

# Verbesserte Umweltbilanz mit trockener Kondensator-Technologie

Autor(en): **Carlen, Martin W. / Ohler, Christian**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **91 (2000)**

Heft 20

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-855610>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Verbesserte Umweltbilanz mit trockener Kondensator-Technologie

Neben der traditionellen ölprägnierten Kunststofffolien-Kondensator-Technologie gewinnen selbstheilende Trockenkondensatoren in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Ihre hervorragende technische Performance sowie ihre erhöhte Umweltverträglichkeit lassen sie als bevorzugte Wahl für Blindleistungskompensation und andere Anwendungen hervortreten.

■ Martin W. Carlen und Christian Ohler

## Einleitung

Mit der Erfindung der Leydenerflasche im Jahre 1746 hat die Entwicklung des Kondensators begonnen. Nachdem im 18. und 19. Jahrhundert Kondensatoren vor allem als Energiespeicher benutzt und stark durch Batterien konkurrenziert wurden, entstand mit dem Aufkommen von Wechselstromanlagen gegen Ende des 19. Jahrhunderts Bedarf nach einer kapazitiven Einrichtung. Die ersten kommerziellen Kondensatoren kamen um 1880 auf den Markt.

Während die Energiedichte der Leydenerflasche unterhalb 1 mJ/l lag, ist man bei den heutigen DC-Kondensatoren bei

200–300 J/l für Kondensatoren mit metallisierter Kunststofffolie und bei 400 bis 500 J/l für Al-Elektrolytkondensatoren angelangt, das heisst die Kondensatoren konnten in den letzten 250 Jahren um einen Faktor von etwa einer Million verkleinert werden. Im Verlaufe der Jahre haben sich verschiedene Kondensator-technologien entwickelt, die immer wieder durch verbesserte Technologien abgelöst wurden. So ist beispielsweise Papier als Dielektrikum oder Träger der Elektrodenmetallisierung, das Mitte des 20. Jahrhunderts sehr verbreitet war, in den letzten Jahren fast vollständig aus den Kondensatoren verschwunden und wurde durch Polymerfolien ersetzt. Heute existiert ein klarer Trend von imprägnierten oder mit Elektrolyt gefüllten Systemen zu trockenen Kondensatoren. Auf die Gründe sowie die Vor- und Nachteile soll im Folgenden eingegangen werden. Im Gegensatz zu Elektrolytkondensatoren, die in Gleichstromanwendungen verwendet werden, können metallisierte Kunststofffolien-Kondensatoren sowohl bei Gleichstrom- als auch bei Wechselstromanwendungen eingesetzt werden.

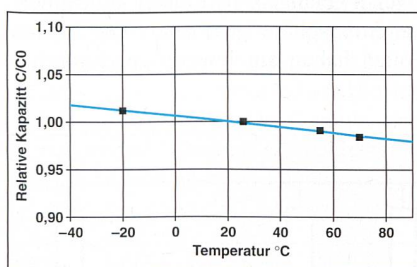


Bild 1 Temperaturabhängigkeit der Kapazität eines PP-Kondensators mit metallisierter Elektrode.

## Aufbau und Herstellung eines trockenen Kunststoffkondensators

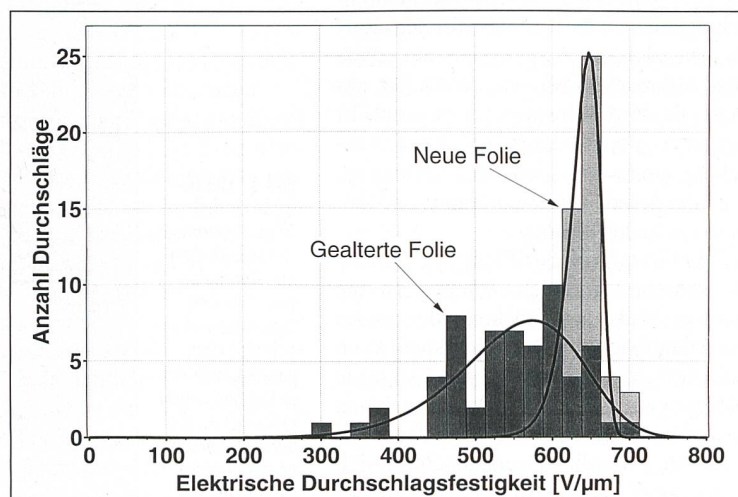
Als Dielektrikum für Kondensatoren zur Blindstromkompensation sind Folien aus Polypropylen (PP) besonders geeignet. PP zeichnet sich durch einen sehr niedrigen Verlustfaktor  $\text{tg}\delta < 2 \cdot 10^{-4}$  aus. Sowohl Dielektrizitätskonstante ( $\epsilon = 2,2$ ) als auch Verlustfaktor von PP sind kaum temperatur- oder frequenzabhängig und garantieren daher nahezu konstante Kapazität und Verluste über einen weiten Einsatzbereich (Bild 1).

