HF-Filterung sehr hoher Ströme mit Durchführungskondensatoren

Die Filterung von Versorgungs- oder Datenleitungen dient dazu, einer Elektronik in einem HF-dichten Gehäuse eine „saubere" Versorgungsspannung bzw. ein störungsfreies Datensignal anzubieten.

Das funktioniert nach folgendem Prinzip: Hochfrequente leitungsgebundene Störspannungen werden von einem Filterelement (Durchführungskondensator) nach Masse abgeleitet. Es entsteht Verlustleistung, und das Bauteil erwärmt sich. Bei Anwendungen mit sehr hohen Versorgungsströmen (über 30 A) kann sich der Durchführungskondensator, bedingt durch interne Übergangswiderstände, noch zusätzlich weiter erwärmen. Es ist wichtig, diese Erwärmung zu dimensionieren und zu kontrollieren, damit der Durchführungskondensator nicht beschädigt oder zerstört wird.

Grundsätzliches

Verlustleistung und Temperaturanstieg - das sind die wichtigsten Parameter zur richtigen Auslegung von Hochstrom-Durchführungskondensatoren

Hochstrom - Hochfrequenzfilterung?

Charakteristisch für die effektive Filterung hoher Ströme bei hohen Frequenzen sind:

George M. Kauffman
PE Vice President of Engineering
NexTek, Inc., Westford, Mass
Bearbeitet und übersetzt von
Dipl.Ing. Erich Thomich
ELECTRADE GmbH
Gräfelfing

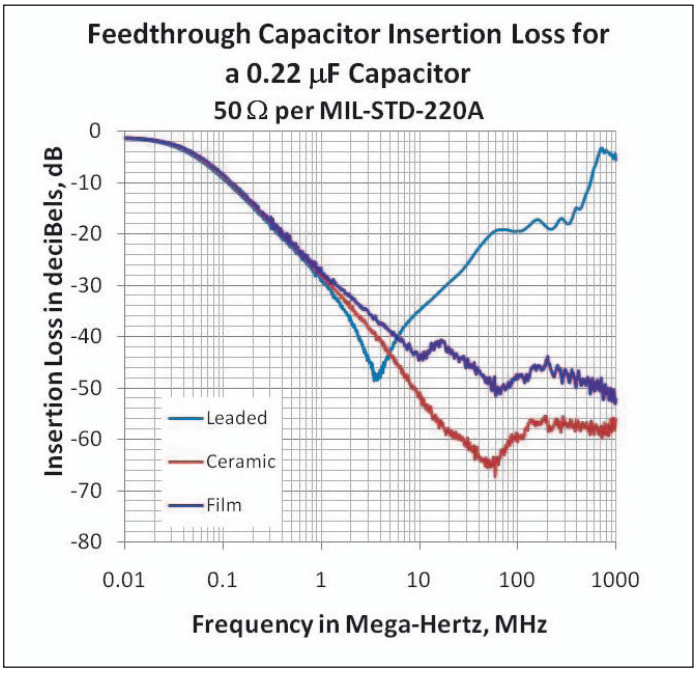

Bild 1: Vergleich von Kondensatoren für Filteranwendungen

- Geforderte Einfügungsdämpfung >30 dB
- Frequenzbereich bis 1 GHz
- Stromstärke >30 A

Die Dimensionierung des Filterelements - hier des Durchführungskondensators - beginnt mit zunächst einer Analyse der zu erwartenden Störfrequenzen. Darauf basierend wird die Kapazität des Filterelements passend zu den Stromstärken und Spannungen im System ausgewählt. Ziel dabei ist, den Pegel der Störsignale auf einen akzeptablen Wert zu beschränken. Da Durchführungskondensatoren erst oberhalb von 1 MHz ihre beste Wirkung zeigen, können in manchen Fällen zusätzliche diskrete Bauelemente die Einfügungsdämpfung bei niedrigeren Frequenzen verbessern.

Arten von Kondensatoren

Die Filterwirkung eines Durchführungskondensators, verglichen mit einem diskreten oder bedrahteten Kondensator, zeigt Bild 1. Wenn gute Filterwirkung oberhalb von 10 MHz gefragt ist, können Durchführungskondensatoren leicht Einfügungsdämpfungen von über 40 dB bereitstellen.

