

Eine sichere Bank

Zuverlässigkeit von Elektrolytkondensatoren



Aluminium-Elektrolytkondensatoren („Alu-Elkos“, „Elkos“) stellen einen wichtigen Bestandteil vieler elektronischer Geräte dar. Erhöhte Anforderungen an die Energieeffizienz, die expandierende Nutzung erneuerbarer Energie und der stetig wachsende Elektronikanteil im Automobilbau haben die weite Verbreitung dieser Bauelemente vorangetrieben.

In vielen Applikationen hängen Lebensdauer und Zuverlässigkeit

des Gerätes direkt von den entsprechenden Parametern der Elkos ab [4]. Während ein früherer Beitrag [1] des Autors das Thema Lebensdauerabschätzung beleuchtete, zeigt dieser Artikel Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit von Elkos.

Aufbau und Herstellung von Elkos

Aluminium-Elektrolytkondensatoren vereinen Spannungsfestigkeiten im Bereich von wenigen Volt

bis zu ca. 750 V und einen weiten Kapazitätsbereich von 1 μF bis über 1 F bei gleichzeitig kompaktem Aufbau. Eine hoch aufgeraute Anodenfolie mit einer dünnen Dielektrikumsschicht wird dabei vollflächig von einer passgenauen Kathode, der Elektrolytflüssigkeit, kontaktiert (Bild 1).

Die Herstellung von Elkos umfasst im Wesentlichen die folgenden Prozessschritte:

1. Ätzen

Hoch reine Aluminiumfolien einer Dicke von 20 ~ 100 μm sind das Ausgangsmaterial der späteren Anoden- und Kathodenfolien. Der Ätzvorgang erhöht die Oberfläche des Anodenmaterials je nach Spannungsfestigkeit um bis zu mehr als 120fach (Bild 2).

2. Formieren

Die Anodenfolie trägt die Dielektrikumsschicht des Elkos, das Aluminiumoxid (Al_2O_3), welches in einem elektrochemischen Verfahren auf die aufgeraute Anodenfolie aufwächst. Das Verfahren wird als anodische Oxidation oder auch Formierung bezeichnet.

Die Güte der Formierung, d. h. eine gleichmäßig dicke und vollständige Überdeckung des Anodenmaterials mit Aluminiumoxid, ist dabei ein wesentlicher Schlüssel zur hohen Zuverlässigkeit der Bauteile im Betrieb, denn je weiter die Formierspannung oberhalb der Nennspannung liegt, desto mehr



Autor:
Dr. Arne Albertsen
Jianghai Europe Electronic
Components GmbH
www.jianghai-europe.com

