



TITELSTORY

Elektrolytkondensatoren werden routinemäßig in die Kategorie „passive Bauelemente“ eingeordnet. Die Spezifizierung ist bei Allzweck-Kondensatoren für den Konsumentenbereich meist relativ einfach. Bei industriellen Anwendungen, die einen höher spezifizierten, langlebigen Kondensator erfordern, ist der Auswahlprozess jedoch komplexer und es muss auf diverse Parameter in der Anwendung geachtet werden.

Richtig spezifizierte Elektrolytkondensatoren können in anspruchsvollen Industrieanwendungen eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren erreichen. Dieser Beitrag erklärt den Aufbau eines Elektrolytkondensators und seine Betriebseigenschaften.

Elektrolytkondensatoren – Grundlagen und Eigenschaften

Elektrolytkondensatoren bieten eine höhere Kapazität als andere Kondensatortechnologien gleicher Größe. Dieser Beitrag erklärt den Aufbau eines Elektrolytkondensators und seine Betriebseigenschaften.

FALKO LADIGES UND CHRISTOPHER SPENCE *

Elektrolytkondensatoren werden routinemäßig in die Kategorie „Passive Bauelemente“ eingeordnet. Die Spezifizierung ist bei Allzweck-Kondensatoren für den Konsumentenbereich meist relativ einfach. Bei industriellen Anwendungen, die einen höher spezifizierten, langlebigen Kondensator erfordern, ist der Auswahlprozess jedoch komplexer und es muss auf diverse Parameter in der Anwendung geachtet werden.

Das Grundprinzip eines Kondensators

Ein Kondensator besteht aus zwei Metallplatten, die durch ein Dielektrikum getrennt sind. Die Oberflächenbereiche der Metallplatten, das Dielektrikum und der Spalt zwischen den Platten bestimmen die Charakteristik des Kondensators.

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

ϵ_0 ist dabei die Permittivität des freien Raumes ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m) und ϵ_r die Permittivität des Dielektrikums (Oxid, Papier, Elektrolyt).

Das ist die Theorie. In der Praxis sind die Metallplatten Aluminiumfolie und das Dielektrikum ist eine Oxidschicht auf der Anode. Die Kathodenfolie liegt zwischen den mit Elektrolyt getränkten Papierlagen und dient quasi als Abschlussplatte. Die Folien und Papiere werden aufgerollt in einen Zylinder gesteckt, um das Volumen zu minimieren. Verbindungslaschen verbinden die Wicklung mit den Klemmen, die an der Deckplatte des Kondensators montiert sind.



* Falko Ladiges

... ist Teamleader PEMCO bei der WDI AG.



* Christopher Spence

... ist Produktmanager bei Itelcond SRL.



Bild: © wattanaphob – stock.adobe.com

Die meisten Elektrolytkondensatoren sind polarisiert. Es gibt aber auch besondere Situationen, in denen sich nicht polarisierte Elektrolyte finden, z.B. bei Motorstartanwendungen.

Herstellung und Aufbau von Elektrolytkondensatoren

Aluminiumfolie wird für die Anode und Kathode verwendet. Die Anodenfolie ist ein wichtiger Bestandteil eines Elektrolytkondensators in Bezug auf die Leistung und macht meist mehr als 75% der Gesamtkosten des Kondensators aus. Die Folie wird gemessen an ihrer Kapazitätsmenge pro Fläche und der Oxidbildungsspannung. Um die Oberfläche zu vergrößern, wird die Folie geätzt, um Tunnel zu bilden. Dieser Prozess dient der Bestimmung der Stärke der Folie. Die Basisfolie besteht aus 99,9% Aluminium und ist typischerweise 100 µm dick. Die Tunnelätzung erfolgt durch einen elektrochemischen Prozess, die Tunneldurchmesser betragen typischerweise 1 bis 2 µm und haben eine Länge von 50 µm. Die Tunneldichte

beträgt dann 25 Mio. pro cm² und die Oberfläche der geätzten Folie ist ca. 100-mal größer als die einer glatten Folie.

