

Reduzierung der Alterungsbeschleuniger in flüssigkeitsgefüllten Leistungstransformatoren ohne Veränderung des Gashaushalts

**Dr. Olaf Schmidt, Karberg & Hennemann - Wolfgang Sorgatz ENERGY
Support**

Transformatoren sind ein wichtiger Bestandteil im Energieversorgungsnetz. Ein zuverlässiger Transformatorbetrieb und die Optimierung der Wartung und Instandhaltung stehen daher im Mittelpunkt eines jeden Betreibers. Insbesondere, weil ein Großteil der zurzeit betriebenen Transformatoren über 35 Jahre alt ist - viele sind sogar über 50 Jahre alt. Ältere Transformatoren benötigen besondere Pflegemaßnahmen. Verstärkt sind daher Lösungen gesucht, die die Lebensdauer von Transformatoren verlängern, die Betriebssicherheit verbessern und Wartungszeiten sowie Ausfälle reduzieren.

Der Zustand des Öl-Zellulose-Isoliersystems ist einer der Schlüsselparameter jedes Transformators, denn er beeinflusst die Lebenserwartung und die Verfügbarkeit. Die Alterungsrate des Öls hängt im Wesentlichen von der Isolierölqualität ab. Diese wird beeinflusst durch Faktoren wie z.B.: Säuregehalt, Öltemperatur und Wassergehalt.

Wussten Sie, dass in der Zellulose-Isolierung 100-mal mehr Wasser gebunden sein kann als in dem Isolieröl gemessen wird? Das Ziel einer nachhaltigen Transformatorenpflege zur Sicherung der Betriebssicherheit muss daher die dauerhafte Trocknung der Zellulose-Isolierung sein. Ölwechsel und temporäre Öltrocknung senken nur kurzfristig den Wassergehalt.

Und wussten Sie, dass Wasser einer der Hauptursachen für die Bildung von Säuren durch Ölalterungsprozesse ist (z. B. Carbon- und Schwefelsäuren)?

Ein Material, das seit Jahren für Großtransformatoren verwendet wird, wird nun auch immer interessanter für die Pflege von kleineren Transformatoren: Bleicherde. Bleicherde verbessert die Grenzflächenspannung, senkt den dielektrischen Verlustfaktor und reduziert den Säuregehalt im Öl.

Aber von vorn: Die Herausforderungen bei älter werdenden Transformatoren

Sowohl das Isolieröl als auch die Zellulose-Isolierung im Transformator altern. Die chemische Alterung der Isolierstoffe ist die Hauptursache für lokale Kurzschlüsse. Sie sorgt mit zunehmendem Alter des Transformators für eine steigende Anzahl der Teilentladungen. Neben Wasser sind vor allem Sauerstoff und Säuren in den Isolierstoffen (Öl und Zellulose) die primären Beschleuniger für Alterungsprozesse und somit für Kurzschlüsse.

Wasser entsteht in jedem Transformator im Zuge der Alterung der Zellulose-Isolierung. Bei dem Zerfall der Zellulose-Moleküle (Depolymerisation) werden Wasser-Moleküle freigesetzt. Das Wasser sammelt sich in den Wicklungen der Transformatorenkerne an. Von dort diffundieren die Wasser-Moleküle in das Isolieröl und binden sich an Schwebstoffe (z. B. Fasern).

Je mehr Wasser sich in der Zellulose-Isolierung ansammelt, desto schneller erfolgt der weitere Zerfall der Zellulose-Moleküle und die Anreicherung von Wasser in den Isolierstoffen – ein gefährlicher Teufelskreislauf. Denn die Wassermoleküle wirken im Isoliersystem aus Zellulose und Öl als Leitfähigkeitsbrücken, durch die die Durchschlagsfestigkeit des Transformators sinkt. Der Öltyp spielt dabei keine Rolle.



Säuren im Isolieröl entstehen, sobald das Öl im Einsatz ist. Ursache hierfür ist vor allem die stetige Ölalterung. Denn je länger das Öl im Einsatz ist, je höher die Öltemperatur/Betriebstemperatur ist und je stärker das Öl verunreinigt ist (Wasser, Partikel), desto schneller findet eine Versäuerung durch Öloxidationsprozesse statt.

