

**Zeitschrift:** Bulletin Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik  
**Band:** 94 (2003)  
**Heft:** 24-25

**Artikel:** Trockenkondensator für Hochspannungs-Gleichstromanwendungen  
**Autor:** Drugge, Birger / Carlen, Martin / Laihonen, Sari  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857628>

### **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:** 17.03.2025

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

# Trockenkondensator für Hochspannungs-Gleichstromanwendungen

**Hohe Energiedichte auf kleinem Raum und verbesserte Umweltverträglichkeit gegenüber herkömmlichen Kondensatoren**

Hochspannungstrockenkondensatoren einer neuen Generation, die speziell für Gleichspannungsanwendungen im Innenbereich entwickelt wurden, speichern doppelt so viel Energie auf halbem Raum und wiegen 80% weniger als konventionelle ölpräparierte Kondensatoren. Diese Kondensatoren haben ein zylindrisches Gehäuse aus Polymermaterial, dessen Länge proportional zur Betriebsspannung ist. Sie eröffnen damit eine Fülle von völlig neuen Einsatzmöglichkeiten und vereinen Wirtschaftlichkeit mit verbesserter Umweltverträglichkeit.

Die auf Grund ihrer wesentlich geringeren Grösse und ihrer zylindrischen Ausführung völlig neu gestalteten Trockenkondensatoren haben sich bereits

*Birger Drugge, Martin Carlen, Sari Laihonon, Luc Spronck*

einen Namen im kommerziellen Einsatz gemacht – beispielsweise in Hochspannungs-Gleichstromübertragungsanlagen (HGÜ), wo sie die Stromübertragung im Spannungsbereich von 9 kV bis 150 kV stabilisieren.

Wie die meisten Innovationen baut auch die neue Kondensator-Technologie auf früher Erreichtem und neuesten Ergebnissen aus Forschung und Entwicklung auf. Ein Blick auf die Entwicklung der Kondensatoren von «nass zu trocken» verdeutlicht die Bedeutung dieser neuen Technologie.

## Nass und trocken – ein Rückblick

Herkömmliche Hochspannungskondensatoren setzen sich aus mehreren Kondensatorwickeln zusammen, die je nach spezifizierten elektrischen Anforderungen des Kondensators intern parallel oder in Reihe geschaltet sind. Die Kondensatorwickel bestehen aus Elektroden aus Metallfolie, die durch ein aus einer Polymerfolie bestehendes Dielektrikum

getrennt sind. Die Polymerfolie wird mit einer speziellen Flüssigkeit – meistens einem Öl – imprägniert. Die Wickel sind in einem Metallgehäuse untergebracht, das mit Imprägnierflüssigkeit aufgefüllt wird und mit Durchführungen für die elektrischen Anschlüsse versehen ist. Diese Technologie hat zu elektrischen Feldbelastungen geführt, die das Fünf- bis Zehnfache der Feldbelastung der Isolation anderer Hochspannungseinrichtungen beträgt. Die elektrische Isolationsfestigkeit von Kondensatoren ist deshalb ein Schlüsselfaktor für ihr Design und ihren Betrieb. Anfang der 90er-Jahre wurde die metallisierte Kunststofffolien-Technologie für Kondensatoren in 1–4-KV-Gleichstromanwendungen eingeführt, beispielsweise in den Bereichen Traktionssysteme und industrielle Antriebssysteme. Die hierzu verwendeten Poly-

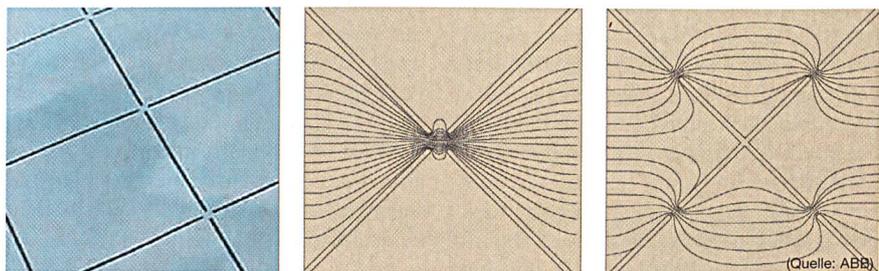
merfolien sind grundsätzlich gleich wie jene der herkömmlichen Technologie. Allerdings bestehen die Elektroden aus einer dünnen Metallschicht, die direkt auf die Folie aufgebracht wird. Die Wickel werden normalerweise ebenfalls mit Öl oder einer ähnlichen Isolierflüssigkeit imprägniert.