Der bedrahtete Kondensator kann bis ca. 3 MHz mit der Dämpfung mithalten, darüber nimmt diese jedoch dramatisch ab (Blaue Kurve - Leaded). Beste Dämpfungsergebnisse bis weit über 1 GHz werden mit keramischen Durchführungskondensatoren erzielt. Gewickelte Durchführungskondensatoren (Filmkondensator, metallisiert oder Folie) zeigen dagegen gern mal eine Delle in der Dämpfungskurve (Film - Lila Kurve, bei ca. 17 MHz) - der Grund dafür sind interne Resonanzeffekte. Diese Delle ist umso ausgeprägter, je höher die Kapazität des Kondensators ist. Das Defizit in der Filterwirkung eines Filmkondensators kann im Bereich der Delle bei über 30 dB liegen. Ein Keramikkondensator jedoch (Rote Kurve) wird bis in den Bereich sehr hoher Frequenzen seine Dämpfungseigenschaften erhöhen, bzw. beibehalten. Deswegen verwendet NexTek ausschließlich Keramik-Durchführungskondensatoren.

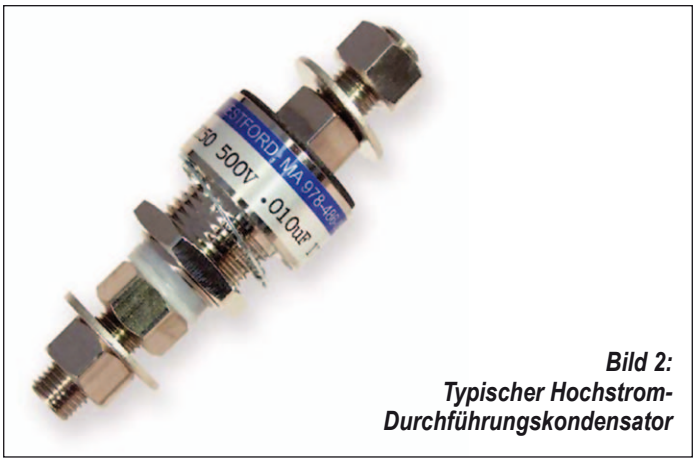

Bild 2: Typischer Hochstrom-Durchführungskondensator

Eigenschaften von Keramik-Durchführungskondensatoren

Durchführungskondensatoren enthalten keine nennenswerten internen Induktivitäten, die unter Umständen zu Sättigungseffekten beitragen könnten. Die Höhe des durch den Durchführungskondensator fließenden Stroms beeinflusst deshalb auch die Filterwirkung praktisch nicht. Neben dem Thema Einfügungsdämpfung gibt es weitere Gesichtspunkte, die Hochstrom- von Anwendungen mit niedrigen Strömen unterscheiden:

Hohe Ströme, also sowohl Durchfluss- als auch Ableit-

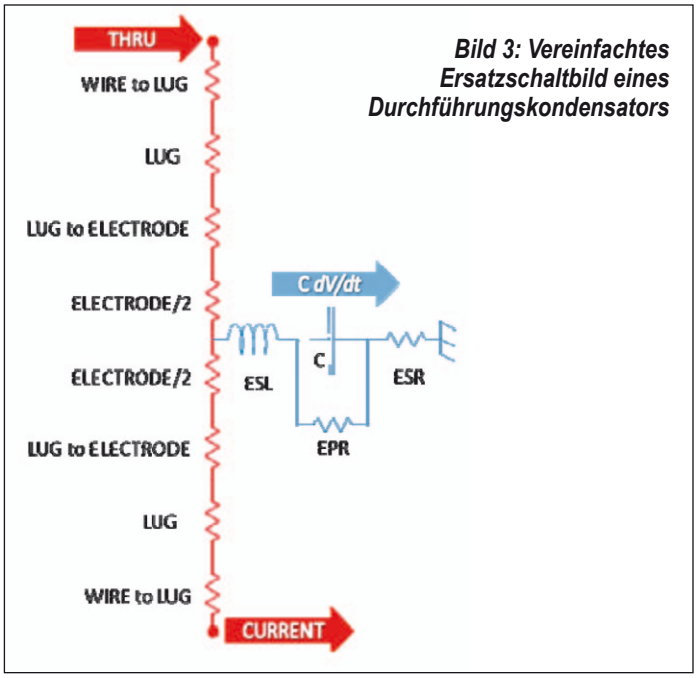

Bild 3: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Durchführungskondensators