Ein hoher Feuchtigkeits- und Partikelgehalt im Transformator birgt also in dreierlei Hinsicht ein Risiko für die Betriebssicherheit:

1. Zerfall der Zellulose-Isolierung: immer schneller beschleunigende und frühzeitige Alterung
2. Anstieg der Leitfähigkeitsbrücken durch polare Anziehung zwischen Wasser und Schwebstoffen im Isolieröl
3. Zerfall des Isolieröls: immer schneller beschleunigende und frühzeitige Ölalterung und damit die Entstehung von weichen Verunreinigungen/Ablagerungen und Säuren

Die Herausforderung für eine nachhaltige Transformatorpflege und hohe Betriebssicherheit: kontinuierliche Trocknung der Zellulose-Isolierung (Wicklungen) und das Entfernen von Wasser, Schwebstoffen, Alterungsprodukten und Säuren aus dem Isolieröl.

Warum ein Ölwechsel nicht nachhaltig ist

Ein Ölwechsel beseitigt nur einen Bruchteil des Wassers, denn der Großteil des Wassers innerhalb eines Transformators steckt in der Zellulose-Isolierung (Wicklungen). Bsp. Transformator mit 20.000 Liter Ölvolumen und 40 ppm Ölfeuchte (0,004 %):

- nur 0,8 Liter Wasser im Isolieröl
- rund 100 Liter in der Zellulose-Isolierung

Deshalb ist es entscheidend, die Zellulose-Isolierung zu trocknen und nicht nur das Öl. Auch ein Ölwechsel aufgrund eines hohen Verschmutzungsgrad und/oder Säuregehalts ist meist vermeidbar, da mit einer adäquaten Feinfiltration das Öl aufbereitet werden kann und so für viele Monate und sogar Jahre weiterhin einsetzbar ist.

Warum es einer kontinuierlichen Öltrocknung bedarf

Die Trocknung der Zellulose-Isolierung dauert sehr lange. Denn die Diffusion der Wassermoleküle aus der Zellulose-Isolierung an das umgebende Öl ist sehr langsam und abhängig davon, wo das Wasser in der Zellulose entstanden ist und sich angesammelt hat. Beim Diffundieren der Wassermoleküle aus dem Inneren der Zellulose-Isolierung bis zum Öl muss das Wasser in zahlreiche Zellulosefasern hinein und wieder hinaus diffundieren und dieser Vorgang braucht Zeit. Die Diffusionsgeschwindigkeit bzw. das nur schleppend aus der Isolierung kommende Wasser lässt sich aus dem Bild 1 gut ablesen. Hier wird ein Transformator mit 20 Tonnen Ölgewicht mit einer kontinuierlichen Trocknungsanlage (Durchfluss: 270 Liter/Stunde) gepflegt.

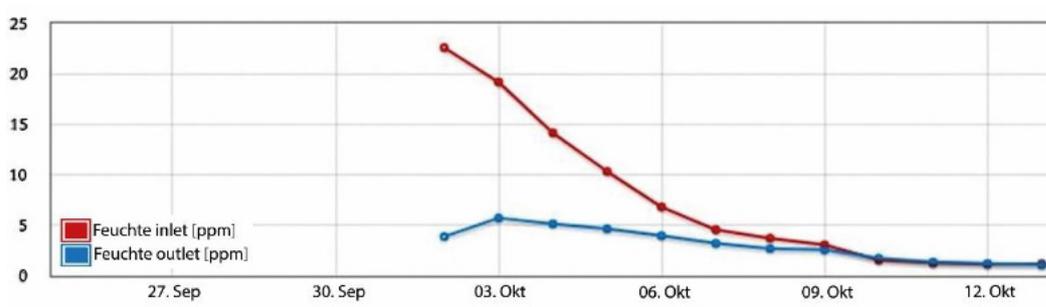


Bild 1: Feuchtigkeitsverlauf während der Transformatorentrocknung mit dem kontinuierlichen Filtersystem ES 2000. Filtereintritt: rote Kurve, Filteraustritt: blaue Kurve

Die Effizienz der Trocknung hängt daher von der Zeitdauer der Trocknung ab. Die heutigen temporären Öltrocknungsprozesse konzentrieren sich auf die kurzfristige Optimierung und vernachlässigen die Vorteile der kontinuierlichen Trocknung (siehe Bild 2) und Pflege:

- dauerhaft hohe Durchschlagfestigkeit und damit Betriebssicherheit
- längere Lebensdauer von Isolieröl und Zellulose-Isolierung

