

# Selbstheilende Leistungskondensatoren: Qualität und Betriebssicherheit

Peter Herbst

**Die Qualität von Leistungskondensatoren ist wegen der permanenten Belastung unter Nennbedingungen und stetig steigender zusätzlicher Belastung durch Oberschwingungen aus Netzrückwirkungen nicht linearer Verbraucher von großer Wichtigkeit für eine sichere und effektive Versorgung mit elektrischer Energie. Damit ein Hersteller seine technischen Zusagen auf Dauer halten kann, reicht eine einmal durchgeführte Typprüfung je Baureihe nicht aus. Vielmehr muss der Fertigungsprozess permanent überwacht und gegebenenfalls nachjustiert werden.**

Grundlage und Maßstab für Leistungskondensatoren ist die Norm DIN EN 60831-1 (VDE 0560-46):2003-08 [1] und DIN EN 60831-2 (VDE 0560-47):1997-09 [2] „Selbstheilende Leistungs-Parallelkondensatoren für Wechselstromanlagen mit einer Nennspannung bis 1kV“. Teil 1 behandelt Anforderungen, Prüfung und Bemessung der Kondensatoren, die Festlegung von speziellen Sicherheitsbestimmungen und Anleitungen für die Errichtung und den Betrieb von Blindstrom-Kompensationsanlagen. Teil 2 beschreibt Prüfungsverfahren für eine Alterungs-, Selbstheil- und Zerstörungsprüfung.

Die Standards beschreiben Stückprüfungen im Fertigungsprozess und zusätzlich Typprüfungen, in denen Baureihen von Kondensatortypen nachweisen müssen, ob sie die geforderten Bedingungen erfüllen. Bis auf die geforderten Stückprüfungen finden sich jedoch keine Aussagen darüber, wie die Qualität des Fertigungsprozesses selbst zu überwachen ist. Hier wird in der Regel auf erforderliche Vereinbarungen zwischen Kunde und Hersteller verwiesen. Die Einhaltung oben genannter Standards ergibt deshalb

keine Aussage über die permanente Qualität der Kondensatoren eines Herstellers. Wie kann jedoch anhand von Fakten festgestellt werden, ob die Kondensatoren eines Herstellers über eine längere Zeit von guter Qualität sind?

## Qualitätsmerkmale für Leistungskondensatoren

Der Oberschwingungspegel in öffentlichen und industriellen Netzen steigt seit vielen Jahren stetig an. In öffentlichen Netzen ist es heute möglich, Fernsehstörungen mit hoher Zuschauerzahl unmittelbar am Oberschwingungsgehalt zu erkennen. Der Pegel steigt in den Abendstunden und an Wochenenden signifikant an. Alle Leistungskondensatoren, die zu diesen Zeitpunkten am Netz eingeschaltet sind, werden dadurch zusätzlich belastet. Dabei ist im Wesentlichen die Strombelastung der Kondensatoren als kritisch anzusehen. Tritt zum Beispiel in einem Netz die elfte Oberschwingung mit 8 % der Netzennspannung auf, ist der Effektivwert der Netzspannung nur um etwa 0,3 % erhöht, der Strom in den Kondensatoren entspricht jedoch bereits dem 1,33-fachen seines Nennstroms.

Daher ist die Strombelastbarkeit eines Kondensators eine gute Kennziffer zur Aussage, ob es sich um einen guten oder weniger guten Kondensator handelt. Je nach Hersteller und Typenklasse können Kondensatoren dauernd mit bis zum 2,2-fachen Nennstrom belastet werden.

Leistungskondensatoren mit niedriger Verlustleistung haben eine niedrige Einschaltämpfung, was in der Konstruktion des Kondensators und

bei der Auswahl der Schaltgeräte berücksichtigt werden muss. Leistungskondensatoren sind, je nach Typenklasse, mit bis zum 300-fachen Nennstrom bei kurzen Stromspitzen belastbar. Die Spitzenstrom-Belastbarkeit ist eine gute Kennziffer zur Aussage über die Schaltfestigkeit eines Leistungskondensators, die mehrere 10 000 Schaltvorgänge im Jahr betragen kann.

## Kontinuierliche Prüfungen sichern die Qualität

Damit ein Hersteller seine technischen Zusagen auf Dauer halten kann, reicht eine einmal durchgeführte Typprüfung je Baureihe nicht aus. Vielmehr muss der Fertigungsprozess permanent überwacht und gegebenenfalls nachjustiert werden. Das fängt mit den Folieneingangsprüfungen, dem Korrosionstest, der Durchschlagsprüfung und Oberflächenwiderstandsmessung vor dem Wickelprozess an. Weiter geht es mit täglichen Stichproben an Kondensatorwickeln, wo durch eine Stoßstromprüfung die Qualität der Kontaktbrücke, die als Achillesferse eines Kondensators in Bezug auf seine Schaltfestigkeit bezeichnet werden kann, überprüft wird. Zusätzlich werden der Fertigung jede Woche Kondensatoren entnommen, die durch Stoßstromprüfung ihre Qualität der inneren Verschaltung nachweisen müssen. Weiter wird wöchentlich an neu hergestellten Kondensatoren überprüft, ob die zugesagten Effektivstrombelastbarkeiten eingehalten werden.