Bei PP-Folien für Kondensatoranwendungen handelt es sich um biaxial gezogene Folien. Nach der Extrusion wird die Polymerfolie sowohl in Maschinenrichtung als auch quer dazu um einen Faktor 5 bis 10 gestreckt und erhält dadurch eine besonders hohe elektrische Durchschlagsfestigkeit. Messungen der elektrischen Durchschlagsfestigkeit von PP zeigen, dass diese im Bereich  $E_D = 600$  bis  $700 \text{ V}_{\text{DC}}/\mu\text{m}$  liegt (Bild 2).

Dabei wird das elektrische Feld  $E$  mit einer konstanten Rate hochgefahren, bis es zum Durchschlag kommt. Entsprechende Messungen an gealterten PP-Folien erlauben Rückschlüsse auf den Alterungsmechanismus im Polymer zu ziehen. Auf Grund der Messresultate dürfen für die nächsten Jahre weitere Verbesserungen erwartet werden. Die Folien selbst sind  $4 \mu\text{m}$  bis  $17 \mu\text{m}$  dick.

Im Vergleich zu anderen Polymerfolien hat PP einen relativ niedrigen Schmelzpunkt,  $T_m = 170 \text{ °C}$ . PP ist daher nicht geeignet für Anwendungen bei be-

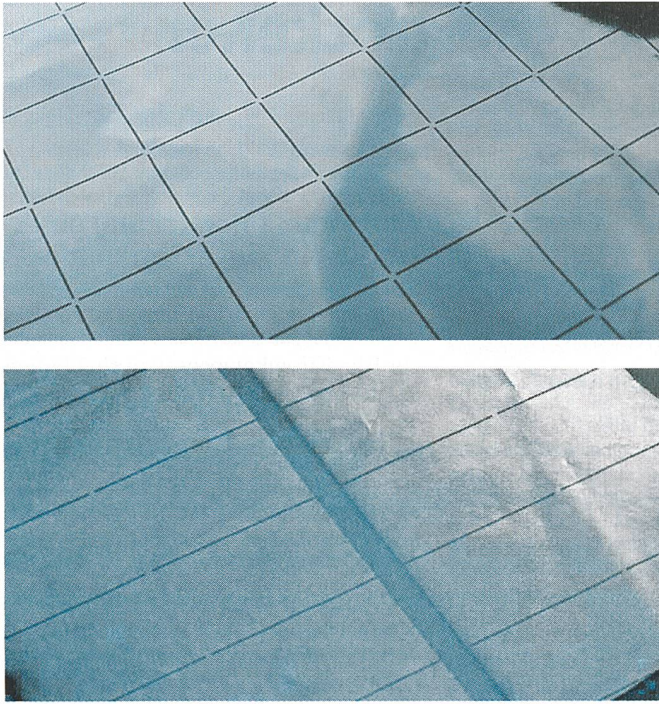
Bild 2 Verteilung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit, gemessen an neuen und gealterten PP-Folien.



### Adresse der Autoren

Dr. Martin W. Carlen, Christian Ohler  
Abteilung Elektrotechnologien  
ABB Corporate Research Ltd.  
5405 Baden-Dättwil





**Bild 3** Beispiele für Elektrodensegmentierungen: Bei der oberen Abbildung handelt es sich um quadratische, etwa 1 cm<sup>2</sup> grosse Segmente, die jeweils in den Ecken elektrisch miteinander verbunden sind. Im Falle eines elektrischen Durchschlages in einem der Segmente wirkt die Verbindung als Sicherung, die verdampft, und so den Durchschlag unterbricht. Die untere Abbildung zeigt eine streifenförmige Segmentstruktur mit Verbindungen in der Mitte der Längsseite der Segmente.

sonders hohen Umgebungstemperaturen. Sein Einsatz beschränkt sich auf Temperaturbelastungen bis etwa 100 °C.