Im Laufe der Jahre wurden auch einige wenige «Trockenkonzepte» eingeführt, bei denen der Kondensatorbehälter mit Gas statt mit Flüssigkeit gefüllt ist. Seit Anfang der Achtziger sind ausserdem Niederspannungskondensatoren mit metallisierten Folien auf dem Markt, die weder Imprägnierflüssigkeit noch -gas enthalten.

## Warum metallisierte Elektroden?

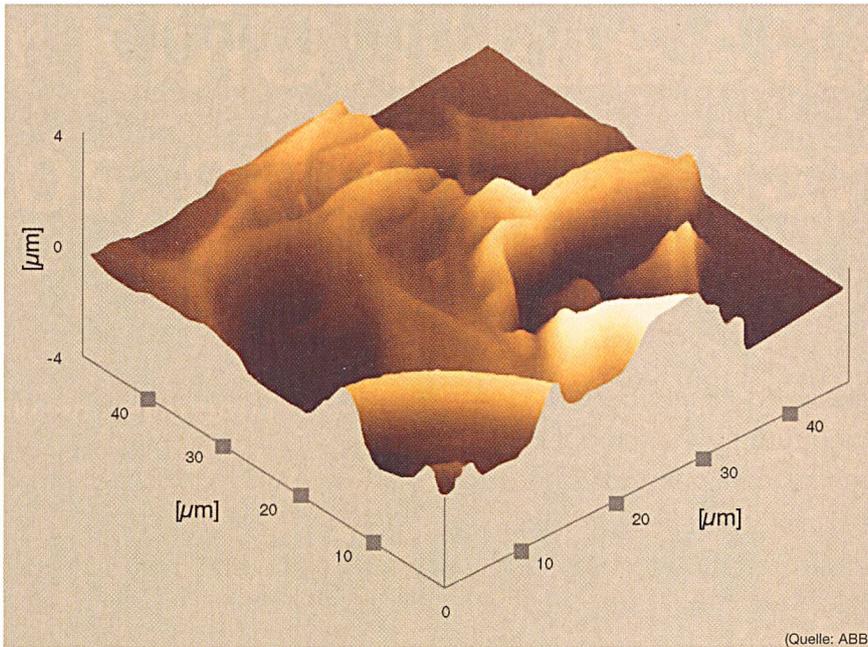
Polymerfolienkondensatoren mit Aluminiumfolienelektroden weisen eine sehr hohe Stromtragfähigkeit auf. Bei einem Durchschlag entlädt sich die gesamte im Kondensator gespeicherte Energie in die Fehlerstelle. Um den Energieumsatz an der Fehlerstelle zu begrenzen, werden deshalb bei grossen Kondensatoren zu den einzelnen Wickeln Sicherungen in Reihe geschaltet. Wenn dann eine Sicherung durchbrennt und den schadhafte Wickel abtrennt, verliert der Kondensator nur einen bestimmten geringen Prozentsatz seiner Kapazität.