Die Stückprüfungen nach DIN EN 60831 am Ende des Herstellungsprozesses sind nur ein absolutes Mindestmaß an erforderlicher Sorgfaltspflicht eines Herstellers.

## Lebenserwartung von Leistungskondensatoren

Es gibt zurzeit keine allgemein gültige Beschreibung zur Berechnung der Lebenserwartung eines Leistungskondensators. Einige Hersteller benutzen daher eine in der DIN EN 60252-1 (VDE 0560-8):2002-05 [3] beschriebene Methode zur Ermittlung der Le-

Dipl.-Ing. **Peter Herbst**  
ist Geschäftsführer der  
Frako Kondensatoren-  
und Anlagenbau GmbH  
in Teningen.

E-Mail: [info@frako.de](mailto:info@frako.de)





**Bild 1.** Die Wärmeeinstrahlung von NH-Sicherungen, Kondensatorschützen und Filterkreisdrosseln auf die Kondensatoren sollte so gering wie möglich gehalten werden

Lebensdauer von Leistungskondensatoren, bei der eine Prüfdauer mit dem „Beschleunigungsfaktor“  $(U_{\text{Prüf}}/U_{\text{Nenn}})^2$  multipliziert wird. Diese Methode wurde jedoch für Papierkondensatoren mit einem etwa zehnfachen Verlustfaktor als bei den heute üblichen Kunststofffolien-Kondensatoren entwickelt. Die Zusammenhänge bei den verlustarmen Kondensatoren sind mit diesen nicht vergleichbar. Außerdem wurde sie für Kondensatoren in Anwendungen entwickelt, bei denen die Lebensdauer eine kleinere Rolle spielt als bei Leistungskondensatoren. Es wurde ein Produktausfall von 3 % der eingesetzten Stückzahl innerhalb der zu erwartenden Lebensdauer hingenommen. Eine solche Ausfallquote ist bei modernen Leistungskondensatoren nicht akzeptabel.

Prüfungen mit erhöhter Spannung und Temperatur bringen gute Indikatoren für die Qualität eines Leistungskondensators. Eine verlässliche Aussage für die Lebensdauer eines Kondensators ist jedoch nicht seriös möglich. Diese ist nur durch die Auswertung des tatsächlichen Ausfallverhaltens im Feld möglich. Das Qualitätsmanagement von Frako [4] kontrolliert die Qualität der Kondensatoren auf der Basis langjähriger statistischer Aufzeichnungen und dem gesammelten Anwendungs-Know-how in dieser Zeit. Zusätzlich muss jede Kondensatorreihe in spezifischen Lebensdauerprüfungen auf

Basis der DIN EN 60831 [1, 2] permanent durch Stichprobenprüfungen nachweisen, dass die Kondensatoren die von der Entwicklung vorgegebenen Werte auch erreichen.

Trotz der umfangreichen Prüfungen sollte der Anwender von Leistungskondensatoren beim Aufbau seiner Anlage jedoch Folgendes beachten: Kondensatoren dürfen immer nur innerhalb ihrer zugelassenen Spezifikation betrieben werden [5]. Vor allem trifft das auf die Umgebungstemperatur zu. Da moderne Leistungskondensatoren eine geringe Verlustleistung abgeben, muss beim Aufbau von Kompensationsanlagen besonders auf die abgegebene Wärme zugehöriger Bauteile, wie NH-Sicherungen, Kondensatorschützen und Filterkreisdrosseln, geachtet werden. Die Wärmeeinstrahlung von diesen Bauteilen auf die Kondensatoren sollte so gering wie möglich gehalten werden (Bild 1).

Leistungskondensatoren haben bei niedrigen Umgebungstemperaturen eine höhere Lebenserwartung. Das liegt daran, dass die chemischen Veränderungsprozesse im Dielektrikum und begleitende Korrosionsprozesse der Beläge bei einer Verringerung der Umgebungstemperatur von 7 °C bis 10 °C nur mit etwa halber Intensität ablaufen (Bild 2).