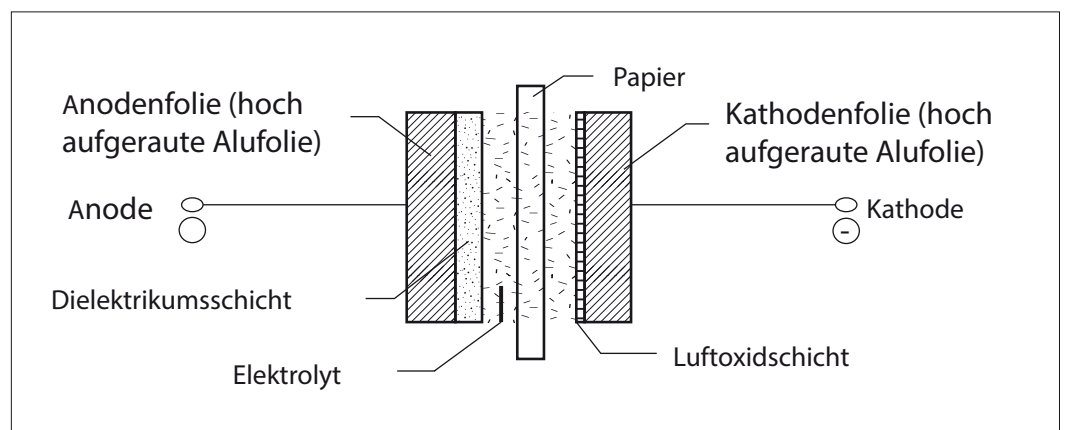


Bild 1: Innerer Aufbau eines Alu-Elkos

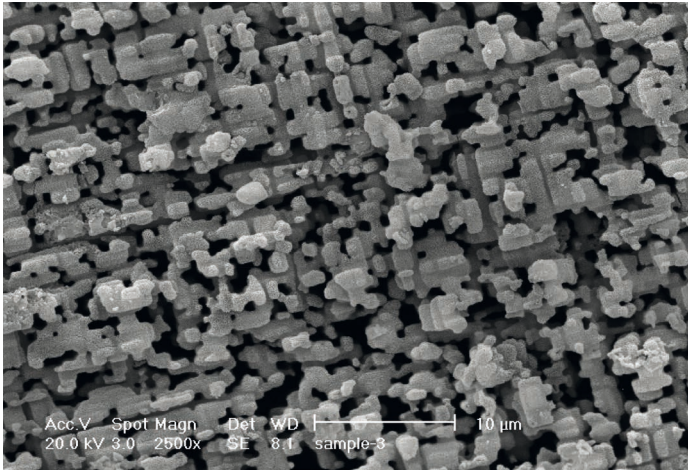


Bild 2: Oberfläche einer geätzten Anodenfolie

sinkt die Wahrscheinlichkeit eines dielektrischen Durchschlages. Praktische Werte für das Verhältnis aus Formierspannung zu Nennspannung liegen bei Jianghai-Elkos typischerweise im Bereich 1,25 V (Niedervolt) bis 1,60 V (Hochvolt). Die Schichtdicke beträgt ca. 1,4 nm/V, also z. B. ca. 900 nm für einen Elko mit 450 V Spannungsfestigkeit, entsprechend weniger als dem Hundertstel der Dicke eines menschlichen Haares.

3. Zuschneiden

Die geätzte und formierte Folie wird auf sog. „Mutterrollen“ mit einer Breite von ca. 50 cm bereitgestellt. Aus diesen Mutterrollen entstehen beim Zuschneiden die Folienstreifen für Anoden- und Kathodenmaterial in der jeweils benötigten Breite.

4. Wickeln

Anbringen der elektrischen Anschlussfährchen an die Folien

(Quetschung/Kaltschweißen) und Wickeln von Anode, Papier (Abstandhalter, ggf. mehrlagig), Kathode.

5. Imprägnieren

Die Poren des im Wickel enthaltenen Papiers und die gesamte Oberfläche der Anodenfolie werden mit der flüssigen Kathode, dem Elektrolyten, benetzt.

6. Einhausung

des Wickels im Becher, Herstellen einer elektrischen Verbindung zwischen den Anschlussfährchen und den Löt- bzw. Schraubanschlusselectroden und Verschlussbördelung der Dichtung.

7. Nachformieren

(„Burn-in“) zur Ausheilung der Schnittkanten.

8. 100%-Qualitätskontrolle

der vitalen Parameter (Kapazität, Verlustfaktor, Leckstrom).

Bild 2 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche einer geätzten Hochvolt-Anodenfolie. Die homogene Verteilung und der große freie Querschnitt der geätzten Löcher ermöglichen es, Oxidschicht und Elektrolyt gleichmäßig über die gesamte Oberfläche einzubringen. Bereits zu diesem frühen Zeitpunkt im Produktionsablauf entscheidet sich, ob der Elko später den hohen Anforderungen in Bezug auf Zuverlässigkeit, Stromtragfähigkeit und Langlebigkeit in professionellen Industrieanwendungen gerecht werden kann.

Zuverlässigkeit herstellen

Insbesondere die Prozessschritte 2. und 7. haben großen Einfluss auf die Zuverlässigkeit von Elkos im Betrieb. Jianghai verfolgt hier das Ziel, einen hinreichenden Sicherheitsabstand der Formierspannung von der Nennspannung und eine ausreichende Verweildauer beim Nachformieren zu gewährleisten, um eine hohe Zuverlässigkeit zu erzielen. Da die Formierspannung nicht im Datenblatt angegeben wird, fällt es dem Endanwender nicht leicht, diese als Vergleichsparameter zu bewerten.

Indirekt lassen sich jedoch durch gezieltes Nachfragen beim Hersteller und den Vergleich der Leckströme Schlüsse auf die Auslegungsphilosophie des jeweiligen Anbieters ziehen. Angesichts steigender Material- und Energiepreise beobachtet man vermehrt, dass sogar namhafte Hersteller die Formierspannung bei laufenden Serien senken. Jianghai betrachtet derartige Bestrebungen zur Kostenoptimierung aus Qualitätssicht als nicht vertretbar.

