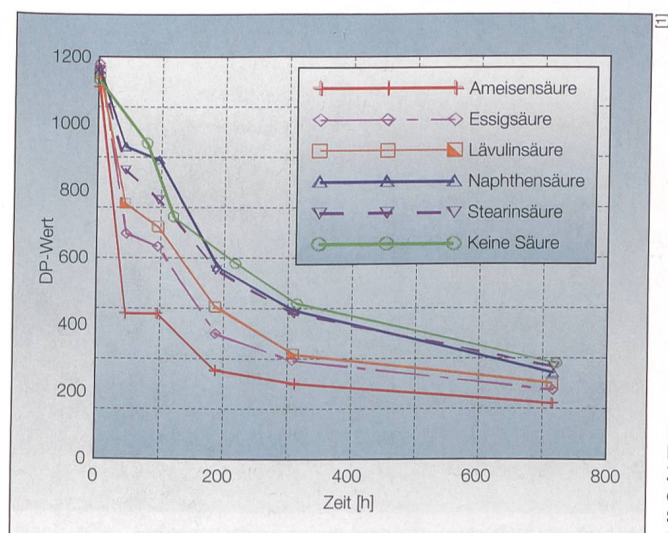


Bild 1 Papieralterung bei 130 °C im Öl bei Zugabe von verschiedenen typischen Säuren (Säurezahl 0,4 mg KOH/g).

ca. 200 als Lebensendkriterium für das Isolierpapier betrachtet. Ein Transformator mit gealtertem Papier havariert nicht zwingend, doch sinken bei sprödem Papier die Sicherheitsmargen entscheidend.

Der Einfluss verschiedener Säuren auf die Papieralterung wurde in einem Versuch gezeigt, bei welchem 5 typische Säuren, die in Transformatoren vorkommen (Konzentration von 0,4 mg KOH/g), dem Transformatorenöl zugegeben wurden [1].

Aus Bild 1 ist ersichtlich, dass hochmolekulare Säuren wie Stearin- oder Naphtensäuren die Alterung des Papiers nur minimal beeinflussen. Die niedermolekularen Säuren wie Essig- oder Ameisensäure beeinflussen die Alterung aber mit abnehmendem Molekulargewicht zunehmend. Der Hauptgrund dafür ist die Wasserlöslichkeit dieser Säuren. Dadurch können sie leichter im Papier angesammelt werden.

Die Resultate dieser Untersuchungen sind für den Transformatorenunterhalt von entscheidender Bedeutung. Die Alterungsbeschleuniger, Wasser und Säuren, tendieren dazu, sich im Isolationspapier anzusammeln [2]. Die Entfernung dieser Substanzen aus dem Papier wird deshalb bei lebensverlängernden Unterhaltsarbeiten angestrebt.

Die Ölalterung und die Papieralterung beeinflussen sich gegenseitig. Die Nebenprodukte der Ölalterung, insbesondere die Säuren, beschleunigen den Alterungsprozess des Isolationspapiers. Furane aus der Papieralterung dagegen werden teilweise im Öl gelöst. Der Nettoeffekt solcher Prozesse ist schwer vorherzusagen, und der volle Umfang der Interaktion ist noch lange nicht komplett erforscht. Es besteht jedoch kein Zweifel daran, dass gut gepflegtes Isolieröl die Lebenserwartung der festen Isolation entscheidend verlängert [3].

Vor-Ort-Entfernung von Säuren und anderen Alterungsprodukten

Die am längsten bekannte Methode zur Entfernung von Säuren ist das Regenerieren (Fullern) des Transformatorenöls im Umlaufverfahren. Durch das mehrmalige Zirkulieren des heissen Öls und die Verwendung von Absorptionsmittel (Fullererde) können Säuren und andere Alterungsprodukte aus dem Öl und aus der Papierisolation ausgewaschen werden. Eine Ölregeneration reduziert auch die Neuproduktion von Säuren, da die Alterung des Öls, je nach angewandter Methode, nahezu gestoppt werden kann.

Zur Regenerierung des Transformatorenöls wird normalerweise Fullererde (auch Bleicherde genannt) verwendet. Das ist eine Magnesium/Aluminium-Silikaterde mit einer sehr grossen Oberfläche (400 m²/g). Es gibt auch Ansätze mit anderen Materialien wie



Bild 2 Konventionelle Ölregenerieranlage.