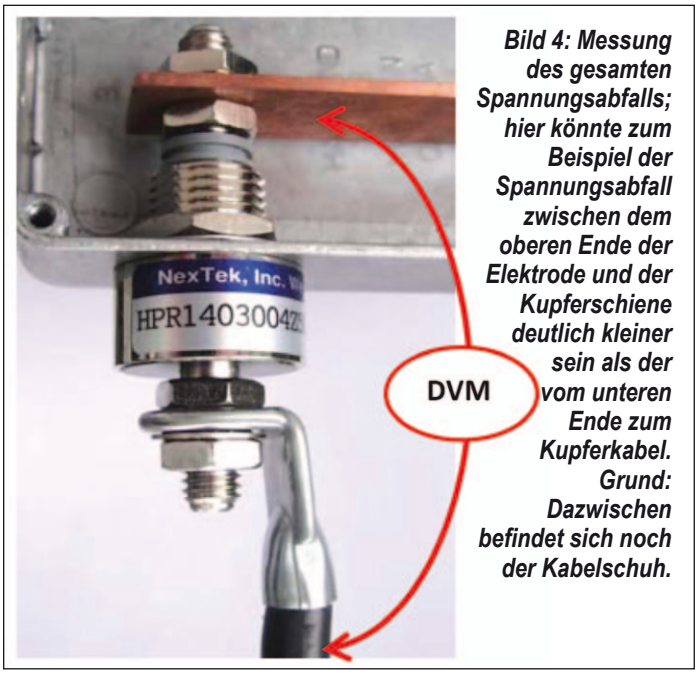

Bild 4: Messung des gesamten Spannungsabfalls; hier könnte zum Beispiel der Spannungsabfall zwischen dem oberen Ende der Elektrode und der Kupferschiene deutlich kleiner sein als der vom unteren Ende zum Kupferkabel. Grund: Dazwischen befindet sich noch der Kabelschuh.

strom, stressen das Filterelement gewaltig. Sie erzeugen Verlustleistungen, die zur Erwärmung des Durchführungskondensators führen. Wenn dessen Temperatur extrem ansteigt, kann dies zur Fehlfunktion oder gar zum Totalausfall führen. Deswegen wollen wir hier auch zu den Geheimnissen des Temperaturmanagements von Hochstrom-Durchführungskondensatoren vordringen.

Ersatzschaltbild Durchführungskondensator

Ein vereinfachtes aber hilfreiches Ersatzschaltbild eines Durchführungskondensators zeigt Bild 3. Der Hauptstrom fließt durch die diversen Widerstände, die entlang des roten vertikalen Strangs eingezeichnet sind. Es sind hier übrigens auch die Widerstände der Anschlussleitungen und Verbindungselemente berücksichtigt. Der Widerstand der durchgehenden Elektrode ist hier in zwei Hälften (Electrode/2) aufgeteilt, da der Keramikkondensator normalerweise mittig auf der durchgehenden Leitung angebracht ist.

Der Durchgangsstrom ist abhängig von der Stromquelle und der Lastimpedanz. Der Durchgangsstrom kann beliebiger Art sein, nur DC, Wechselspannung einer bestimmten Frequenz - oder irgend eine beliebige komplexe Wellenform. Das Ersatzschaltbild des filternden Kondensators ist blau eingezeichnet, „C“ ist der Kapazitätswert. Es ist auch eine Ersatz-Serieninduktivität (ESL) vorhanden. Diese ist übrigens auch für die fallende Einfügungsdämpfung bei bedrahteten Kondensatoren im Bereich höherer Frequenzen verantwortlich. In einem Durchführungskondensator ist die ESL allerdings ziemlich vernachlässigbar, bedingt durch die Geometrie der Konstruktion und einfach weil keine Anschlussdrähte da sind.