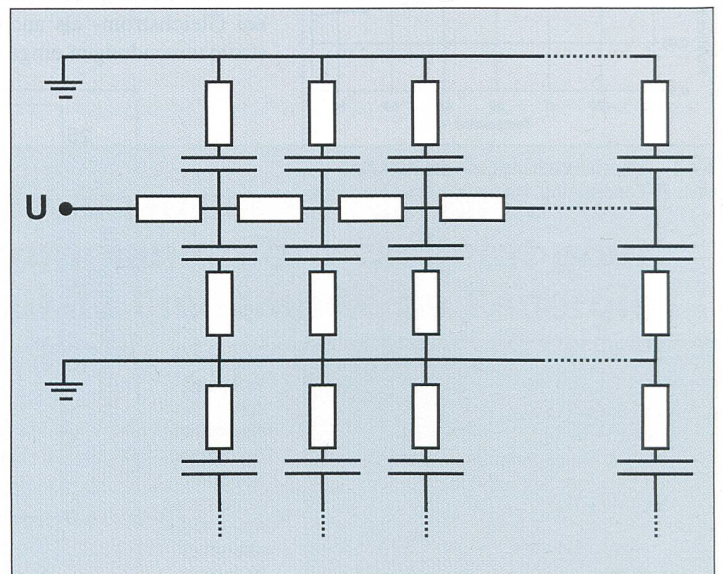
Die Elektroden werden als dünne Metallschicht mit einem Vakuumdepositionsverfahren direkt auf die Kunststoffolie aufgebracht. Die Metallschicht besteht meist aus Aluminium oder Zink oder aus Legierungen davon. Die Dicke der Metallisierung beträgt nur etwa 0,01 bis 0,02 µm. Die Elektrode ist damit mehr als 100 mal dünner als die Kunststoffolie. Falls infolge eines elektrischen Durchschlages im Dielektrikum ein sehr hoher Strom fließt, führt dies lokal zu einer raschen und starken Erwärmung der Elektrodenschicht, und die Metallisierung in der Umgebung des Durchschlagkanals schmilzt und verdampft und trennt so den kritischen Bereich des Durchschlagkanals vom Rest des Kondensators ab. Dies ist ein Vorgang, der innerhalb von Mikrosekunden oder schneller abläuft. Er wird Selbstheilung genannt. Er begrenzt die Leistung, die im Durchschlag umgesetzt wird, und verhindert, dass der Kondensator explodiert oder anderen Schaden nimmt.

Die Gestaltung der Elektrode ist eine Wissenschaft für sich. Wichtig ist die richtige Wahl des Flächenwiderstandes der Metallisierung. Der Widerstand kann reduziert werden, indem die Elektrode dicker gemacht wird. Damit nehmen auch die resistiven Verluste in der Elektrode ab. Allerdings verschlechtert sich dabei deren Fähigkeit zur Selbstheilung.

Um den gegensätzlichen Ansprüchen zu genügen, wird die Elektrode oft so gewählt, dass deren Widerstand lokal variiert. Dies kann durch Aufbringen einer Segmentierung beziehungsweise Unterteilung der Elektrode in kleinere Bereiche, durch lokale Dickenänderungen oder Änderungen in der Materialzusammensetzung der Elektrode geschehen (Bild 3).

Um zuverlässige Selbstheilung zu erhalten, ist ein korrektes Design sehr wichtig. Segmentierte Elektroden lassen sich durch elektrische Netzwerke modellieren, wie in Bild 4 dargestellt.

**Bild 4** Elektrisches Modell eines segmentierten selbstheilenden Kondensators. Einzelne Segmente lassen sich als kleine, parallelgeschaltete Kondensatoren modellieren, die durch Widerstände miteinander verbunden sind.



Ist die Elektrode nicht auf das jeweilige Spannungsniveau und die Betriebsbedingungen ausgelegt, so kann es durchaus zu einem nicht selbstheilenden Durchschlag kommen, wobei die im Kondensator gespeicherte elektrische Energie meist genügt, um diesen zu zerstören.