Nach dem Ätzen der Anodenfolie wird diese dann „geformt“, indem eine porenfreie Aluminiumoxidschicht auf der Oberfläche der geätzten Folie aufgebracht wird. Diese Oxidschicht ist das Dielektrikum des Kondensators. Die Oxidschicht wird durch eine angelegte Spannung aufgetragen und die Oxiddicke ist proportional zur Formationsspannung. Die Kapazität ist umgekehrt proportional zur Oxiddicke.

Mit anderen Worten, je höher die Formationsspannung, desto geringer ist die Kapazität pro Fläche. Für den Kondensator bedeutet dies für relativ große Kapazitätswerte niedrigere Spannungen und ein Verringern der Kapazität bei höher werdenden Spannungen. Die Oxidcharakteristik von Aluminium ist polaritätsempfindlich und daher führt die Polarität bei umgekehrter Spannung normalerweise zu einem katastrophalen Ausfall.

Papierschichten trennen die Anoden- und Kathodenfolie. Das Papier wird verwendet,

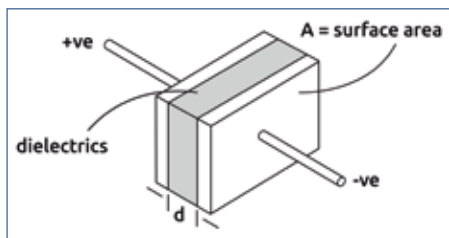


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines Kondensators.

um den Elektrolyten zu halten und so Spannungsabfälle zu vermeiden. Die Papiere wirken sich auch auf den ESR (Effektiver Serienwiderstand) aus. Je höher die Spannung, desto robuster müssen die Papiere sein, und so steigt der ESR. Deshalb sind die ESR-Parameter bei Elektrolytkondensatoren mit höherer Nennspannung höher.

Die Wicklung ist mit dem Elektrolyten imprägniert. Dieser hat einen neutralen pH-Wert, eine hohe Leitfähigkeit und ist bei hohen Temperaturen stabil. In Verbindung mit den Trennpapieren weist der Elektrolyt eine hohe Szintillationsspannung auf. Die Szintillation ist der Vorläufer des Spannungsabfalls zwischen Anoden- und Kathodenfolie. Der Elektrolyt hat die Fähigkeit, Oxid zu bilden (um den Ableitstrom zu reduzieren) und ist schwer entflammbar. Hochspannungselektrolyte sind in der Regel viskoser als Niederspannungselektrolyte. Um den Imprägnierungsprozess zu unterstützen, wird eine zusätzliche Papierlage hinzugefügt, die sehr saugfähig ist und als Docht für den viskosen Elektrolyten dient. Diese zusätzliche Papierlage erhöht jedoch nochmals den ESR-Wert. Nachdem die Wicklung mit dem Elektrolyten imprägniert wurde, wird sie in einen Aluminiumbecher eingeführt und die Deckplatte mit einer Gummidichtung abgedichtet.

Bei Itecond liegt der Fokus der F&E-Arbeit auf der Elektrolytentwicklung. Die Interaktion des Elektrolyten mit den Papieren und der Anodenfolie ist ein intensives Studiengebiet, sodass Itecond über Verbindungen zu verschiedenen Forschungsuniversitäten, Innovationsgruppen und F&E-Zentren in Italien und Japan verfügt.

Der Alterungsprozess bei Elektrolytkondensatoren

Sobald der Kondensator in seinem Gehäuse montiert und die Deckplatte abgedichtet ist, durchläuft der Kondensator einen künstlichen Alterungsprozess. Das Altern geschieht durch kontrolliertes Anlegen von Spannung, Strom und Temperatur und kann je nach Kondensatorgröße zwischen einer und 20 Stunden dauern. Die Alterung ist