Siliziumoxid oder Amberlyst. Diese Materialien entfernen jedoch nicht sämtliche Alterungsprodukte gleich effizient wie Fullererde.

Bei der Anwendung der Fullererde unterscheidet man zwischen 2 verschiedenen Applikationsvarianten:

Konventionelle Methode mit einmaligem Gebrauch der Fullererde

Bei dieser Methode wird das in einer konventionellen Ölaufbereitungsanlage

(Bild 2) erwärmte und entgaste Öl durch die Behälter mit Fullererde geleitet. Ist die Fullererde gesättigt, werden die Behälter entleert, die verbrauchte Fullererde wird entsorgt. Die verwendete Menge an Fullererde ist abhängig vom Verschmutzungsgrad des Öls und bewegt sich normalerweise im Rahmen von 5–10% der Ölmenge im Transformator. Der Transformator wird typischerweise während des Prozesses abgeschaltet. Diese Methode eignet sich bei wenig gealterten Ölen, die noch einen relativ niedrigen Säure-



Bild 3 Moderne Ölregenerieranlage mit integrierter Wiederaufbereitung der Fullererde.

regehalt haben (typischerweise $< 0,1$ mg KOH/g) und noch keine starke Verfärbung zeigen. Eine wesentliche Verbesserung der Ölfarbe oder der Grenzflächenspannung ist aufgrund der relativ geringen Menge an verwendeter Fullererde meist nicht erreichbar. Durch die limitierte Ölzirkulation und die meist begrenzte Zeit des Prozesses wird auch das Papier nicht sehr effizient gewaschen. Ein weiterer Nachteil der Methode bildet das Abfallproblem. Die verbrauchte Fullererde muss als ölhaltiger Abfall entsorgt werden. Weiter muss Neuöl nachgefüllt werden, um den Volumenverlust durch die Ölsättigung der Fullererde auszugleichen.

Moderne Methode mit Wiederaufbereitung der Fullererde

Grundsätzlich funktioniert diese Methode nach dem gleichen Prinzip wie die konventionelle Methode. Das Öl wird erwärmt, entgast und über die Kolonnen mit Fullererde geleitet. Der Unterschied ist, dass die gesättigte Fullererde nicht gewechselt, sondern in der Anlage wiederaufbereitet wird. Somit entfällt das aufwendige Wechseln und Entsorgen der Fullererde. Die Erde kann bis zu 500-mal reaktiviert werden, bevor sie nach mehreren Jahren gewechselt werden muss.

Bei der modernen Technik kommen grössere Mengen an aktiver Fullererde zum Einsatz als bei der klassischen Methode (typischerweise 5–10-mal mehr). Um den Transformator optimal zu reinigen, werden pro 1000 kg Öl ca. 500–800 kg aktive Fullererde verwendet. Die gesamte Ölmenge zirkuliert 8–10-mal über die Fullererdekolonnen. Das gereinigte Öl wird via Ausgleichsgefäss wieder dem Transformator zugeführt. Dadurch wird das Papier laufend mit frisch gereinigtem Öl umspült, und die verschiedenen Alterungsprodukte sowie das noch vorhandene alte Öl werden optimal herausgewaschen.

Idealerweise wird der Transformator unter Spannung behandelt. Die starke interne Zirkulation durch Abwärme unterstützt den Reinigungsvorgang zusätzlich. Wurde im Transformator schon Schlamm gebildet, ist es von entscheidender Bedeutung, das Öl im Transformator auf mindestens 60°C zu erwärmen. Nur dann kann sich der Schlamm im Öl lösen und so aus dem Transformator entfernt werden. Es ist auch möglich, die Regenerierung bei ausgeschaltetem Transformator durchzuführen. Um den gleichen Effekt zu erzielen, sind allerdings die Prozesszeiten etwas länger.

Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass kaum Abfälle entstehen. Insgesamt wird also ein bedeutend besseres Endresultat erzielt als bei der klassischen Methode. Nach einer Fullierung mit einer modernen



Bild 4 Ölproben vor, während und nach der Regenerierung mit der modernen Methode (v. r. n. l.).

Regenerieranlage (Bild 3) entspricht die Ölqualität nach der Inhibierung (Alterungsbremse) jener von Neuöl. Die Alterungsstabilität ist sogar besser als bei nicht inhibiertem Neuöl. Langjährige Erfahrungen zeigen, dass das Öl auch 10 Jahre später immer noch hervorragende Eigenschaften besitzt.