### Betriebssicherheit von Leistungskondensatoren

Leistungskondensatoren sind Bauelemente mit einer hohen Leistungsdichte, die permanent mit ihrer Nennleistung betrieben werden. Dies ist eine Herausforderung für die Kondensatorfolie, Füllstoffe und Imprägniermittel mit den ausgewählten Stabilisatoren. In einem Volumen von 1 l können heute etwa 16 kvar Blindleistung erzeugt werden. Diese Konzentration wird durch einen geringen

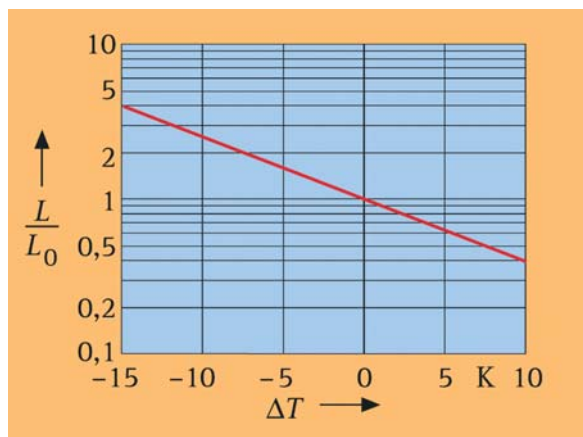
dielektrischen Verlustfaktor von  $<2 \times 10^{-4}$  möglich. Polypropylen-Folien sind mit Prüffeldstärken von  $>150 \text{ V}/\mu\text{m}$  belastbar und effizient. Damit diese hohe Belastbarkeit für eine lange Zeit konstant und nutzbar bleibt, ist eine Behandlung des Dielektrikums zur Unterdrückung von Teilentladungen erforderlich.

Dieses Ziel wird durch individuelle Fertigungsprozesse und eine Kombination von mineralischem Füllstoff und Stabilisator erreicht. Gleichzeitig wird Wert auf die Umweltverträglichkeit dieser Stoffe gelegt. Die Kondensatoren sind in der Wassergefährdungsklasse 1 eingestuft und können unter ihrer Abfallschlüsselnummer entsorgt werden. Der hohe Flammpunkt des Füllstoffs von  $>250 \text{ °C}$  sorgt zusätzlich für Sicherheit beim Brandschutz durch geringe Brandlast.

### Selbsteheilungsprozess schafft Sicherheit

Die Folie für Leistungskondensatoren ist selbsteilend metallisiert. Das heißt, die Metallschicht wird in einem speziellen Verfahren so auf die Rohfolie aufgetragen, dass gelegentliche Spannungsspitzen in der Netzspannung keinen Ausfall des Kondensators hervorrufen. Mögliche Durchschläge im Dielektrikum werden durch den Selbsteheilungsprozess automatisch isoliert, sodass der Kondensator ohne Unterbrechung weiter betrieben werden kann. Der bei einem solchen Selbsteheilungsprozess entstehende Kapazitätsverlust ist so gering, dass er auch mit Präzisionsmessgeräten nicht feststellbar ist. In der praktischen Anwendung wird er deshalb nicht bemerkt.

Der Selbsteheilungsprozess stößt an seine Grenzen, wenn die Spannungsspitzen einen so großen Energiegehalt haben, dass ein Durchschlag durch eine Vielzahl von Folienlagen und an vielen Stellen gleichzeitig auftritt. Dies ruft eine starke lokale Temperaturerhöhung im Kondensatorwickel hervor, die wiederum für eine Belastung des Dielektrikums sorgt, sodass im Extremfall eine Zerstörung des Kondensators eingeleitet wird. Um diesen Effekt zu vermeiden, wurde die bei anderen Kondensator-Anwendungen bekannte Technologie des segmentierten Kondensatorfilms für den Einsatz in der Produktion von Leistungskondensatoren weiterentwickelt.



**Bild 2.** Zusammenhang von Lebenserwartung der Kondensatoren und Umgebungstemperatur



**Bild 3.** Der Spezialfilm ist so aufgebaut, dass die gesamte metallisierte Fläche des Kondensatorbelags in eine Vielzahl von Einzelflächen aufgeteilt ist und jede Einzelfläche über Sicherungsstege mit dem elektrischen Anschluss des Kondensatorwickels verbunden ist

Dieser Spezialfilm ist so aufgebaut, dass die gesamte metallisierte Fläche des Kondensatorbelags in eine Vielzahl von Einzelflächen aufgeteilt ist und jede Einzelfläche über Sicherungsstege mit dem elektrischen Anschluss des Kondensatorwickels verbunden ist (Bild 3). Diese Stege übernehmen die Funktion ähnlich einer Schmelzsicherung, in dem sie Einzelflächen bei lo-

schalten dafür zu sorgen, dass in solchen Fällen der Kondensator seine Umgebung nicht schädigt. Das Überdruck-Abschaltssystem basiert auf einem gebördelten Membrandeckel, einem Rückhaltesystem für die Kondensatorwickel und patentierten Schaltdrähten mit definierten Sollbruchstellen, mit denen die innere Verschaltung des Kondensators ausgeführt wird.