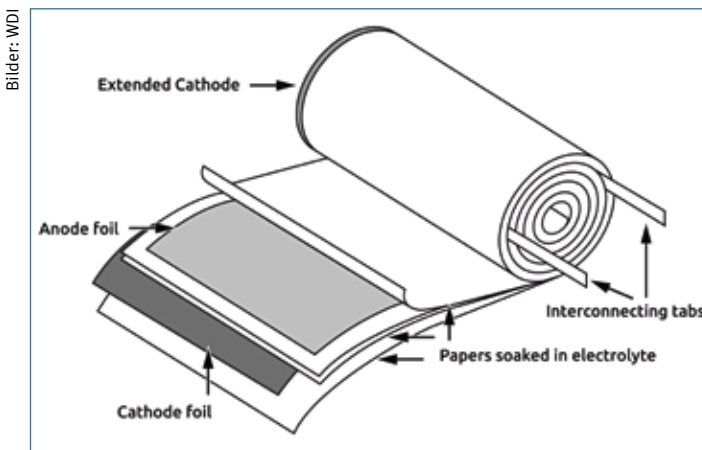


Bild 2: Innerer Aufbau eines Elektrolytkondensators.

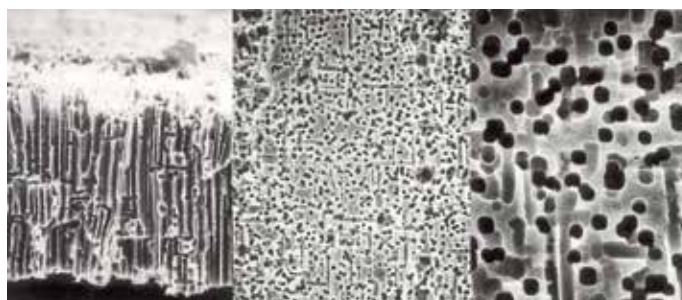


Bild 3: Geätzte Aluminiumfolie.

wichtig, um kleine Schäden als Folge der Fertigung in der Oxidschicht auf der Anodenfolie zu „heilen“. Weitere Fertigungseffekte zeigen sich an den Schnittkanten der Folie, an den Verbindungspunkten der Laschen und an der Unterseite der Klemmen. Der Alterungsprozess bringt den Ableitstrom, auch Leckstrom genannt, auf ein bestimmtes Niveau. In einer idealen Welt würde kein Strom durch einen Kondensator fließen, doch in der Praxis fließt ein Ableitstrom und der Alterungsprozess minimiert diesen auf einen bestimmten Level.

Dieser Level gibt einen akzeptablen Wert des Leckstroms an, damit der Kondensator in einer Anwendung korrekt funktioniert. Der Ableitstrom verringert sich im Laufe der Zeit weiter auf ein Niveau, das nur noch einen Bruchteil des angegebenen Wertes ausmacht. Bei einem großen Schraubklemmenkondensator kann die Absenkung in einer Anwendung bis zu mehrere hundert Betriebsstunden betragen. Nach der Alterung wird jeder Kondensator auf seine Überein-

stimmung mit den Spezifikationen getestet und danach mit einem Isoliermaterial, typischerweise PVC oder PET, ummantelt. Der Kondensator ist nun bereit für den Versand an den Kunden.

Toleranzbetrachtung von Elektrolytkondensatoren

Wie Fingerabdrücke sind auch keine zwei Elektrolytkondensatoren identisch. Dies liegt an der elektrochemischen Natur eines Elektrolytkondensators. Aufgrund dieser Variation werden Elektrolytkondensatoren mit Toleranzen von typischerweise $\pm 20\%$ oder $-10\%/+30\%$ spezifiziert. Aber was bedeutet das in der Praxis? Bild 6 zeigt zwei Gaußsche Diagramme einer typischen Charge von Kondensatoren.

Bei einem Kondensator mit Toleranz von $\pm 20\%$ liegt die Nennkapazität typischerweise 8% bis 10% über der unteren Prozentgrenze. Die Mehrheit der Kapazitätswerte in einer Charge von Kondensatoren liegt zwischen dem unteren Prozentgrenzwert und der

„Elektrolytkondensatoren sind keineswegs einfache passive Bauteile mit wenigen Parametern. Ihr Einsatz erfordert viele Kompromisse in Bezug auf Leistung, Preis und Lebensdauer.“

Falko Ladiges, WDI

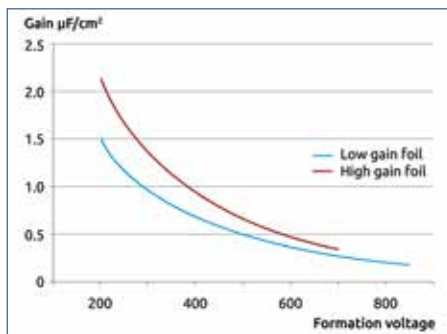


Bild 4: Diagramm Kapazitätswert vs. Formationsspannung.