Bei metallisierten Folienkondensatoren kommt ein anderes Prinzip zur

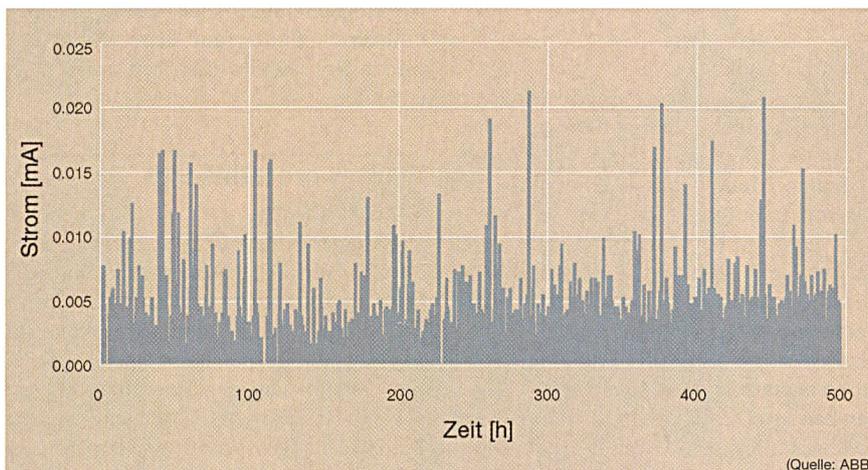


**Bild 1** Metallfolie eines Kondensators mit typischer Segmentierung und Finite-Elemente-Berechnungen

Die abgebildeten Segmente haben eine Grösse von rund 1 cm<sup>2</sup>. Die elektrischen Verbindungen an den Ecken dienen als Sicherungen. Finite-Elemente-Rechnung der Stromdichte von Mosaik-Elektroden mit Eckanschluss (Mitte) und mittigem Seitenanschluss (rechts).



**Bild 2** Oberfläche einer Polymerfolie  
Aufnahme mittels Rasterkraftmikroskopie



**Bild 3** Gemessene Nachladeströme

Strombegrenzung zum Einsatz: Durch die Auswahl einer geeigneten Elektrodenleitfähigkeit wird lokal der Widerstand der Elektrode erhöht. Ausserdem kann die Elektrode, deren Dicke nur einige Nanometer beträgt, segmentiert werden. Die einzelnen Segmente sind untereinander wiederum durch Stromtore verbunden, um eine Matrix aus lokalen Sicherungen zu bilden (Bild 1). Falls ein Durchschlag eintritt, verdampfen die Metallfläche und die Stromtore um die Fehlerstelle und isolieren diese vom Rest des Kondensators. Dieser Prozess wird als Selbstheilung bezeichnet. Da nur ein sehr kleiner Teil des aktiven Bereichs zerstört wird, ist der Kapazitätsverlust vernachlässigbar. In einem grossen Kondensator müssen Tausende von Durch-

schlägen auftreten, bevor sich ein Kapazitätsrückgang bemerkbar macht.

Der Anstieg des Elektrodenwiderstands (aus «Sicht» des Laststroms) hängt von der spezifischen Ausgestaltung der Elektrode ab und muss beim Design berücksichtigt werden. In Bild 1 wird beispielhaft die Stromverteilung für zwei verschiedene Elektroden gezeigt. In beiden Fällen ergibt sich ein unterschiedlicher Wert für den Wirkwiderstand. Auf Grund dieser Eigenschaften ermöglichen selbstheilende Kondensatoren höhere Feldstärken.

## Das Entwicklungsprojekt

1998 wurde eine Projektgruppe gebildet, um einen Hochspannungstrocken-

kondensator für den Einsatz in den neuen HVDC<sup>1)</sup>- und SVC<sup>2)</sup>-Light-Anlagen von ABB zu entwickeln. Gefragt war ein Trockenkondensator mit einer niedrigen Induktivität, der in der Nähe der Leistungshalbleiter installiert werden und somit die Systemeffizienz verbessern kann. Der Kondensator sollte für den Einsatz in Innenräumen ausgelegt werden, da die Module der HVDC- und SVC-Light-Anlagen im Werk zusammengebaut und getestet und dann als Container einsatzbereit an den Aufstellungsort geliefert werden.

Schon zu Beginn des Projekts hat man sich für die Verwendung der metallisierten Folientechnologie entschieden, welche bereits seit zwei Jahrzehnten von ABB Jumet<sup>3)</sup> in seinen trockenen Niederspannungsleistungskondensatoren eingesetzt wird.