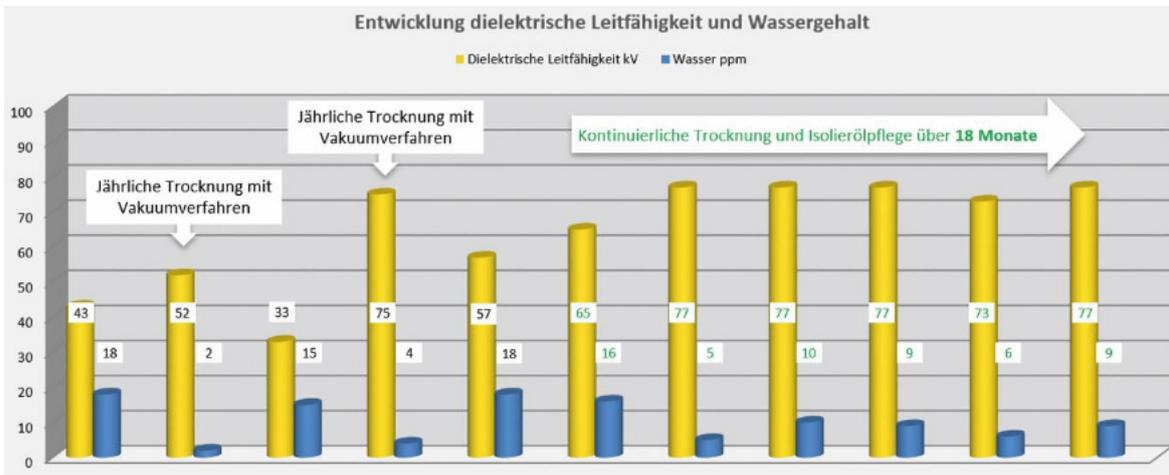


Bild 2: Entwicklung der dielektrischen Leitfähigkeit und des Wassergehalts mit der temporären Vakuumtrocknung und im Anschluss mit dem kontinuierlichen Filtersystem ES 2000.

Nachteile temporärer Vakuumtrocknung

Zeit und Kosten stellen bei den Vakuumverfahren die kritischen Eckpunkte dar. Häufig findet die Trocknung nicht vor Ort statt, so dass hohe Transportkosten anfallen. Je länger der Transformator unter Vakuum getrocknet wird, desto teurer wird der Prozess durch den entstehenden Nutzungsausfall.

Wird die Zeitdauer der Trocknung allerdings verkürzt, sinkt die Effizienz der Trocknung. Die Zellulosefasern, in denen sich das Wasser angesammelt hat, sind mit dem Ölfilm benetzt und geben deshalb die Wassermoleküle nur langsam an das umgebende Vakuum ab. Nach einer temporären Trocknung mit einem Vakuumverfahren befinden sich daher immer noch Wasseranteile in der Zellulose-Isolierung.

Darüber hinaus belastet das Vakuumverfahren die ohnehin durch Alterungsprozesse angegriffene Zellulose-Isolierung noch zusätzlich. Denn durch die Vakuumtrocknung wird die Kompression der Zellulose-Isolierung reduziert, so dass die Wicklung bei weiterem Betrieb Schaden nehmen kann.

Die Gas-in-Öl-Analyse ist für die Beurteilung der Funktionstüchtigkeit und Sicherheit eines laufenden Transformators entscheidend. Dazu wird die genaue Zusammensetzung vorhandener Gase im Transformator analysiert. Vakuumverfahren entfernen Gase, so dass eine weitere Einschätzung des Sicherheitszustands des Transformators problematisch wird.

Die Lösung: ES 2000 Filtersystem

Das Filtersystem ES 2000 (Bild 3) ist ein stationäres Trocknungssystem, das schnell und einfach an jedem Transformator installiert und modular modifiziert werden kann.

Die Anforderungen an das Filtersystem ergeben sich aus den oben genannten Nachteilen der bisherigen Verfahren:



Bild 3: ES 2000 Filteranlage

1. Ein System, dass den Nutzungsausfall minimiert:
Das Filtersystem ES 2000 arbeitet online am laufenden Transformator in einem unabhängigen Kreislauf, so dass kein Nutzungsausfall entsteht wie z. B. bei Vakuumverfahren. Es ist für den Dauerbetrieb ausgelegt (24/7/365). Der Energiebedarf ist dabei mit ca. 0,18 kW gering.

2. Ein System, dass die Zellulose-Isolierung gründlich und schonend trocknet:
Die Entwässerung erfolgt indirekt und kontinuierlich über das Öl. Denn der Zellulose-Isolierung wird durch den Dauerbetrieb (24/7/365) die notwendige Zeit gegeben die Wassermoleküle an das Öl abzugeben. So wird sowohl das Wasser aus dem Öl als auch aus der Zellulose Isolierung entfernt. Weder Vakuum noch hohe Temperaturen strapazieren die Zellulose-Isolierung.