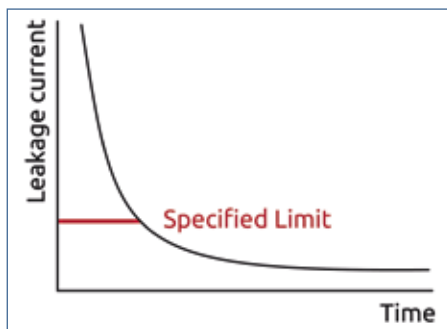


Bild 5: Diagramm Leckstrom über Zeit.

Nennkapazität. Dies ist ein sehr beliebter Kompromiss zwischen tatsächlichem Kapazitätswert und Preis und findet sich in vielen Märkten weltweit wieder.

Bei einem Kondensator mit Toleranz von $-10\%/+30\%$ liegt die Kapazität nahe am Nennkapazitätswert. Die Mehrheit der Kapazitätswerte in einer Charge von Kondensatoren liegt in der Nähe beider Seiten des Nennwertes. Dies gibt dem Konstrukteur bessere Optionen, wenn eine bestimmte Leistung wichtig ist.

Diese 40%-ige Verteilung ist auf die Bildung von Variationen in der Anodenfolie zurückzuführen. Vor vielen Jahren war eine Toleranz von $\pm 50\%$ Standard, aber Fortschritte in der Umformtechnik haben dies reduziert und eine Spreizung von 30% ist bei kundenspezifischen Designs nicht ungewöhnlich. Die Enge der Gaußschen Darstellung ist abhängig von der Qualität der Anodenfolie. Die besseren Folien kommen in der Regel aus Europa und Japan. Itecond verwendet ausschließlich europäische Folien.

Einflüsse auf die Kapazität eines Elektrolytkondensators

Es gibt einen gewissen Einfluss auf die Kapazität, der durch Frequenz, Temperatur und Art und Weise der Kapazitätsmessung verursacht wird. Die Kapazität wird mit der Frequenz abnehmen, wie die Formel

$C = 1/(2\pi \cdot f \cdot Z)$ zeigt. Bei der Temperatur ist die Kapazität bei $50\text{ }^\circ\text{C}$ um etwa 2% höher als bei $20\text{ }^\circ\text{C}$. Dieser Anstieg ist bei niedrigeren Nennspannungen und bei tiefen geätzten Folien größer. Den größten Effekt hat die Art und Weise der Kapazitätsmessung, entweder die Wechselstromkapazität nach dem LCR-Brückenverfahren oder Gleichstromkapazität nach dem Ladungs-Entladungsverfahren $C = Q/V$. Die Ladungs-Entladungsmethode kann im Vergleich zur LCR-Brückenmethode zu 10% bis 30% höheren Werten führen.

Kondensatoren im praktischen Einsatz

Die vom Kondensator spezifizierte Leistung kann je nach Branche variieren. Kostengünstige Kondensatoren für Consumer-Anwendungen sollten in der Regel nicht an der Leistungsgrenze betrieben werden. Auch wenn die Spezifikation dieser Kondensatoren mit 400 V und $85\text{ }^\circ\text{C}$ angegeben wird, so sind diese aus Kostengründen meist so ausgelegt, dass sie eher bei einer geringeren Spannung und Temperatur betrieben werden sollten.

Kondensatoren für Industrieanwendungen, die von Qualitätsherstellern wie Itecond hergestellt werden, sind so ausgelegt, dass sie problemlos mit der angegebenen Leistung betrieben werden können, was sich aber auch im Preis bemerkbar macht.