Einen Ersatz-Serienwiderstand (ESR) gibt es auch - er ist üblicherweise eine Funktion der Frequenz des Durchgangsstroms. Der ESR wird hauptsächlich von den Materialeigenschaften des Dielektrikums und der leitenden Oberflächen bestimmt. Schließlich gibt es noch den Ersatz-Parallelwiderstand (EPR), der den Leckstrom oder Isolationswiderstand beeinflusst. Er hat aber normalerweise keinen Einfluss auf die Wirksamkeit der Filterung. Der Leckstrom von der Elektrode über den Kondensator nach Masse hängt in erster Linie von den Eigenschaften der angelegten Spannung ab. Bei Betrieb mit Wechselspannung muss die Höhe des Leckstroms auch aus Sicherheitsgründen sehr genau beobachtet werden. Dasselbe gilt für die Rest-Welligkeit im Gleichstrombetrieb.

Verlustleistung des Durchgangsstroms

Der Durchgangsstrom verursacht einen Spannungsabfall über die durchgehende Elektrode und damit eine Verlustleistung. Die durchgehende Elektrode wird durch die diversen vertikal angeordneten Widerstände in Bild 3 dargestellt. In Durchführungskondensatoren mit Nennströmen von 50 A und mehr spielt der Durchgangswiderstand eine große Rolle bei der Generierung der Verlustleistung. Tabelle 1 zeigt die Verlustleistungen für drei Durchführungskondensatoren mit unterschiedlichem Nennstrom. Der Durchgangswiderstand der durchgehenden Elektrode wird etwa 10 mOhm beim 30-A-Durchführungskondensator betragen. Bei der 400-A-Version dürfen 100 µOhm jedoch nicht überschritten werden, um die Erwärmung im Zaum zu halten.

Man sieht dabei auch, dass eine Streuung des Widerstands der durchgehenden Elektrode (von 100 µOhm bis zu 8.000 µOhm) bei einem 30-A-Durchführungskondensator nicht sonderlich kritisch wäre. Die gleiche Bandbreite könnte jedoch für die 400-A-Version wegen der (bei 8.000 µOhm) fast 10-fachen Verlustleistung das rauchende Ende bedeuten.

Es ist also erstes Ziel für jede Hochstrom-Installation, den Spannungsabfall am und über den Durchführungskondensator zu minimieren. Hier sind speziell die Zuleitungen, Kabelschuhe und sonstige verbundene Teile kritisch zu betrachten. Natürlich muss auf korrekte Verbindung geachtet werden. Die Spannungsabfälle über die Anschlüsse sind meist höher als die über die durchgehende Elektrode. Der Einfluss schlechter elektrischer Verbindungen auf

Nennstrom	Durchgangswiderstand	Verlustleistung
30 A	8.000 µOhm	7,2 W
100 A	1.000 µOhm	10 W
400 A	100 µOhm	16 W

Tabelle 1: Durchgangswiderstand und Verlustleistung für typische Durchführungskondensatoren

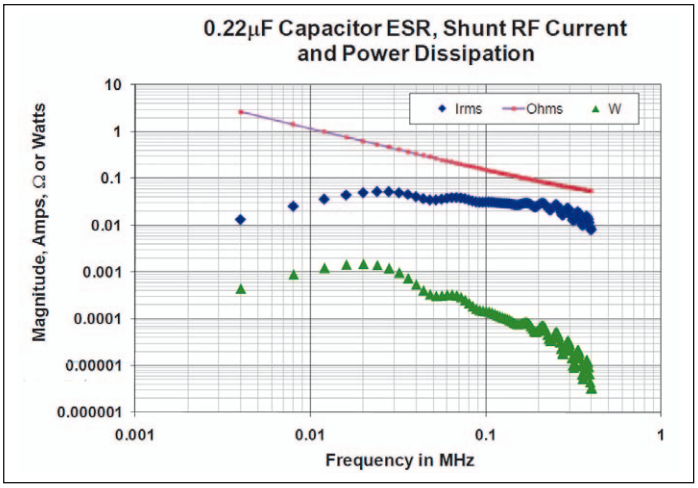

Bild 5: Ersatz-Serienwiderstand (ESR) eines typischen Keramikkondensators mit 22 nF (magentafarbene Kurve)