3. Ein System, dass alle Verunreinigungen aus dem Isolieröl entfernt und für eine schonende Regeneration sorgt:

Gleichzeitig minimiert die in der ES 2000 Filteranlage integrierte Fein- und Tiefenfiltertechnologie mittels Absorption und Adsorption den Anteil an Schwebstoffen (Partikel, Fasern) und Oxidationsrückständen im Öl.

Durch den zusätzlichen Einsatz von Bleicherde kann zudem die Grenzflächenspannung erhöht werden, der dielektrische Verlustfaktor gesenkt und der Säuregehalt im Öl reduziert werden.

4. Ein System, dass die Gas-in-Öl-Analyse nicht beeinflusst:

Die Zusammensetzung des Gasmischs im Transformator und die Gas-in-Öl-Analyse werden durch das Filtersystem ES 2000 nicht beeinflusst. Es ermöglicht eine durchgängige Vergleichbarkeit der Werte zur Beurteilung der Betriebssicherheit des Transformators.

Die daraus resultierenden Vorteile:

- längere Lebensdauer für Zellulose-Isolierung und Transformator
- höherer Wirkungsgrad, weniger unerwartete Störungen im Energienetz
- höhere Durchschlagfestigkeit und Betriebssicherheit
- verbesserte Grenzflächenspannung, ein geringerer dielektrischer Verlustfaktor
- weniger Ölaustausch und Nutzungsausfall
- weniger und kürzere Reinigungsarbeiten

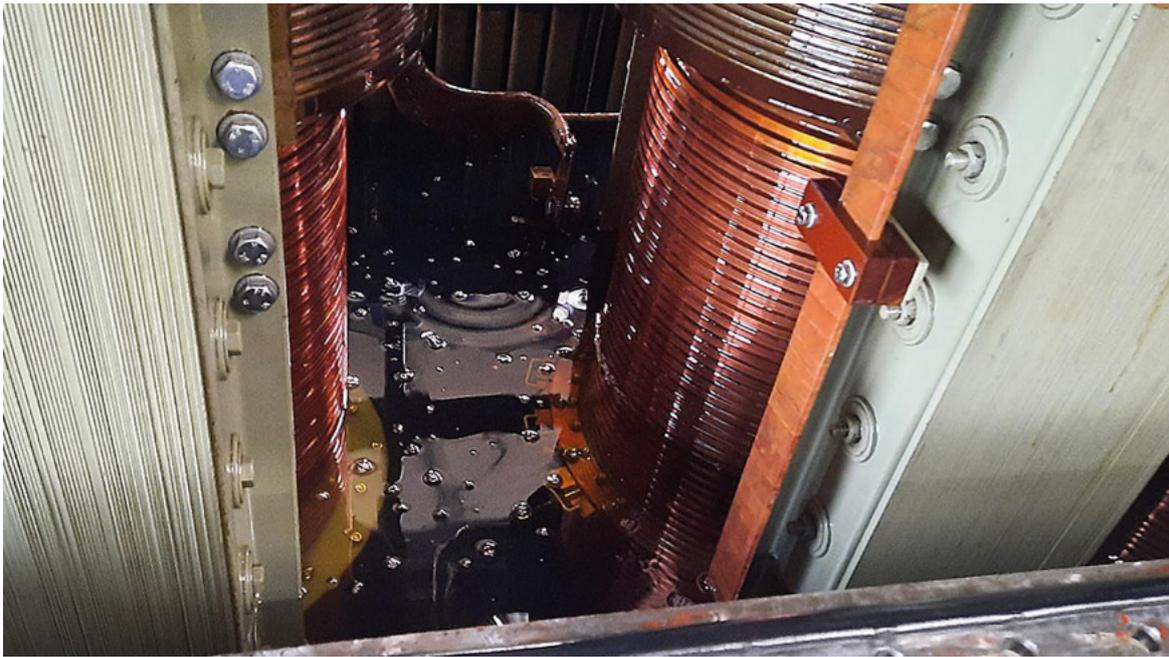


Bild 4: Blick in das Innere nach Inbetriebnahme des Filtersystems ES 2000. Die Vorzüge bei der Inspektion des Systems sind klar ersichtlich. Die Schleifringe des Schalters sind, auch im Öl eingetaucht, sehr gut sichtbar. Aufwändiges Spülen und mechanisches Reinigen entfällt.



Bild 5: Ölproben vor (links) und nach (rechts) Inbetriebnahme des Filtersystems ES 2000. Das dunkle, schmutzige Öl wies einen hohen Gehalt an Schmutzpartikeln auf (Abrieb von Schleifringen) und führte zu schlammartigen, klebrigen Ablagerungen im Isoliersystem (Kerne etc.).