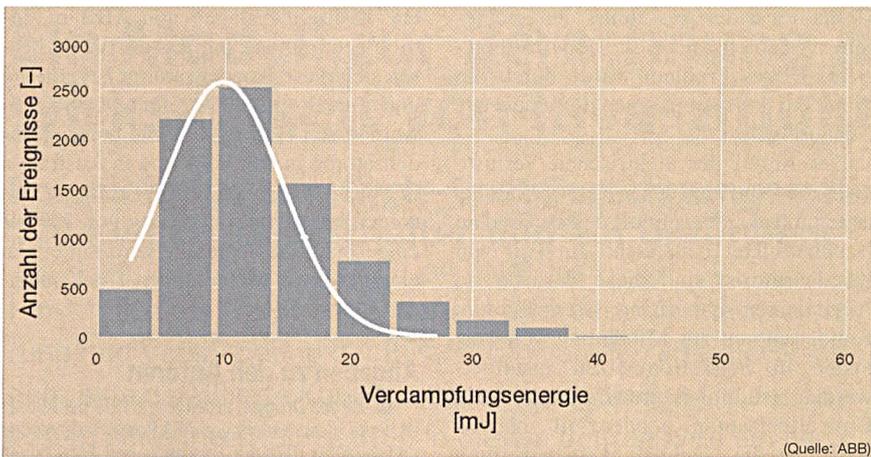
Einer der Schlüssel für die hervorragenden Eigenschaften des neuen Kondensators ist die Möglichkeit, das Phänomen der Selbstheilung zu beherrschen. Dies wurde durch eine spezielle Elektrodenausgestaltung sowie eine neu entwickelte Verfahrenstechnik ermöglicht. Die Simulation des Selbstheilungsprozesses, insbesondere der Dynamik des Plasmas im Lichtbogen, lieferte äusserst nützliche Daten, die wesentlich in die Entwicklung und Fertigung einflussen.

ABB verfügt über eigene, automatisierte Testmethoden zur Bestimmung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit und der Charakteristika von neuen und gealterten dielektrischen Folien. Bei dieser Methode werden verschiedene Bereiche der Folie so lange mit einer zunehmenden Spannung belastet, bis ein Durchschlag erfolgt. Die Durchschlagmessungen werden mit unterschiedlich grossen Elektroden durchgeführt, mehrmals wiederholt und mit statistischen Methoden analysiert. Diese Testmethode hat sich als sehr nützliches Werkzeug für die Definition und für das Verständnis der Alterungs- und Durchschlagsmechanismen erwiesen.

Darüber hinaus wurden die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Polypropylenfolie untersucht, beispielsweise mit Hilfe der Rasterkraftmikroskopie<sup>4)</sup> (Bild 2).

## Leistung und Lebensdauer

Die Untersuchung der grundlegenden Phänomene ergab wertvolle Informationen, die in das Design des Kondensators einflussen. Allerdings ist letztlich das Verhalten der Kondensatoreinheit als Ganzes entscheidend – ein weitaus komplexerer Aspekt. Deshalb wurde der Prü-



**Bild 4** Statistische Verteilung der zur Verdampfung einer Elektrode erforderlichen Energie  
 $\mu = 9,6 \text{ mJ}$ ;  $\sigma = 6,9 \text{ mJ}$ ;  $\sigma = 12,2 \text{ mJ}$

fung der gesamten Einheit besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Um schnell genaue Informationen zur Leistung von Metallfolien-Kondensatoren zu erhalten, hat ABB die «Teildurchschlag-Nachladestrom»-Methode PBRCM (Partial Breakdown Recharge Current Method) entwickelt. Diese Methode ermöglicht die Beobachtung einzelner Teildurchschläge und gibt einen besseren Einblick, was tatsächlich in einem Kondensator passiert.

Bei herkömmlichen Verfahren werden Verhalten und Lebensdauer von Kondensatoren anhand von Versuchen mit beschleunigter Alterung bestimmt. Dabei wird ein Kondensator bei hoher Temperatur mit einem starken elektrischen Feld belastet und die Änderung der Kapazität beobachtet. Allerdings müssen sehr extreme Testbedingungen geschaffen werden, um in angemessener Zeit Ergebnisse zu erhalten. Infolgedessen können andere Vorgänge ablaufen als unter normalen Betriebsbedingungen und die zu erwartenden Werte verfälschen. Dieses Problem wird bei PBRCM umgangen. Die Kondensatoren können unter realistischeren Lastbedingungen getestet werden, und die Ergebnisse stehen zudem schneller zur Verfügung.

Die zur Verdampfung einer Elektrode während eines Teildurchschlags erforderliche Energie wird durch Messung der Amplituden der Nachladeströme bestimmt (Bilder 3 und 4). Diese Informationen sind ein wichtiger Eingabeparameter für das Elektrodendesign. Da die Energie, die innerhalb bestimmter Grenzwerte liegen sollte, sehr stark von der Spannung abhängt, muss eine für die spezifische Spannungsstufe geeignete Elektrodenleitfähigkeit gewählt werden.