Der Wiederaufbereitungsprozess der Fullererde geschieht typischerweise während der Nacht. Die Anlagen sind mit einer SPS-Steuerung ausgerüstet, die sämtliche Prozessparameter überwachen. So kann der Wiederaufbereitungsprozess ohne Bedienungspersonal durchgeführt werden.

Zentral für den Erfolg der modernen Methode sind 2 Punkte, welche in der Vergangenheit in der Schweiz oft nicht korrekt gehandhabt wurden:

■ Es muss genügend Fullererde verwendet werden, um das Öl und das Papier im Transformator effizient zu reinigen. Werden die Alterungsprodukte nicht entfernt, altert das Öl nach der Behandlung mit gleicher Geschwindigkeit weiter.

■ Die Fullererde entzieht dem Öl die polaren Komponenten. Dazu gehören auch die Schwefelverbindungen, die im Öl als natürlicher Inhibitor wirken. Wird nun ein Öl mit Fullererde regeneriert, ohne dass danach der Inhibitor künstlich beigegeben wird, altert das Öl nach der Behandlung schneller als vorher. Es ist deshalb zwingend nötig, das Öl nach der Behandlung zu inhibieren. Inhibierte Öle weisen gegenüber nicht inhibierten eine wesentlich höhere Alterungsbeständigkeit auf. Die überwiegende

Mehrheit der heute weltweit verwendeten Isolieröle ist inhibiert.

Moderne Regeneriermethode versus Ölwechsel

Beim Ölwechsel kann das alte Öl nie ganz entfernt werden. Bedeutende Mengen des alten Öls bleiben in der Isolation und am Boden des Kessels liegen. Es vermischt sich mit dem Neuöl und verunreinigt dies mit den verschiedenen Alterungsprodukten. Zudem lösen sich auch Teile der Alterungsprodukte aus dem Papier im neuen Öl. Dies alles führt dazu, dass das neue Öl bereits nach kurzer Zeit den gleichen Alterungszustand erreicht wie das davor gewechselte. Vergleichbar ist dies mit einem Ölwechsel beim Auto: Bei jedem Ölwechsel wird auch der Ölfilter gewechselt, da sonst das neue Öl sofort wieder verschmutzt wird. Bei einem Transformator bildet der Aktivteil mit seiner Papierisolation diesen Filter. Dieser ist aber nicht einfach wechselbar.

Aus diesem Grund wird ein Prozess, der mit einem Umlaufverfahren arbeitet, immer die besseren Langzeitergebnisse erzielen als ein einmaliger Ölwechsel. Ein Ölwechsel bedingt zudem einen längeren Betriebsunterbruch und einen erheblichen Einsatz an Personal und Material. Bei einer modernen Regenerierung wird dies auf ein Minimum reduziert. Der Transformator muss für ca. 1 h ausgeschaltet werden, und der ganze Prozess wird von einem Operateur überwacht. Dies führt dazu, dass eine Regeneration des Öls nicht nur die besseren

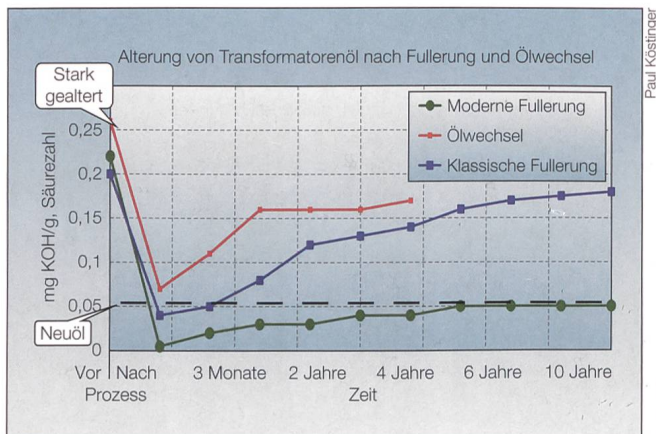


Bild 5 Langzeitvergleich der verschiedenen Methoden.

Resultate verspricht, sondern oft auch kostengünstiger ist als ein Ölwechsel. Des Weiteren ist ein Regenerierprozess ein echtes Recycling, da das Isolieröl nicht entsorgt, sondern nochmals für mehrere Jahrzehnte gebraucht werden kann.