Die Kombination von selbstheilender Elektrode mit der hohen elektrischen Durchschlagsfestigkeit von PP erlaubt es, in Kondensatoren Feldstärken zu benutzen, die 10- bis 20-mal höher sind als bei konventionellen Isolationsmaterialien, wie sie beispielsweise für Kabel verwendet werden. Da Energiedichte beim DC-Kondensator  $E_D = 0,5 \epsilon_r \epsilon_0 E_{DC}^2$  und Scheinleistungsdichte beim AC-Kondensator  $Q_D = \omega \epsilon_r \epsilon_0 E_{AC}^2$  jeweils quadratisch vom elektrischen Feld  $E$  abhängen, trägt eine Erhöhung der Feldbelastung besonders stark zur Verkleinerung eines Kondensators bei.  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  As/Vm ( $E$  ist die elektrische Feldkonstante,  $\epsilon_r$  die Dielektrizitätszahl,  $\epsilon_0 = 8,85$ ,  $\omega$  die Kreisfrequenz).

Bei selbstheilenden Kondensatoren werden Durchschläge im Dielektrikum bewusst zugelassen. Die einzige Auswirkung dabei ist, dass ein kleiner Teil aktiver Elektrodenfläche verloren geht, und die Kapazität um einen winzigen Bruchteil abnimmt. Bei einem Kondensatorwickel braucht es Tausende von Durchschlägen, bis es zu einer messbaren Abnahme der Kapazität kommt.

Ein Kondensatorwickel wird durch gleichzeitiges Wickeln von zwei metallisierten Folien hergestellt (Bild 5).

Damit keine Verunreinigungen in den Wickel gelangen, wird unter kontrollierter Atmosphäre gearbeitet. Die beiden Folien haben am jeweils gegenüberlie-



genden Rand einen durchgehenden Randstreifen, der nicht metallisiert ist. Um Flachwickel herzustellen, wird der Wickelkern entfernt und die Wickel werden flach gedrückt. An der metallisierten Seite wird die jeweilige Elektrode durch Flammensprühen einer Metallschicht kontaktiert. Auf die Kontaktschicht können Anschlusskabel angelötet werden. Es folgt eine Temperaturbehandlung, die meist zum gut gehüteten Know-how des jeweiligen Herstellers gehört. Ein oder mehrere Wickel werden anschliessend mit einem Harz vergossen. Die einzelnen Wickel werden elektrisch getestet und mit weiteren Wickeln in einem Gehäuse zu einem grösseren Kondensator verschaltet.

ABB hat eine lange Tradition im Bereich Trockenkondensatoren. Vor 20 Jahren wurde mit der Herstellung von Trockenkondensatoren für Blindleistungskompensation im Niederspannungsbereich begonnen. In der Zwischenzeit wurde die ganze Angebotspalette für LV-Kondensatoren auf trockene Technologie umgestellt. Die Technologie wurde über die Jahre hinweg laufend verbessert. Vor kurzem hat ABB die analoge Technologie auch für Mittel- und Hochspannungskondensatoren eingeführt. Damit konnten erstmals auch in diesem Spannungsbereich mit trockener Technologie vergleichbare höhere Energiedichten als mit imprägnierten Kondensatoren erzielt werden.

Eine fachgerechte und sorgfältige Verarbeitung bei der Herstellung ist bei Trockenkondensatoren von besonderer Bedeutung. Da bei ölprägnierten Kondensatoren das Öl einen Teil der Isolationsfestigkeit übernehmen kann, haben in ölprägnierten Systemen kleinere Mängel kurzfristig meist keinen Einfluss auf dessen Verhalten. Die Qualität eines Trockenkondensators hingegen hängt oft stark vom Hersteller ab.

### Vor- und Nachteile von Trockenkondensatoren

Die bedeutende Erhöhung der elektrischen Feldbelastung des Dielektrikums dank der selbstheilenden Technologie geht direkt mit einer Verkleinerung des Kondensators einher. Dadurch können bedeutende Einsparungen an Materialien erzielt werden. Dies wirkt sich aus auf die benötigte Menge von Kunststoffolie, Gehäuse, Trag- und Einschliessvorrichtungen bei Installationen sowie Transport, Montage und Entsorgung.