Unterschiede zwischen Lebensdauer und Zuverlässigkeit

Elektrochemische Alterungsmechanismen begrenzen die Lebensdauer von Elkos auf einen abschätzbaren Wert in Abhängigkeit von Temperatur-, Strom- und Spannungsbelastungen. Während dieser Lebensdauer können jederzeit Zufallsausfälle eintreten, deren absolute Anzahl von der Größe der beobachteten Stichprobe abhängt. Das Auftreten von Zufallsausfällen hat in der Regel nichts mit der Alterung der Elkos zu tun, sondern eher mit einer verborgenen inneren Schwächung, z. B. im Papier, einer Folie oder im Bereich der Anschlüsse. Meist erfolgen diese Ausfälle ohne Vorwarnung und enden mit einem Kurzschluss. Ein erhöhter Leckstrom infolge einer beschädigten Dielektrikumsschicht kann auch zu einer so starken Formierung mit Gasbildung führen, dass der Überdruck aus Wasserstoffgas das Ventil öffnet. Im Anschluss trocknet das Bauteil aus und fällt mit zu geringer Kapazität aus.

Tests erfassen Frühausfälle

Die Messung von Kapazität, Leckstrom und ESR an allen produzierten Bauteilen sowie die Durchführung weiterer Tests an Stichproben sichert die hohe Qualität der Produkte, so dass Frühausfälle in der Anwendung eine sehr seltene Ausnahme sind [2].

„Zuverlässigkeit“ definieren

Es gibt eine Vielzahl von Definitionen des Begriffs „Zuverlässigkeit“ und je nachdem, ob man einen Statistiker, Mathematiker oder Ingenieur fragt, wird man eine unterschiedliche Antwort erhalten. Die anschauliche Bedeutung des Begriffs könnte so lauten: die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Gerät innerhalb einer gegebenen Zeitdauer die Anforderungen seiner Bestimmung unter definierten Bedingungen zufriedenstellend erfüllt.

Der typische Verlauf der zeitlichen Entwicklung der Zuverlässigkeit von Elektrolytkondensatoren wird durch die sog. „Badewannenkurve“ charakterisiert [3]. Die Ausfallrate („Firate“) λ gibt die Anzahl von Ausfällen je Zeiteinheit an (die Maßeinheit FIT = „Failures in Time“ bezeichnet die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte in $(10^{-9}$ Ausfällen)/h).