Die Untersuchung gealterter Kondensatorelemente liefert ebenfalls wichtige Auslegungsinformationen. Deshalb hat

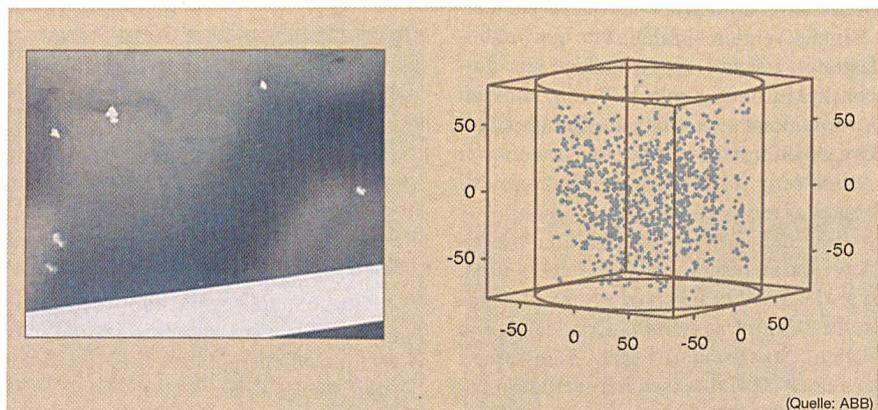
ABB ein automatisiertes System zur digitalen Bildverarbeitung entwickelt, mit dem Schäden an metallisierten Elektroden analysiert werden können. Mit diesem System können Anzahl, Grösse und Position von Teildurchschlägen in den Kondensatorwickeln bestimmt werden. Bild 5 zeigt ein Stück einer metallisierten Elektrode aus einem Kondensator, der einem Schnellalterungsprozess unterzogen wurde. Die weissen Bereiche sind die Positionen, wo Durchschläge stattfanden und die Metallisierung verdampfte. Sie haben einen Durchmesser von 1–2 mm. Eine statistische Analyse der Ergebnisse zeigt, wo Schwachpunkte in einem Wickel liegen und wo Verbesserungen erforderlich sind. Die Korrelation der Schadensanalysewerte und der PBRCM-Werte liefert weiteren, wichtigen Input für das Elektrodendesign und die Fertigungsprozesse.

Die Bestimmung der zu erwartenden Lebensdauer der Polymerisolation wird durch die Selbstheilungseigenschaften der dielektrischen Folie wesentlich er-

leichtert. Normalerweise ist es schwierig, Daten zu einer ausreichenden Anzahl an Durchschlägen zu sammeln, um eine relevante statistische Grundlage für eine Auswertung zu schaffen. Auf Grund der Selbstheilungseigenschaften kann allerdings ein einziges Testobjekt Zehntausende von Durchschlägen bieten, und jeder dieser Durchschläge wird mit der Temperatur und der elektrischen Belastung sowie der Änderung der Kapazität, des Verluststroms und der Verluste als Zeitfunktion aufgezeichnet.

### Umweltverträglichkeit

Schon zu Beginn des Projekts wurde festgestellt, dass die Unterbringung des Kondensators in einem rohrförmigen Polymergehäuse zahlreiche wichtige Vorteile hat: Ein solches Gehäuse ist kostengünstig und ausserdem so leicht, dass der Kondensator an in der Decke befestigten Trägern aufgehängt werden kann. Und da das Gehäuse aus isolierendem Material besteht, können dem Kondensator weitere, in Reihe geschaltete Elemente hinzugefügt werden, um den gewünschten Spannungswert zu erreichen (Bild 6). Dies führt zu erheblichen Kosteneinsparungen, weil das Polymerrohr sowohl als Gehäuse wie auch als Isolator und Durchführung dient und folglich grössere Isolatoren und Gestelle, wie sie zur Trennung der in Reihe geschalteten Kondensatoren in herkömmlichen Kondensatorbanken eingesetzt werden, überflüssig macht. Bei genügender Wandstärke des Gehäuserohrs ist zudem eine gute Isolierung zwischen den Kondensatorwickeln und den anderen spannungsführenden Teilen einer Anlage sichergestellt. Andere Vorteile, die der Einsatz von Polymergehäusen bietet, sind deren Korrosionsbeständigkeit und die Tatsache, dass kein Lackierungsanstrich notwendig ist.