Metallisierte Elektroden enthalten bedeutend weniger Metall als Kondensato-

**Bild 5 Einzelne Schritte in der Herstellung eines Kondensators:** links ist ein Wickel, bestehend aus zwei metallisierten Kunststofffolien abgebildet, der Wickel in der Mitte ist bereits mit einer Kontaktierungsschicht versehen, und beim Wickel rechts handelt es sich um einen fertigen, mit Harz vergossenen Kondensator.



ren mit Aluminiumfolie als Elektrode. Wie erwähnt, hat die Metallisierung nur eine Dicke von 0,01 bis 0,02  $\mu\text{m}$ , die Dicke der Aluminiumfolie hingegen beträgt einige Mikrometer. Dies führt einerseits zu einer Erhöhung der Energiedichte, was sich in Reduktion von Gewicht und Grösse ausdrückt. Andererseits wird bei der Entsorgung der Kondensatoren die hundertfach kleinere Menge an Metall frei.

Obwohl die Leitfähigkeit bei metallisierten Elektroden bedeutend geringer ist als bei Aluminiumfolie, sind die thermischen Verluste eines metallisierten Trockenkondensators in Betrieb eher geringer. Wegen der selbstheilenden Technologie erübrigt sich nämlich in einem grösseren Kondensator die Absicherung einzelner Wickel durch Sicherungen. Die elektrischen Verluste in den Sicherungselementen sind vergleichbar mit denjenigen in den metallisierten Elektroden.

Früher wurden als Dielektrikum oft Materialien verwendet, die aus Fasern bestanden, wie Papier oder Kunststofffolien, die eine nicht zufriedenstellende Qualität aufwiesen, beispielsweise grosse Variationen in der Dicke. Um ein dennoch einigermassen homogenes Material herstellen zu können, versah man dieses mit einer Imprägnierflüssigkeit. Das Imprägniermittel, mit ähnlichen elektrischen Eigenschaften wie das Dielektrikum, dringt zwischen die Fasern oder in Defektstellen ein und bewirkt so ein Homogenisieren des Dielektrikums. Die heute

verfügbaren Kunststoffolien hingegen sind nicht aus Fasern gemacht und sehr uniform. Die Defektanzahl wurde in den letzten Jahren laufend verringert. Ein Imprägnieren mit einer Flüssigkeit erübrigt sich dadurch.

Bei ölprägnierten Kondensatoren besteht immer die Gefahr, dass aus einem Leck im Kondensator Öl austreten kann. Dadurch können ganze Anlagenteile und weitere Bereiche verschmutzt werden oder es müssen spezielle Auffangbecken installiert werden. Bei nicht eingeschlossenen Anlagen besteht die Gefahr der Verschmutzung des Grundwassers und Erdreichs. Bei Ölverlust ändert sich die Leistungsfähigkeit des Kondensators und er degradiert rasch. Öllecks sind einer der wichtigsten Gründe fürs Ersetzen von Kondensatoren. Bei Funkenwurf in einem der Anlagenteile, zum Beispiel einem Schalter oder Relais, besteht die Gefahr der Entflammung des Öls. Falls in einem Anlagenteil Feuer auftritt, kann sich dieses über den Ölteppich in der Anlage schnell weiter verbreiten. Nach thermischen Zyklen kann oft, infolge unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien, ein Austritt von kleinen Ölmengen bei ansonsten intakten Kondensatoren beobachtet werden.

In den letzten Jahren wurden verbesserte und biologisch abbaubare Ölsorten und -zusammensetzungen zur Imprägnierung entwickelt. Die früher verwendeten mineralischen Öle waren teils krebs-erregend. Bei den meisten Ölen besteht