Bild 3: Zeitliche Entwicklung der Ausfallrate

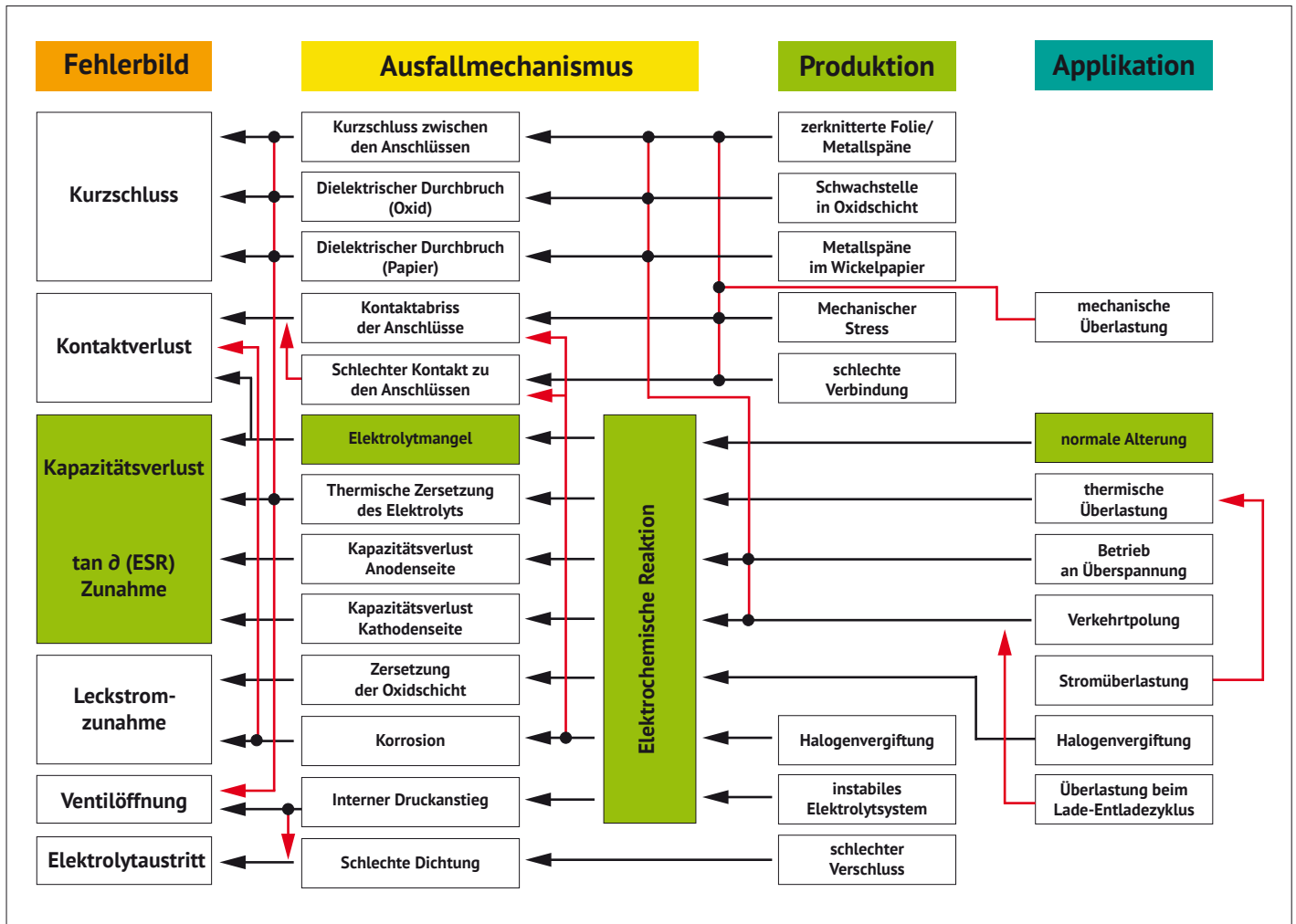


Bild 4: Fehlerbilder und Ausfallmechanismen

Badewannenkurve

Die Badewannenkurve in Bild 3 hat drei zeitlich aufeinanderfolgende Abschnitte:

1. Den Bereich der Frühausfälle mit einer sinkenden Fitrater λ
2. Den Bereich innerhalb der normalen Lebensdauer mit einer konstanten Fitrater λ , die das Auftreten von Zufallsausfällen beschreibt
3. Den Bereich steigender Fitraten λ , der aus den Verschleiß- bzw. Änderungsausfällen am Ende der Lebensdauer resultiert

Die sog. „outlier percentage“, die im Zusammenhang mit der Definition der Brauchbarkeitsdauer „useful life“ angegeben wird, bezieht sich dagegen auf den Prozentsatz der Bauteile, deren elektrische Parameter sich nach der spezifizierten Lebensdauer außerhalb der angegebenen Änderungsgrenzen befinden und darf nicht mit der Ausfallrate verwechselt werden.

Fehlerbilder und Ausfallmechanismen

Das übliche Fehlerbild eines normal gealterten Elkos ist ein Änderungsausfall wegen zu geringer Kapazität bzw. zu hohen ESR-Wertes (Bild 4, blass grün hinterlegte Felder).

Die in der Übersicht dargestellten Ausfallmechanismen können durch produktions- und applikationsbedingte Ursachen ausgelöst werden. In der Praxis sind Beispiele für produktionsbedingte Ausfälle sehr selten, da die Reinheit der verwendeten Materialien und Prozesse sowie die Güte der mechanischen Fertigungseinrichtungen in den letzten Jahren stetig zugenommen haben. Oftmals lassen sich Ausfälle auf eine applikationsbedingte Ursache zurückführen, da nicht in allen Fällen eine Überlastung (Umgebungstemperatur, Ripplestrom, Betriebsspannung, Vibration, Zugbelastung, ...) des Bauteils ausgeschlossen werden kann.

Abschätzung von Ausfallraten

Selbst unter Verwendung der besten Materialien, einer hochwertigen Fertigung und einer effektiven prozessbegleitenden Qualitätssicherung gibt es Zufallsausfälle von Elkos im Feld. Im Zusammenhang mit der Abschätzung von Ausfallraten findet man in der Literatur häufig einen Verweis auf das MIL-HDBK-217F, das sich auf Zuverlässigkeitsdaten für diverse Bauelemente von vor mehreren Jahrzehnten gründet.