**Bild 5** Teil einer metallisierten Elektrode mit Durchschlagstellen (links) aus einem beschleunigt gealterten Kondensator und 3-D-Darstellung der Durchschlagstellen in einem Kondensatorelement  
 Die weissen Flecken sind die metallfreien Stellen, die den Durchschlagskanal vom Rest der Elektrode isolieren.

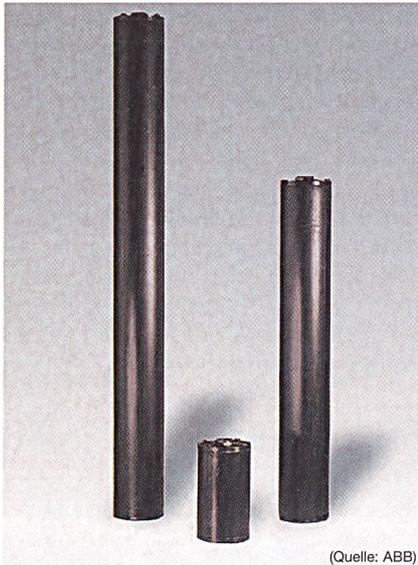


Bild 6 Für höhere Spannungen kann der Kondensator entsprechend verlängert werden

Die verwendeten zylindrischen Gehäuse wurden ausführlichen Analysen und Tests unterzogen ebenso wie das Rohrmaterial selbst. Bei diesen Tests wurden unter anderem die zu erwartende Wärmeausdehnung, die möglichen Druckkräfte und die mechanischen Kräfte berücksichtigt.

Die Aspekte der Nachhaltigkeit des Produktes spielten in jeder Stufe des Projekts eine wichtige Rolle. Zur Bestimmung der Umwelteinflüsse jeder Phase im Lebenszyklus eines Kondensators wurde eine Nachhaltigkeitsanalyse (LCA) unter Berücksichtigung aller Faktoren von den Grundstoffen bis hin zur endgültigen Entsorgung des Endprodukts durchgeführt. Jeder Aspekt wurde geprüft und ausgewertet: Gewinnung der Rohmaterialien, Transport, Energieverbrauch, Umweltverschmutzung und Vorteile während der Lebensdauer des Produkts, aber auch die Rückgewinnung und Wiederverwertung der Energie und der Materialien am Ende der Nutzungsdauer.

In die Vergleichszahlen zur Umweltbelastung, welche die Grundlage der Lebenszyklusbewertung bildeten, flossen Informationen von diversen Gremien und Organisationen ein, wie etwa Daten von Zulieferern zu Verfahren, Energieverbrauch, Transport und anderes mehr.

Eine der Fertigungsstufen, der besondere Aufmerksamkeit gewidmet wurde, war der Lackierungsprozess. Konventionelle ölimprägnierte Kondensatoren haben Stahlgehäuse, die sachgemäss gegen Korrosion geschützt werden müssen. Deshalb werden sie mit zwei speziellen Farbschichten versehen. Während des Anstreichens verdampft das Lösungsmittel und beeinträchtigt die Umwelt.

Deshalb war der Ausschluss des Lackierungsverfahrens eines der Entwicklungsziele. Dieses Problem wurde durch die Wahl des korrosionsfreien Polymers als Gehäuse gelöst.

Der Anteil der elektrischen Verluste über die Nutzungsdauer eines Produkts ist ein Aspekt, der sehr oft dessen Grad an Nachhaltigkeit beherrscht. Im Fall von Kondensatoren sind diese Verluste im Allgemeinen sehr gering. Da ausserdem Kondensatoren zur Minderung von Verlusten in Starkstromnetzen installiert werden, ist ihre Nettowirkung auf die Umweltbelastung tendenziell positiv. ABB hat die Nachhaltigkeitsbewertung eingesetzt, um den neuen Trockenkondensator mit konventionellen ölimprägnierten Kondensatoren einer Anlage zu vergleichen, für die acht konventionelle Kondensatoren, aber – dank ihrer besseren Leistungsfähigkeit – nur drei Trockenkondensatoren benötigt werden. Welcher Aspekt auch untersucht wurde, der Vergleich zeigt, dass der neue Trockenkondensator der konventionellen Technologie im Hinblick auf ihre Umweltverträglichkeit überlegen ist. Dazu tragen mehrere Gründe bei:

- der Trockenkondensator kommt ohne Imprägnierflüssigkeiten, Lösungsmittel, Farben und andere gefährliche Chemikalien aus;
- für seine Herstellung und seinen Transport wird weniger Energie verbraucht;
- die Verluste während des Betriebs sind geringer;
- am Ende seiner Nutzungsdauer kann der Kondensator mit einem hohen Anteil an zurückgewonnener Energie verbrannt werden.