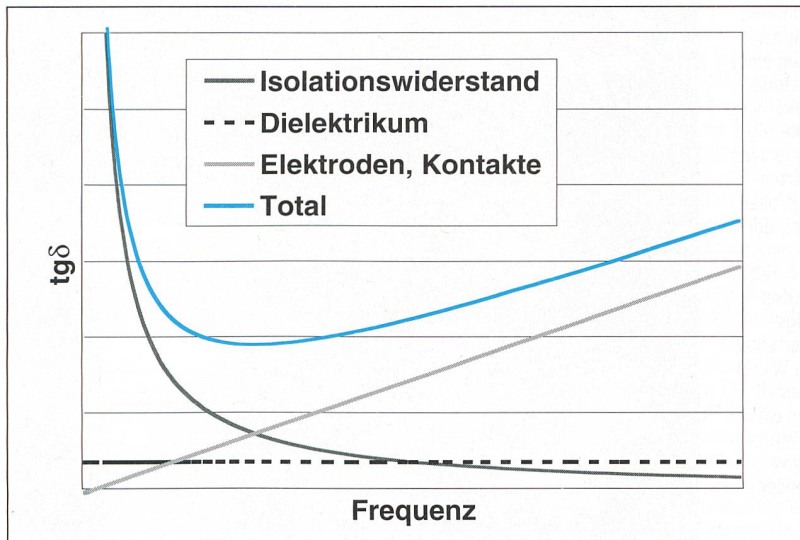


Bild 6 Schematische Darstellung der verschiedenen Beiträge zum Verlustfaktors eines Kondensators als Funktion der Frequenz.

aber das Problem, dass sich ein zumindest geringes Eindringen von einigen Prozent Öl in die Polymerfolie nicht verhindern lässt. Durch den zusätzlichen Ölanteil quillt die Polymerfolie leicht auf. Was bei Kondensatoren mit Aluminiumfolie ein gewünschter Effekt war, wirkt sich bei metallisierten Kondensatoren negativ aus. Durch das Aufquellen der Polymerfolie entstehen nämlich Risse in der dünnen Elektrode. Dies äussert sich in einem Anstieg des Elektrodenwiderstandes. Da der Diffusionsprozess, vor allem bei niedrigen Temperaturen, recht langsam abläuft, kann die Widerstandserhöhung erst nach einigen Monaten oder einigen Jahren sichtbar werden. Die damit einhergehende zusätzliche Erwärmung bewirkt eine beschleunigte Alterung des Kondensators. Bei hohen Temperaturen kann der Effekt rasch auftreten. Bei Trockenkondensatoren tritt dieser Effekt nicht auf, und der Verlust bleibt über die ganze Lebensdauer nahezu gleich. Dabei ist keine elektrische Belastung notwendig, und der Vorgang kann bereits bei der Lagerung auftreten.

Der Prozess der Ölimprägnierung von Kondensatoren bedingt Prozesszeiten von einigen Tagen. Dazu werden grosse Imprägnieranlagen benötigt, die bei den Herstellern entsprechende Investitionskosten verursachen und sich schlussendlich auf Kosten sowie Lieferfristen des Kondensators niederschlagen.

Wenn von trockener Technologie und Umweltverträglichkeit gesprochen wird, ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass die Kondensatoren kein Sulphurhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) enthalten sollten.  $\text{SF}_6$  wird zur Verbesserung der Isolationseigenschaften sowie zur Unterdrückung von Teilentladungen als gasförmiges Imprä-

gniermittel eingesetzt.  $\text{SF}_6$  gilt als starkes Treibhausgas, mit einem Potenzial für globale Erwärmung, das mehr als 36 000mal höher liegt als bei  $\text{CO}_2$  [1]. ABB verwendet in seinen Kondensatoren kein  $\text{SF}_6$ . Ein zusätzliches Problem bei Gasimprägnierung ist, dass im Falle eines Lecks dieses nicht direkt bemerkt wird und erst über eine starke Verschlechterung der Kondensatorleistung offensichtlich wird.

Als Nachteil des Trockenkondensators gilt vor allem die wegen fehlendem Öl nicht vorhandene Eigenschaft, die Qualität des Dielektrikums an Fehlstellen zu verbessern und dadurch Teilentladungsprozesse zu verhindern. Bei sachgerechter Konstruktion und Herstellung ist dies aber nicht notwendig. Bei gasimprägnierten Kondensatoren wird zudem die Wärmeabfuhr gegen aussen behindert. Bei vergossenen oder ölimprägnierten Kondensatoren ist die Wärmeleitfähigkeit jedoch vergleichbar.

Metallisierte Trockenkondensatoren lassen sich über geeignete Wahl der Kunststofffoliendicke und der Leitfähigkeit der Metallisierung an die jeweiligen Betriebsbedingungen und die geforderte Lebensdauer anpassen. Einige Betrachtungen zu diesem Thema sind im nächsten Kapitel dargelegt. Dadurch lässt sich das eingesetzte Material optimal nutzen.

### Betrachtungen zum Einsatz eines Trockenkondensators

Die wesentlichen Grössen, die in die Dimensionierung eines Kondensators eingehen, sind Spannung, Temperatur und geforderte Lebensdauer.