Die Fein- und Tiefenfiltertechnologie für höchste Ölreinheit

Die hohe Effizienz der Trocknung mit dem Filtersystem ES 2000 beruht auf einigen wesentlichen Merkmalen.



Bild 6: Fein- und Tiefentechnologie des Filtersystem ES 2000.



Bild 7: Querschnitt durch die Fein- und Tiefentechnologie.



Bild 8: Optional mit Bleicherde Filterelement oder als Kombipatrone

1. Zellulose als Filtermaterial

Das Filtermaterial entfernt – genauso wie ein Vakuumsystem – freies, emulgiertes und gelöstes Wasser aus dem Öl, nur schonender via Absorption und Kapillarwirkung der Zellulosefasern. Darüber hinaus werden aber auch Schwebstoffe und Feststoffpartikel sowie Rückstände aus Oxidations- und Alterungsprozessen mit einer Kombination aus mechanischer Filtration und Ab- und Adsorption dauerhaft aus dem Öl entfernt. Dadurch wird grundsätzlich der Bildung von Säuren vorgebeugt und die Säurezahl (Total Acid Number (TAN)) stabilisiert und sogar leicht verbessert. Nur durch das Entfernen aller Verunreinigungen aus dem Öl werden die Isolierstoffe des Transformators (Öl und Zellulose-Isolierung) vollständig gereinigt und getrocknet.

2. Fein- und Tiefenfiltration

Die Filterfeinheit von 3 µm absolut und das extrem hohe Schmutz- und Wasseraufnahmevermögen ergeben sich aus dem besonderen Design der Filterelemente. Die innere Struktur des Volumenkörper ist ein Labyrinth aus feinsten zahllos verästelten Fasern, das auch die ultrafeinsten Verschmutzungen bis in den Größenbereich von 1 µm zurückhält – und die in großen Mengen. Denn Schmutz und Wasser werden nicht nur von der äußeren Oberfläche des Filterelements aufgenommen, sondern wandern in die Tiefe des Filtermaterials. Da jedes Gramm Filtermaterial eine aktive Filteroberfläche von 120 bis 150 m² bietet, hat ein Filterelement - mit einer Höhe und einem Durchmesser von 27 cm (Bild 6) - eine zusätzliche innere Oberfläche, die ca. 70 Fußball-Feldern entspricht. Das bedeutet enorm viel Platz für Schmutz und stellt eine kosteneffiziente Filtrationslösung dar.

3. Eine Mischung aus Bleicherde und Feinstfiltration

Bei diesem zweistufigen Verfahren wird ein Bleicherde-Filter vorgeschaltet, der die im Isolieröl gelösten oder freischwebenden Alterungsprodukte der Zellulose-Isolierung und des Isolieröls adsorbiert bzw. chemisch bindet sowie bereits entstandene Säuren neutralisiert. Erst in dem nachgelagerten Schritt entfernt der Zellulose-Filter die restlichen Schwebstoffe und insbesondere die Wasseranteile. Durch vielfache Wiederholung des Prozesses gewinnt das gesamte Öl seine anfängliche Qualität nahezu zurück. Dabei werden außerdem bereits abgelagerte Alterungsprodukte gelöst und im Prozess entfernt und somit der gesamte ~~Aktivteil~~ Transformator von Ablagerungen befreit.

16. Transformer-Life-Management Konferenz

18.-19.September 2023, Schweinfurt



Zusammenfassung:

Das Geheimnis effizienter Transformatorentrocknung, nachhaltiger Transformatorenpflege sowie hoher Betriebssicherheit liegt also in der Trocknung der Zellulose-Isolierung. Ölwechsel und temporäre Öltrocknungsverfahren sorgen nicht für die vollständige Trocknung der Zellulose-Isolierung, wodurch sich die Isolierwirkung schnell wieder verschlechtert. Außerdem sind diese herkömmlichen Methoden zeit- und kostenintensiv, da sie zum Ausfall des Transformators führen. Warum nicht umgehend eine installiert ist und so viele Vorteile bietet, dass sie sich innerhalb des ersten Betriebsjahres amortisiert. Sprechen Sie uns an.

Autorenanschrift

Karberg & Hennemann GmbH & Co. KG
Dr. Olaf Schmidt
Technical Application Manager
Marlowring 5
22525 Hamburg

Tel.: +49 40 855 04 79-26
Fax: +49 40 855 04 79-20