Die Zahlenwerte der dort genannten Ausfallraten übersteigen die Feld-Ausfallraten der aktuellen Baureihen von Jianghai ca. um einen Faktor 10 ~ 100. Die im MIL-HDBK-217F genannten Berechnungsvorschriften für Spannungs- und Temperaturkorrekturfaktoren zeigen jedoch qualitativ den Einfluss des Betriebspunktes auf die Zuverlässigkeit an (Bild 5). Als Bezugspunkt gilt hier eine Umgebungstemperatur von

40 °C und ein Betrieb bei halber Nennspannung.

Um belastbare Zuverlässigkeitsdaten ausschließlich auf Labortests abstützen, bedürfte es eines unverhältnismäßig hohen Aufwands. Man müsste Testdaten über Milliarden von Bauelementestunden experimentell gewinnen, d. h. eine Größenordnung von 1 Million Elkos mit hohem Personaleinsatz testen. Jianghai bedient sich daher der Information über tatsächliche Feldausfälle von Kunden in Verbindung mit den typischen Anwendungsbedingungen (Temperatur, Ripplestrom und Betriebsspannung). Mithilfe der Produktionsdaten über die Mengen der hergestellten Bauelemente je Technologie bzw. Baureihe und unter Verwendung der verfügbaren Labortestergebnisse lassen sich dann bei erträglichem Aufwand Schätzwerte der zu erwartenden FIT-Werte ermitteln. Die Größenordnung dieser Feld-Ausfallraten liegt im Bereich 0,5 ~ 20 FIT.

Mean Time Between Failures

Aus den FIT-Raten lässt sich unmittelbar die MTBF (Mean Time Between Failures) als Kehrwert der FIT-Rate errechnen: $MTBF = 1/FIT$. An dieser Stelle sei der Hinweis gestattet, dass die MTBF nicht eine garantierte Mindestzeit bis zum Erreichen eines Ausfalls darstellt, sondern vielmehr den mit einer Exponentialverteilung gewichteten Mittelwert der Ausfallzeit. In Zahlen bedeutet dies, dass nur mehr ca. 37 % der Elkos aus einer großen Anzahl (Grundgesamtheit) von Elkos die MTBF erleben werden.

Einflussfaktoren auf die Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit (und auch die Lebensdauer) von Elkos aller Bauweisen und Hersteller hängt exponentiell von Temperatur, Ripplestrom und Betriebsspannung ab. Kleine Änderungen dieser Parameter zeigen mithin große Wirkung. Eine sorgfältige Auslegung der Schaltung trägt maßgeblich zum Erreichen der gewünschten Zuverlässigkeit eines Gerätes bei:

- Komplexität – weniger Bauteile führen zu einer höheren Zuverlässigkeit.
- Belastung – Temperatur, Ripplestrom und Spannung, evtl. in Kombination mit mechanischen Belastungen wie Vibration, erfordern Kompromisse in Bezug auf Kosten und Abmessungen. Insbesondere thermische Belastungen sollten minimiert werden (mit jedem 10 K Temperaturanstieg verdoppelt sich die Ausfallrate von Elkos!).
- Zuverlässigkeit der verwendeten Bauteile – bei der Auswahl der Bauelemente sollte deren individuelle Zuverlässigkeit gegenüber ihren Kosten abgewogen werden (hoch zuverlässige Bauelemente haben in der Regel höhere Kosten).

Elkos erfolgreich einsetzen

Die überwiegende Anzahl der Feldausfälle von Elkos sind keine klassischen Zufallsausfälle. Jenseits der Einflussmöglichkeiten des Elko-Herstellers ist hier der Anwender gefordert, die richtigen Bedingungen durch robustes Design, sorgfältige Verarbeitung und moderate Umweltbedingungen in der Appli-

kation sicherzustellen. Um Elkos erfolgreich einzusetzen, sind hier einige Anwender-Tipps zur Handhabung von Elkos zusammengestellt:

Transport und Lagerung

Elko-Becher (Reinaluminium) und Elko-Dichtung (Gummi) sind weich bzw. elastisch. Augenscheinlich defekte (verbeulte) Bauteile sollten nicht verarbeitet werden. Schädigungen durch Halogene (insbesondere Bromide zur Sterilisierung der Waren während des Überseetransports) sind leider keine Seltenheit. Dies gilt sowohl für den Bezug von Elkos als auch für den Versand der fertigen Baugruppen.