Bei vorgegebener elektrischer Feldstärke, die für eine bestimmte Kunststoffolie verwendet werden kann, bestimmt die Spannung die benötigte Foliendicke. Sowohl die Abhängigkeit der Lebensdauer vom verwendeten elektrischen Feld als auch diejenige von der Temperatur zeigen ein exponentielles Verhalten. Eine erhöhte Umgebungstemperatur lässt sich durch Verwendung einer etwas dickeren Kunststoffolie, das heisst durch Reduktion des elektrischen Feldes, kompensieren. Der Kondensator bietet nach wie vor einen sicheren Betrieb bei der geforderten Lebensdauer. Dies gilt natürlich nur bis zur jeweiligen Schmelztemperatur des Kunststoffes.

Für die Bestimmung der massgebenden Temperatur ist nicht nur die Umgebungstemperatur wichtig. Auch der Kondensator selbst weist Verluste auf und produziert dadurch Wärme. Zur Angabe der Verluste eines Kondensators wird meist der Verlustfaktor  $\text{tg}\delta$  verwendet:

$$\text{tg}\delta = Z'/Z''$$

wobei  $Z'$  und  $Z''$  der Real- beziehungsweise Imaginärteil der komplexen Impedanz sind. Im Gegensatz zum äquivalenten Seriewiderstand ist der Verlustfaktor unabhängig von der Grösse der Kapazität und eignet sich daher besonders gut zum Vergleich verschiedener Typen von Kondensatoren. Der Verlustfaktor eines Kondensators setzt sich im Wesentlichen aus drei Komponenten zusammen, die eine jeweils unterschiedliche Frequenzabhängigkeit aufweisen (Bild 6):

- einem Anteil, der sich aus dem Isolationswiderstand des Kondensators ergibt und mit zunehmender Frequenz  $f$  mit  $1/f$  abnimmt. Der Isolationswiderstand zeigt eine starke Temperaturabhängigkeit. Der Verlustfaktor nimmt mit zunehmender Temperatur ebenfalls zu,
- einem Anteil, der von der Polarisierbarkeit des Dielektrikums stammt und für Polypropylen über den für die Praxis anwendbaren Frequenz- und Temperaturbereich praktisch konstant ist und etwa  $\text{tg}\delta_0 = 2 \cdot 10^{-4}$  beträgt,
- einem Anteil, der von der Leitfähigkeit der Elektrode sowie von den Zuleitungen und von Kontaktwiderständen abhängt. Der Verlustfaktor nimmt linear mit der Frequenz zu. Erhöhte Temperatur wirkt sich meist in einer Erhöhung des Verlustfaktors aus. Falls ein Kontaktwiderstand dominiert, kann sich der Verlustfaktor aber bei Temperaturzunahme auch reduzieren.

Bei kleinem Verlustfaktor ergibt sich die Verlustleistung  $P$  des Kondensators zu:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\phi \approx \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \text{tg}\delta$$



Dank der selbstheilenden Technologie, bei der bei einem elektrischen Durchschlag jeweils nur ein winziger Teil der totalen aktiven Kondensatorfläche ausfällt, kommt es bei metallisierten Trockenkondensatoren zu einer langsamen Abnahme der Kapazität. Der Kondensator steigt nicht plötzlich aus, sondern er degradiert allmählich. Wie in Bild 2 gezeigt, ist dies auf eine allmähliche Abnahme der Isolationsfestigkeit einzelner Stellen in den Kunststofffolien zurückzuführen. Auch in degradiertem Zustand bleibt der Kondensator voll funktionstüchtig, allerdings mit reduzierter Kapazität, wodurch bei Blindstromkompensation nicht mehr voll kompensiert werden kann. Aus Sicherheitsgründen sind die Kondensatoren oft mit einer Vorrichtung versehen, die sie bei Überhitzung kurzschließen. Durch geeignete Wahl der Foliendicke lässt sich bei gegebenen Temperaturbedingungen die Lebensdauer eines Trockenkondensators auf den gewünschten Wert abstimmen. Dieser kann zwischen einigen Jahren und einigen Jahrzehnten variieren. Bild 7 zeigt Resultate von Alterungsmessungen, die während einer Dauer von zwei Jahren bei unterschiedlichen elektrischen Feldern durchgeführt wurden.