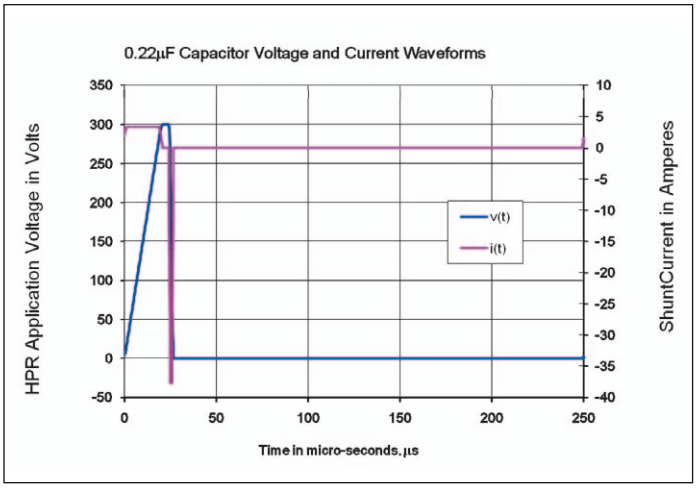

Bild 6: Angelegte Spannung und Ableitstrom

Verlustleistung und damit Temperaturerhöhung ist extrem hoch.

Da ein Durchführungskondensator über eine sehr geringe Serieninduktivität verfügt, kann die zu erwartende Verlustleistung (in Watt) einfach aus dem Produkt von Spannungsabfall und Strom berechnet werden. Den Durchgangsstrom kann man mit herkömmlichen Mitteln messen, aber kontaktlose Stromwandler oder Halleffekt-Sonden sind besser geeignet. Die besten Messpunkte, um den Spannungsabfall zu messen, zeigt Bild 4. Hier werde alle Serienwiderstände (gemäß Bild 3) erfasst. Manchmal ist es sogar notwendig, die Isolation des Kabels zu durchstechen, um einen Kontakt mit dem Kabel in der Nähe des Kabelschuhs herzustellen.

Um die zu erwartende Verlustleistung abzuschätzen ist es nicht zwingend notwendig, alle Längswiderstände in Bild 3 zu kennen. Wenn man jedoch gerade auf der Suche nach einem Konstruktions- oder Fertigungsfehler ist, kann es sehr sinnvoll sein, die elektrischen Anschlüsse auf beiden Seiten des Durchführungskondensators unter die Lupe zu nehmen.

Die Messung des Spannungsabfalls bei Hochstrominstallationen sollte immer die Kontrolle folgender Parameter beinhalten:

- Güte der leitenden Oberflächen (Oxidation, Korrosion)
- Anzugsdrehmomente
- Qualität der Kabelschuhe und deren Anschlag an das Kabel
- Oberflächenbehandlung / Überzüge.

Die Messung des Spannungsabfalls kann aber auch von vorhandenen hochfrequenten Störspannungen beeinflusst werden. In Fällen, wo die Versorgungsspannung durch ein elektrisch verseuchtes Umfeld läuft, mag es sinnvoll sein, den Durchgangsstrom nicht als Gleich- sondern als Wechselstrom (Effektivwert) zu messen. Dazu wird „sauberer“ 50- oder 60-Hz-Wechselstrom angelegt und so der Spannungsabfall mit weniger Ungenauigkeit gemessen. Dieselbe Methode nützt auch, wenn der Spannungsabfall über den Durchführungskondensator in der realen Installation den Messbereich des Messgeräts überschreitet. Dabei ist immer ein Auge auf die entsprechenden Sicherheitsrichtlinien zu werfen. Außerdem muss auf die Spannungen und Strömen geachtet werden.

Verlustleistung durch den hochfrequenten Ableitstrom

Der Ableit- oder Bypass-Strom ist der Strom, der über den Filterkondensator nach Masse fließt. Er hängt ab von der Kurvenform der Spannung am durchgehenden Leiter und der Kapazität des Kondensators.

Beispiel:

Eine Spannung von 100 V_{eff} mit einer Frequenz von 100 kHz wird an einen Kondensator mit einer Kapazität von 220 nF angelegt. In diesem Fall hat der Kondensator eine Impedanz von ca. 72,3 Ohm. Der daraus resultierende Ableitstrom wird ca. I = 1,38 A betragen.