**Bild 4.** Die Anschlusseinheit bietet einen geringen Übergangswiderstand und einen dauerhaften festen elektrischen und mechanischen Kontakt

Zum sicheren Betrieb des Abschaltsystems ist es erforderlich, dass Gase, die bei einer Zerstörung des Dielektrikums entstehen, möglichst schnell und ungehindert an den Membrandeckel gelangen. Gelee- oder gallertartigen Kondensatorfüllmittel sind für diese Aufgabe wenig geeignet. Auch eine Gasfüllung des Kondensators ist nicht vorteilhaft, da sich ein ausreichender Überdruck zur sicheren Betätigung des Abschalters erst bei fortgeschrittener Zerstörung des Kondensatorwickels aufbauen kann.

Die Funktion der Überdruck-Abschalt-sicherung wird in regelmäßigen Stichprobenprüfungen aus der laufenden Fertigung überprüft. Die Prüfungen werden auf der Basis der in DIN EN 60831-2 (VDE 0560-47):1997-09 [2] formulierten Zerstörungsprüfung durchgeführt.

kaler Überlastung vom Netz trennen. Diese zusätzliche Sicherheitseinrichtung erhöht die Betriebssicherheit eines Kondensators signifikant. Auch bei hoher Qualität wird es einzelne Kondensatoren geben, die unerwartet ausfallen. Ziel der Konstruktion ist es deshalb, durch rechtzeitiges Ab-

## Kondensator-Anschlusseinheit

Besondere Beachtung bei Leistungskondensatoren verdient die Anschlussmöglichkeit für die Zuleitung. Die Zuleitungen selbst dürfen den mechanischen Weg, den die Überdruck-Abreißsicherung erfordert, nicht behindern. Der elektrische Kontakt selbst muss einen geringen Übergangswiderstand und einen dauerhaft verlässlichen, festen elektrischen und mechanischen Kontakt bieten. Wünschenswert sind aus wirtschaftlichen Gründen eine möglichst kurze Arbeitszeit für das Kontaktieren der Zuleitungen und der Verzicht auf die Prüfung von Anzugsdrehmomenten. Alle diese Bedingungen erfüllt das Anschlussstück mit Federklemmtechnik über die ganze Betriebszeit des Kondensators (Bild 4). Ein weiterer Vorteil ist die berührungssichere Abdeckung aller Spannungsführender Teile des Kondensators und seiner fest angebauten Entladewiderstände.

## Fazit

Die in der DIN EN 60831 [1, 2] beschriebenen Standards sind eine Mindestvorgabe für einen Hersteller von Leistungskondensatoren. Darüber hinaus sind eine Überwachung des Fertigungsprozesses, regelmäßige Stichproben und eine Aufzeichnung und Auswertung aller Meldungen aus dem Feld für eine hohe Produktqualität erforderlich.

## Literatur

- [1] DIN EN 60831-1 (VDE 0560-46):2003-08 Selbstheilende Leistungs-Parallelkondensatoren für Wechselstromanlagen mit einer Nennspannung bis 1 kV - Teil 1: Allgemeines - Leistungsanforderungen, Prüfung und Bemessung - Sicherheitsanforderungen - Anleitung für Errichtung und Betrieb. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [2] DIN EN 60831-2 (VDE 0560-47):1997-09 Selbstheilende Leistungs-Parallelkondensatoren für Wechselstromanlagen mit einer Nennspannung bis 1 kV - Teil 2: Alterungsprüfung, Selbstheilprüfung und Zerstörungsprüfung. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [3] DIN EN 60252-1 (VDE 0560-8):2002-05 Motorkondensatoren. Allgemeines - Leistung, Prüfung und Bemessung - Sicherheitsanforderungen - Leitfaden für die Installation und den Betrieb. Berlin · Offenbach: VDE VERLAG
- [4] FRAKO Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH, Teningen: www.frako.de
- [5] ZVEI: „Allgemeine Sicherheitshinweise Starkstromkondensatoren“ Stand März 2008, www.zvei.de



- // Komplette Systemlösung aus einer Hand
- // Energie-Informations-Systeme zur Kostensenkung
- // Optimierung von Energiekosten durch Analyse und Dokumentation des Energieverbrauchs, Lastbegrenzung und Überwachung des Versorgungsnetzes
- // Power Quality „Aktive Oberschwingungs-Filter“ zur Verbesserung der Netzqualität
- // Blindleistungs-Kompensation zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen



*FRAKO senkt  
Ihre Energiekosten!*



Kondensatoren- und Anlagenbau GmbH

Tscheulinstr. 21a · 79331 Teningen · Germany  
Tel. +49-7641-453-0 · Fax +49-7641-453-535  
<http://www.frako.de> · E-Mail: [info@frako.de](mailto:info@frako.de)