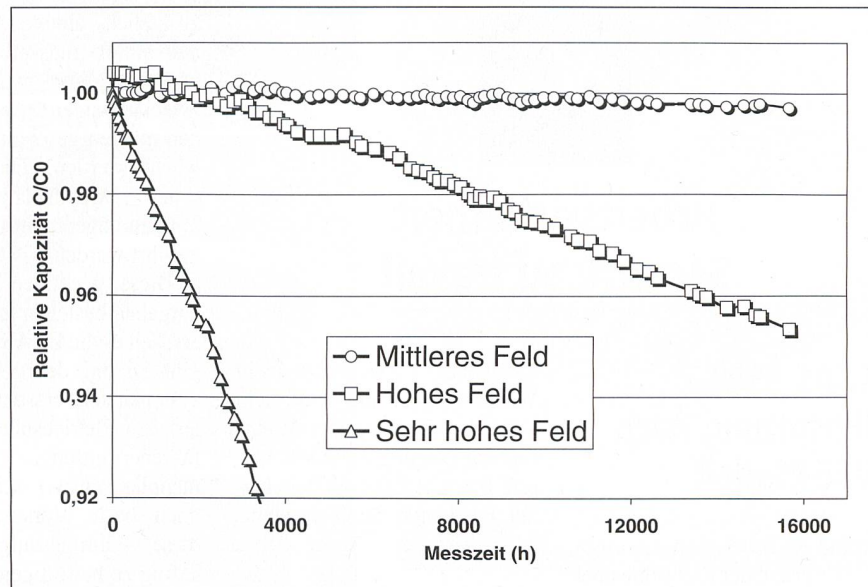


Bild 7 Kapazitätsänderung eines Trockenkondensators: Messungen beschleunigter Alterung bei hohen und mittleren Feldbelastungen. Je nach verwendetem Feld erfolgt die Kapazitätsabnahme schneller oder langsamer. Diese erfolgt aber jeweils kontinuierlich und lässt den Kondensator weiterhin zuverlässig und sicher funktionieren.

ist ein wesentlicher Vorteil bei der Entsorgung der Kondensatoren nach deren Lebensende. Weitere Vorteile sind, konstante Verluste über die gesamte Lebensdauer und vereinfachte Herstellung.

#### Referenz

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The 1994 Report of the Scientific Assessment Working Group of IPCC.

## Zusammenfassung

Trockenkondensatoren aus Kunststofffolie sind seit mehreren Jahren auf dem Markt und haben sich im Einsatz bestens bewährt. Voraussetzung dazu ist die korrekte und sorgfältige Herstellung, da im Gegensatz zu Kondensatoren mit Flüssigkeitsimprägnierung keine nachträgliche Verbesserung von Defektstellen durch das Imprägniermedium möglich ist.

Selbstheilende Trockenkondensatoren bieten sowohl bezüglich Umweltverträglichkeit als auch technischer Leistungsfähigkeit wesentliche Vorteile gegenüber Kondensatoren anderer Technologie. Sie weisen eine sehr hohe Leistungsdichte auf, was mit minimalem Materialaufwand einhergeht. Da sie trocken sind, kann im Falle eines Lecks im Gehäuse kein Öl austreten. Bei Bränden ist die Weiterverbreitung des Feuers durch Öl ausgeschlossen. Die Elektroden enthalten nur sehr geringe Mengen Metall. Dies

## Amélioration du bilan écologique grâce à la technologie des condensateurs à isolation sèche

A côté de la technologie traditionnelle des condensateurs à isolation humide (feuilles synthétiques imprégnées à l'huile), celle des condensateurs régénérables à isolation sèche est devenue de plus en plus importante au cours des dernières années. Compte tenu de leurs excellentes performances techniques et de leur impact favorable sur l'environnement, les condensateurs à isolation sèche sont utilisés de préférence pour la compensation de la puissance réactive et d'autres applications. Ils présentent une densité de puissance élevée obtenue avec un minimum de matériaux. L'isolation étant sèche, toute fuite d'huile est exclue en cas de fissures et toute propagation d'un incendie par de l'huile est impossible. Les électrodes ne contiennent que de faibles quantités de métal. Cela représente un avantage déterminant lors de l'élimination des condensateurs à la fin de leur durée de vie. Des pertes constantes tout au long de la durée de vie et une fabrication simple constituent des avantages supplémentaires.