Der ESR wird mit steigender Frequenz immer niedriger. Nachdem er ein Minimum erreicht hat, wird er bei Frequenzen über 10 MHz wieder ansteigen. Bei 100 kHz beträgt der ESR des Kondensators ca. 0,12 Ohm. Daraus resultiert eine Verlustleistung (I2 x ESR) von ca. 1,9 W. Große Durchführungskondensatoren können leicht mehrere Ampere Ableitstrom verkraften. Wenn die Kurvenform der Spannung recht komplex ist, muss man auch die harmonischen Oberwellen betrachten. Denn auch diese tragen zur Verlustleistung gemäß I^2 x ESR bei. Die Verlustleistungen der Harmonischen müssen summiert werden, um sicherzustellen, dass der Kondensator nicht überlastet wird.

Ein Beispiel dazu zeigt Bild 6: Der 220-nF-Kondensator wird mit einer trapezförmigen Spannung belastet.

Diese hat eine Anstiegszeit von 20 µs bis zu 300 V, eine Haltezeit von 5 µs und fällt in 1 µs wieder auf 0 V ab. Die Periodendauer ist dabei 250 µs, was einer Wiederholfrequenz von 4 kHz entspricht. Das ist die blaue Kurve in Bild 6.

Der Ableitstrom wird wie folgt berechnet:

I = C dv/dt

Er wird durch die magentafarbene Kurve in Bild 6 dargestellt und beträgt ca. 3,3 A während des Spannungsanstiegs bzw. ca. -38 A während des Spannungsabfalls. Die durchschnittlich Stromstärke liegt hier bei 1,13 A, der Effektivwert davon bei 3,0 A. Der Scheitelfaktor in diesem Beispiel ist mit 12,5 recht hoch, was auf das Vorhandensein eines hohen Oberwellenanteils hinweist. Der Verlauf des Ableitstroms im Zeitbereich kann mittels FFT (Schnelle Fourier-Transformation) in den Frequenzbereich transformiert werden.

Die Ströme der Oberwellen verursachen ebenfalls Verlustleistungen - wegen des Ersatz-Serienwiderstands (ESR).

Die Verlustleistung (P) jeder Oberwelle kann mit $P = ESR_{(freq)} \times I_{(freq)}^2$ berechnet werden. Dazu sind die grünen Datenpunkte in Bild 6 zu beachten. Diese Verlustleistungen aufsummiert und geplottet zeigt Bild 7. Es zeigt, dass die größten Anteile im Frequenzbereich unter 100 kHz liegen. Die Verlustleistung nähert

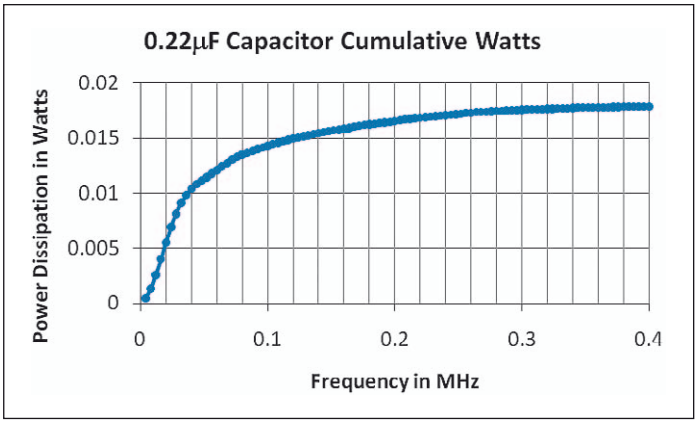

Bild 7: Kumulierte Verlustleistungen

sich asymptotisch der 20-mW-Linie, bleibt aber darunter. Eine Verlustleistung von 20 mW ist für einen großen Durchführungskondensator vernachlässigbar.

Diese Beispiele sind recht hilfreich, wenn man Prinzip und Funktionsweise von Filteranwendungen verstehen will. Änderungen der Werte des ESR und der Kurvenform der Spannung können große Auswirkungen haben. Deshalb sollten berechnete Werte immer in der Praxis getestet werden. Speziell dann, wenn das Design an die Belastungsgrenze der Filterelemente geht. Der Ableitstrom ist eine Funktion der Kurvenform der anliegenden Spannung, die Impedanz des Kondensators sinkt mit höherer Frequenz. Daraus folgt, dass die Ableitströme immer höherfrequenter sind als der Strom, der den durchgehenden Leiter durchfließt.