Manchmal möchten Konstrukteure die Kondensatoren bei reduzierten Leistungswerten betreiben, entweder durch persönliche Wahl oder durch die vorgeschriebenen Anforderungen des Endmarktes, quasi als Sicherheitspuffer. Sie nehmen beispielsweise einen 450-V-Kondensator und verwenden ihn in einer 350-V-Anwendung. Welchen Nutzen bringt uns das?

Aus Bild 7 kann man ersehen, dass es keinen weiteren Vorteil bringt, den Kondensator unter 80% der Nennspannung zu betreiben. Der Spannungsfaktor wirkt bei höheren Kondensatortemperaturen stärker und ist ein Parameter, der in eine Lebensdauerberechnung einbezogen wird. Der Wert von 1,4 entspricht einer Erhöhung der erwarteten Lebensdauer um 40%. Elektrolytkondensatoren unterliegen auch hier wieder einem Kompromiss; lassen sich die Mehrkosten für die höhere Spannung für die längere Lebensdauer rechtfertigen?

Blick auf Leckstrom und Temperatureinfluss

Wir sprachen über Ableitströme (Leckstrom) und den Alterungsprozess während der Herstellung. Hier können wir einen weiteren Blick auf den Ableitstrom und den Tem-

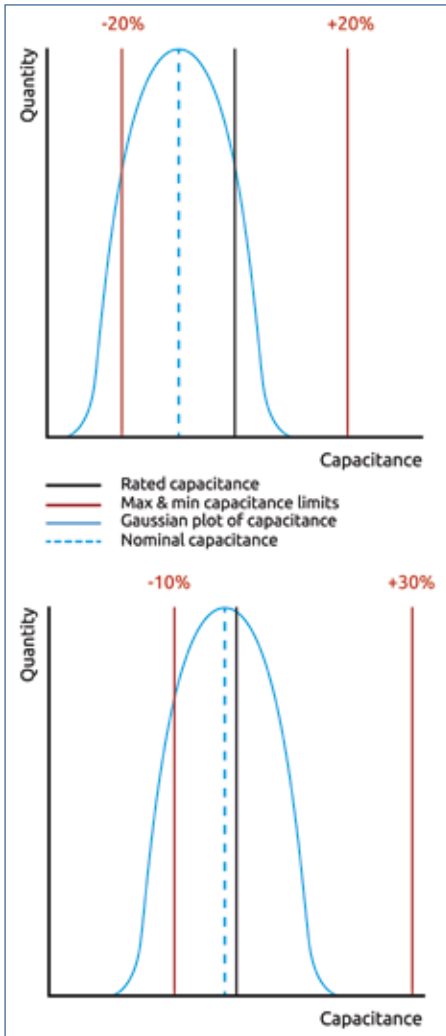


Bild 6: Gaußsche Verteilung bei ±20% (oben) und -10%/+30% (unten) Toleranz.

peratureinfluss werfen. Der Ableitstrom ist der Fehlerstrom, der nach dem vollständigen Laden eines Kondensators weiterfließt. Der Ableitstrom ist spannungs- und temperaturabhängig. Wie aus Bild 8 ersichtlich, ist der Ableitstrom gering, bis er einen Punkt erreicht, an dem er schnell ansteigt. Die Nennspannung wird an dem Punkt angegeben, wo der Leckstrom rasant ansteigt (dieser Punkt ist der angegebene Grenzwert). Temperaturbereiche werden meist mit 85 °C und 105 °C beschrieben.

Werden diese Temperaturen überschritten, verschiebt sich die Kurve effektiv nach links und bei der angegebenen Nennspannung steigt der Ableitstrom drastisch an. Unter besonderen Bedingungen kann man diese Kurve jedoch nutzen und nach rechts verschieben; wenn der Kondensator kühl ist, kann die Nennspannung möglicherweise überschritten werden. Dieser Trick kann bei Photovoltaik-Anwendungen eingesetzt werden, bei denen sich der Wechselrichter im