### Kommerzieller Einsatz

Die ersten neuen Trockenkondensatoren wurden im Sommer 2000 in einer

HVDC-Light-Anlage<sup>5)</sup> von ABB in Betrieb genommen. Vom ersten Tag an liessen sich diese Kondensatoren zuverlässig und ohne Probleme betreiben. Ausserdem werden seit Herbst 2002 die neuen Kondensatoren in den USA und in Australien in 330-MW-HVDC-Light-Anlagen mit einer Übertragungsspannung von 150 kV eingesetzt. Die Spannung wird mit einem einzigen, zwei Meter langen Trockenkondensator realisiert.

### Angaben zu den Autoren

Dr. **Birger Drugge**, arbeitet seit 1979 bei ABB. Er ist heute Vizepräsident von ABB Power Technologies und verantwortlich für Forschung und Entwicklung im Bereich High Voltage Products.

ABB Capacitors, S-77180 Ludvica, birger.drugge@se.abb.com.

Dr. **Martin Carlen**, Physiker, ist seit 1995 bei ABB Corporate Research in Baden-Dättwil tätig. Seit 2003 ist er Leiter der Abteilung Elektrotechnologien.

ABB Corporate Research, CH-5405 Baden-Dättwil, martin.carlen@ch.abb.com

**Sari Laihonon**, Dipl.-Ing., ist Polymerphysikerin und seit 1995 bei ABB Corporate Research in Västerås, Schweden tätig. Seit 1998 leitet sie die Aktivitäten im Bereich Kondensatorentwicklung der Konzernforschung.

ABB Corporate Research, S-72183 Västerås, sari.laihonon@se.abb.com

**Luc Spronck**, Dipl.-Ing., arbeitete fünf Jahre als Forscher an der Universität Lüttich. 1997 wechselte er zu ABB, wo er heute als Technologiemanager tätig ist.

ABB Jumet, B-6040 Charleroi, luc.spronck@be.abb.com

<sup>1</sup> HVDC: High Voltage Direct Current

<sup>2</sup> SVC: Static Var Compensator (statischer Blindleistungskompensator)

<sup>3</sup> Asea Brown Boveri Jumet S.A., 6040 Charleroi, Belgien

<sup>4</sup> Bei der Rasterkraftmikroskopie ist der Bilddetektor eine Sonde mit atomarer Dimension (eine sehr scharfe Spitze), die mit einer Piezomechanik direkt über das Objekt gerastert wird. Die Auflösung wird in erster Linie durch die Detektorgeometrie bestimmt.

<sup>5</sup> In einer HVDC-Light-Anlage werden Hochspannungskondensatoren in der Gleichstromverbindung zur Stabilisierung der Übertragungsspannung eingesetzt. HVDC Light basiert auf spannungsgesteuerten Umrichtern mit IGBT-Halbleitern. Dieser Ansatz ermöglicht die unabhängige Steuerung sowohl der Wirk- als auch der Blindleistung, und derselbe Umrichter kann auch als SVC (statischer Blindleistungskompensator) eingesetzt werden.

## Condensateurs secs pour applications CCHT

**Densité énergétique élevée, faible encombrement et écologie améliorée par rapport aux condensateurs conventionnels**

Une nouvelle génération de condensateurs secs à haute tension, développée spécialement pour applications à l'intérieur des bâtiments, permet de stocker deux fois plus d'énergie dans un espace réduit de moitié et pour un poids de 80% inférieur à celui des condensateurs conventionnels à huile. Les condensateurs ont un boîtier cylindrique en matériau polymère dont la longueur est proportionnelle à la tension de service. Ils permettent ainsi une foule d'applications nouvelles et allient l'économie à une écologie améliorée.