Temperaturerhöhung

Bei moderater effektiver Luftkühlung und einer Befestigung an massivem Metall wird ein Durchführungskondensator isothermisch sein, das heißt, an jeder Stelle so ziemlich die gleiche Temperatur haben. Wir haben das getestet und Temperaturabweichungen von nur ein bis zwei °C gemessen. Demnach kann man die durch Verlustleistung verursachte Erwärmung als eine einzige Größe ansehen. NexTeks Test haben aber auch ergeben, dass es sinnvoll ist, beim Thema Erwärmung herkömmliche lineare Modelle zu vermeiden. Bei vielen Bauteilen kann mit einem linearen "θ" oder einem Modell für den Verlustleistungsfaktor den Zusammenhang zwischen Erwärmung und Verlustleistung darstellen. Lineare Modelle sind auch anwendbar, wenn Baugruppen zwangsgekühlt sind.

Im Gegensatz dazu ist der thermische Widerstand eines Hochstrom-Durchführungskondensators ganz stark von Wärmeleitungseffekten, auf natürlicher Konvektion basierend, abhängig. Und hier ist der Zusammenhang zwischen Verlustleistung und Erwärmung eben nicht linear. Für natürliche Konvektion gibt es ein einfaches, aber dennoch einigermaßen genaues Modell, das wir empfehlen und nachfolgend beschreiben. Der Temperaturanstieg - verursacht durch die Verlustleistung - für einen durch freie Konvektion gekühlten Durchführungskondensator kann nach folgender Formel berechnet werden:

Delta T = C_1 x $P^{(C2)}$

C_1 ist dabei eine empirische Konstante und C_2 eine empirische Leistungskonstante. Für eines unserer NexTek-400-A-Filter liegt C_1 typischerweise zwischen 2,0 und 3,0, C_2 zwischen 0,80 und 0,85. P ist die gesamte Verlustleistung eines Durchführungskondensators inklusive aller elektrischer Anschlüsse. Der Wert von C_1 hängt ab von der Kühlwirkung der Befestigungsfläche des Durchführungskondensators, der Größe und Oberfläche der Kabelschuhe, der Leitungen oder Stromschienen. Die Messung des Spannungsabfalls über die gesamte Filteranordnung ist die beste Methode zur Beurteilung der Qualität des Durchführungskondensators und seines Einbaus.

Zusammenfassung

a) Hochstrom-Durchführungskondensatoren sind kompakte und preiswerte Elemente zur Eliminierung hochfrequenter leitungsgebundener Störungen - speziell über 10 MHz. Angenehmerweise ist die Filterwirkung dabei unabhängig von der Höhe des durchfließenden Stroms.

b) Applikationen mit Strömen über 100 A erfordern besondere Sorgfalt beim elektrischen Anschluss des Durchführungskondensators. Hier gilt es, Übergangswiderstände und damit Spannungsabfälle, die wiederum zu Verlustleistung führen, zu vermeiden, denn Verlustleistung führt zur Erwärmung.

c) Zusätzlich können noch die Betriebsspannung simuliert und gemessen werden, um den zu erwartenden Ableitstrom und die damit verbundene Verlustleistung abschätzen zu können.

d) Wenn b) und c) kombiniert werden, kann man die Erwärmung des Durchführungskondensators gut bestimmen.

e) Messung und Kontrolle der gesamten Verlustleistung ist die beste Methode, einen Hochstrom-Durchführungskondensator inklusive seiner Anschlüsse zu beurteilen.

Kurztips zum Anschluss

- Messen Sie den Spannungsabfall von Anschlussleitung zu Anschlussleitung bei hoher Last und maximalem Strom.
- Nur das ergibt eine Aussage über den Kondensator und die Qualität der elektrischen Verbindungen. Messungen ohne Last per Ohmmeter bringen keine vernünftige Ergebnisse.
- Messen oder simulieren Sie die angelegte Spannung. Damit können Sie den Ableitstrom durch den Kondensator und die damit verbundene Erwärmung vorhersagen.
- Messen oder berechnen Sie die Temperatur der durchgehenden Elektrode unter Berücksichtigung des Kurvenverlaufs der anliegenden Spannung. Achtung, Oberwellen!
- Und als Qualitätskriterium: Definieren Sie den maximal akzeptablen Spannungsabfall über die gesamte Installation.