unbeheizten Dachraum befindet. Die Spannung eines Solarmoduls kann um etwa 20% höher sein, wenn es an einem kalten Wintermorgen, aber vor der Stromversorgung, hellem Sonnenlicht ausgesetzt ist. Diese 20% höhere Spannung wird durch den Zwischenkreis des Wechselrichters angezeigt und die Elektrolytkondensatoren müssen dieser erhöhten Spannung standhalten können. Wenn sie kalt sind, typischerweise 0 °C, und sich die Kondensatoren im kalten Dachraum befinden, kann die Nennspannung erhöht werden. Typischerweise kann ein 500-V-Elektrolytkondensator unter diesen Bedingungen mit 550 V betrieben werden. Es ist jedoch Vorsicht geboten, da der ESR bei der Kälte sehr hoch ist, muss der Wechselrichter kontrolliert erwärmt werden, um den Ripplestrom zu begrenzen. Das Solarmodul wird hier helfen, da die Spannung abnimmt, sobald es Strom produziert.

In Bild 9 sind ESR-Kurven für einen typischen Elektrolytkondensator abgebildet. Man sieht, wie der ESR bei niedrigeren Temperaturen drastisch ansteigt. In einer Photovoltaik-Anwendung ist das Aufwärmen unter kontrollierten Bedingungen erforderlich, da der ESR so hoch ist. Bei zu hohem Ripplestrom überhitzt der Kondensator. Eine sanfte Erwärmung erhöht zwar auch die Temperatur des Kondensators, doch verringert sich der ESR und damit dann wieder die innere Erwärmung.

In vielen Leistungsanwendungen mit einem Ripplestrom zwischen 50 und 500 Hz ist die ESR-Eigenschaft eines Elektrolytkondensators wichtig.

Der ESR ist der Widerstand gegen Ripple des Wechselstroms. Wie bereits erwähnt, ist der ESR temperatur- und frequenzabhängig, jedoch auch abhängig von der Nutzungsdauer. Er wird während der gesamten Betriebsdauer sanft ansteigen. Wenn der Kondensator jedoch das Ende seiner Lebensdauer erreicht, beschleunigt sich die Steigerungsrate. Typischerweise wird davon ausgegangen, dass dies der Fall ist, sobald der ESR den dreifachen Ausgangswert erreicht hat. Betreibt man den Kondensator danach noch weiter, erhöht sich auch der ESR, bis die interne Erwärmung die maximale Kerntemperatur des Kondensators erreicht.

Wechselseitige Abhängigkeiten in einem Elektrolytkondensator

Während Anodenfolie, Kapazität, Spannung und Ableitstrom eng miteinander verflochten sind, so sind auch ESR und Elektrolyt miteinander verflochten. Bei Verwendung des Elektrolytkondensators führten der Ripplestrom und der ESR zu einer IR-Erwär-

mung und damit zu einer Ausgasung des Elektrolyten. Infolgedessen steigt der Innendruck und es kommt zu einer gewissen Diffusion durch die Dichtung zwischen Deckplatte und Becher. Dies führt im Laufe der Zeit zu einer Austrocknung des Kondensators, was zu einem Anstieg des ESR führt. Ein stabiler Elektrolyt reduziert die Ausgasung und damit die Rate der ESR-Erhöhung. Ein zu hoher Ableitstrom kann auch zu Erwärmung und Ausgasung führen und somit den ESR-Anstieg beschleunigen.

Elektrolytkondensatoren folgen dem Arrhenius-Gesetz: Wenn die Umgebungstemperatur um 10 K sinkt, verdoppelt sich die Lebensdauer. Ein Elektrolytkondensator kann für den Einsatz in einer anspruchsvollen Anwendung ausgelegt werden und je anspruchsvoller, desto höher sind die Kosten des Kondensators. Kostengünstiger ist meist die Verwendung eines Lüfters/Ventilators, um die Wärmeabfuhr von einem Elektrolytkondensator in einer heißen Umgebung zu beschleunigen und damit den Gesamttemperaturanstieg zu begrenzen.