Langzeitstabilität

Die Langzeitstabilität einer Ölregeneration ist unter anderem abhängig von der Prozesszeit, der verwendeten Menge Fullererde und dem Verschmutzungsgrad des

Transformators. Durch die automatische Wiederaufbereitung verwendet man grosse Fullererdemengen und erzielt dadurch eine hervorragende Langzeitstabilität des Öls. In Skandinavien und Deutschland wurden in den letzten 10 Jahren mehr als 1000 Transformatoren aufbereitet, welche anschliessend mittels Ölanalysen weiter beobachtet wurden. Die Resultate zeigen eindrücklich den durchschlagenden Erfolg der Methode. Auch nach mehr als 10 Jahren zeigen die behandelten Transformatorenöle nur einen

minimalen Anstieg des Säuregehalts. Wie Bild 5 zeigt, erreichen die Säurezahl und die Grenzflächenspannung bereits nach wenigen Jahren ähnlich schlechte Werte wie vor der Behandlung, wenn nur ein Ölwechsel vorgenommen wird oder zu kleine Mengen Fullererde verwendet werden.

Die moderne Technik kann auch stark gealterte Öle wieder regenerieren. Ein optimaler Zeitpunkt für die Behandlung eines Transformators ist in der Mitte seiner geplanten Betriebsdauer. Dadurch wird verhindert, dass grosse Mengen von Säuren produziert werden, die sich im Papier ablagern und die Papieralterung beschleunigen. Das Öl muss unter normalen Umständen nur einmal regeneriert werden. Rechtzeitiges Handeln erhöht also die Lebenserwartung der Papierisolation wesentlich.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden die letzten IEC-Grenzwerte für Säurezahl und Grenzflächenspannung reduziert. In Skandinavien geht man allerdings noch weiter. Dort gelten in den nationalen Normen Grenzwerte von 0,1 mg KOH/g für die Säurezahl (anstelle von 0,2 mg KOH/g wie in der internationalen IEC-Norm).

Referenzen

- [1] L.E. Lundgaard, W. Hansen, S. Ingebrigtsen, D. Linhjell, M. Dahlund: Aging of Kraft paper by acid catalyzed hydrolysis, ICDL, Coimbra, 2005.
- [2] S. Ingebrigtsen, M. Dahlund, W. Hansen, D. Linhjell, L.E. Lundgaard: Solubility of carboxylic acids in Paper (Kraft)-Oil Systems, CEIDP, Boulder, Colorado, 2004.
- [3] P. Koestinger, T. Bruaroy: Drying of power transformers in the field, applying the LFH-Technology in combination with oil reclamation, Cigre Meeting Paris 2006.

Angaben zum Autor

Dipl. El.-Ing HTL Paul Köstinger ist Inhaber der Firma Retranol GmbH. Er arbeitete viele Jahre bei der ABB wie auch bei der Micafil und beschäftigte sich in der Zeit intensiv mit der Ölbehandlung sowie der Trocknung von Leistungstransformatoren. Retranol GmbH, 8810 Horgen, paul.koestinger@retranol.ch

Résumé

Régénération de l'huile isolante vieillie par la terre à foulon

Rétablissement des propriétés diélectriques de l'huile de transformateur. L'huile isolante des transformateurs de puissance vieillit sous l'effet de la chaleur, de l'oxygène et du cuivre. Cela dégage des produits de vieillissement comme des alcools, des acides et enfin de la boue. Ces produits ont une influence négative sur l'isolement en papier du transformateur et, partant, sur sa longévité. Une vidange ne supprime qu'une partie limitée de ces accélérateurs de vieillissement qui s'accumulent en grande partie dans le papier. En revanche, une circulation de terre à foulon lave tout l'isolant et supprime une grande partie des résidus de vieillissement. Cela donne un résultat à long terme bien meilleur qu'une vidange conventionnelle des transformateurs.

Serie K²

leicht
isolierend
rosten nie

OMEGA

Kabelkanäle
aus GfK*

50
Jahre
GfK

ebo

Ebo Systems

Telefon: 044 787 87 87
www.ebo-systems.com

Serie BK

Serie UL

Handläufe

*Glasfaserverstärkter Kunststoff ist säure- und laugenbeständig, lebensmittelunbedenklich, isolierend, schwerbrennbar, halogenfrei.