Weitere zu beachtende Merkmale sind das anfängliche Kondensator-Design. Wir haben bereits gesehen, wo die Kapazitätswerte mit zunehmender Nennspannung abnehmen. Der ESR wird mit zunehmender Nennspannung aufgrund der dickeren Papiere und des Elektrolyten steigen. Für Anwendungen mit starkem Ripplestrom haben wir die Wahl,

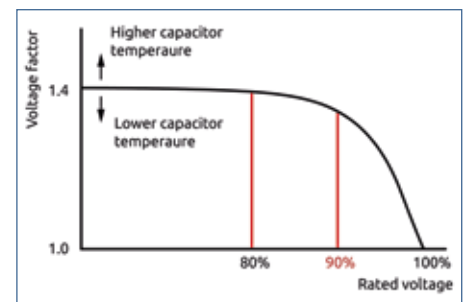


Bild 7: Änderung des Spannungsfaktors gegenüber der Nennspannung.

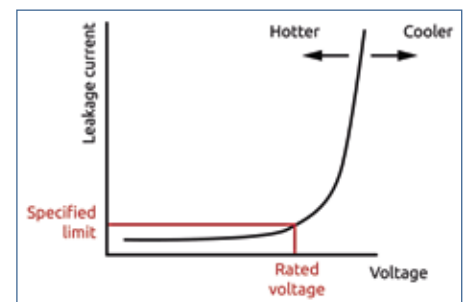


Bild 8: Änderung des Leckstroms in Abhängigkeit von Spannung und Temperatur.

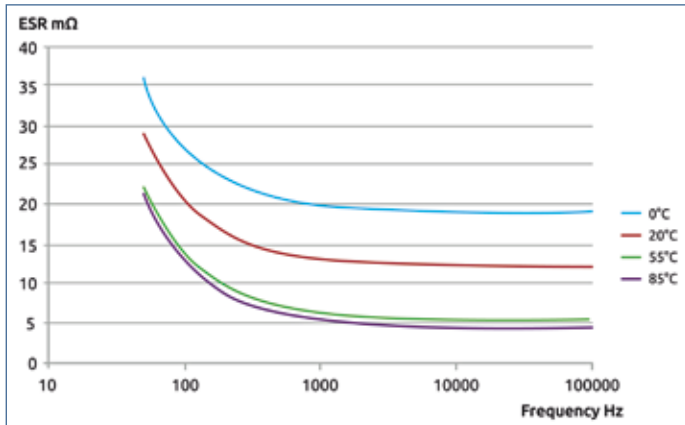


Bild 9: Änderung des ESR über die Temperatur und Frequenz.

eine Folie mit geringer Verstärkung zu verwenden, die einen niedrigeren ESR aufweist, oder man kann eine Standardfolie verwenden, die eine höhere Spannung zulässt, um die Vorteile der Spannungsreduzierung (Derating) zu nutzen. Jede Lösung hat ihre Vor- und Nachteile.

Häufig werden Fragen zur Haltbarkeit gestellt. Das sogenannte Shelf Life oder die Lagerfähigkeit wird bestimmt von der ruhenden Lagerung des Elektrolytkondensators, entweder innerhalb der Anwendung oder nicht eingebaut separat. Zeit und Temperatur wirken sich auf einen ruhenden Kondensator aus, bei dem der Ableitstrom im Laufe der Zeit langsam ansteigt, ohne dass eine Spannung anliegt. Eine Umkehrung des Alterungsprozesses tritt ein, wenn eine chemische Veränderung eintritt. Daher ist vor dem Einsatz ein erneutes Altern erforderlich.

In einem typischen Lager sollte die Haltbarkeit mindestens zwei Jahre betragen. Darüber hinaus kann der Ableitstrom die Grenzwerte überschreiten. Wenn ein Nachreifen erforderlich ist, muss dies bei Raumtemperatur erfolgen. Dazu schließt man eine Spannungsversorgung an, die der Nennspannung entspricht, der Strom aber auf den maximalen Wert des Leckstroms des Kondensators begrenzt ist. Je nach Ausgangszustand kann eine Nachalterung von ein bis vier Stunden erforderlich sein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Elektrolytkondensatoren keineswegs einfache passive Bauteile mit wenigen Parametern sind. Ein Elektrolytkondensator erfordert viele Kompromisse in Bezug auf Leistung, Preis und Lebensdauer. Erfahrung und technisches Knowhow in Verbindung mit hochwertigsten Materialien gewährleisten am Ende ein den technischen Ansprüchen genügendes Produkt mit der zu erwartenden Lebensdauer. // TK

WDI