Bestückung und Montage

Zug, Druck und Verbiegen der Anschlussbeinchen (insbesondere bei radialen Elkos) ist zu vermeiden. Eine Beschädigung der inneren Kontaktierung von Anoden und Kathodenfolie könnte die Folge sein.

Kleber, Vergussmassen oder Lacke müssen frei von Halogenen sein. Im Bereich der Elko-Dichtung sollte eine Öffnung verbleiben, so dass die Bildung eines Mikroklimas in einem allseitig umschlossenen Hohlraum vermieden wird (Korrosionsgefahr). Leiterbahnen sollen nicht unter dem Elko („zwischen den Beinchen“) verlaufen.

Keinesfalls dürfen Elkos als „Griff“ für die Baugruppe verwendet werden.

Löten

Die vom Hersteller spezifizierten Grenzen der Lötprofile sind unbedingt einzuhalten, um Vorschädigungen (Aufwölbungen, Lebensdauerverlust bzw. Zersetzung des Elektrolyten) zu vermeiden. Dieser Aspekt hat besondere Bedeutung bei der Verarbeitung von SMD-Elkos im bleifreien Reflow-Prozess (Profile mit erhöhter Löttemperatur).

Betrieb

Spannungsspitzen aus induktiven Lasten können bei Ein- oder Ausschaltvorgängen zu Transienten führen, die jenseits der Formierspannung bzw. der Gegenspannungsfestigkeit liegen. Derartige Transienten führen bereits bei einmaligem Auftreten zu bleibenden Schäden des Bauteils.

Mechanische Belastungen während des Betriebes können (z. B. bei Eigenresonanz) zu einem Bruch

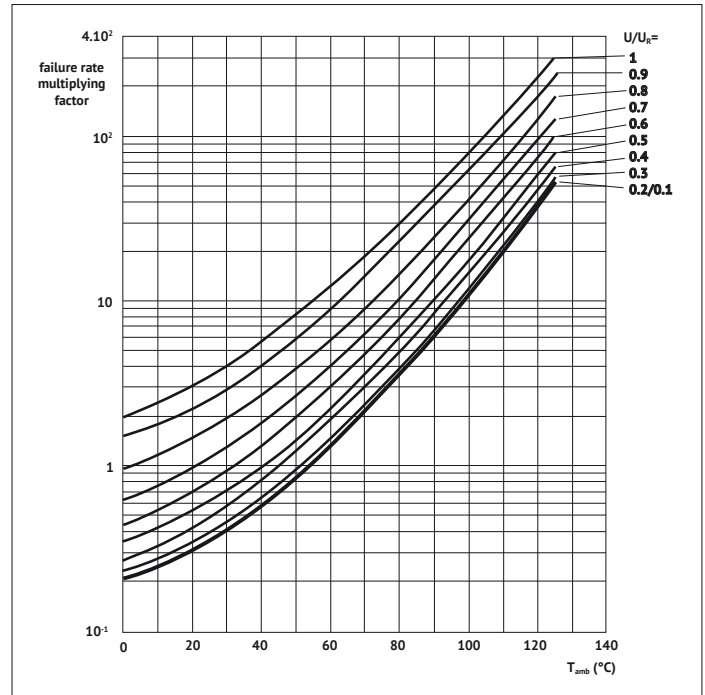


Bild 5: Korrekturfaktoren gemäß MIL HDBK-217F

der Anschlussdrähte führen. Kleben oder eine andere Platzierung des Elkos auf der Leiterplatte kann hier Abhilfe schaffen.

Jede Erhöhung der Umgebungstemperatur um 10 K verdoppelt die Ausfallrate und halbiert die Elko-Lebensdauer. Eine Platzierung entfernt von Wärmequellen (Kühlkörper, Leistungsinduktivitäten) ist hier vorteilhaft.

Zusammenfassung

Aluminium-Elektrolytkondensatoren beeinflussen durch ihre individuelle Zuverlässigkeit die Zuverlässigkeit der Geräte, in denen sie eingesetzt sind. Die Kenntnis einiger wesentlicher Parameter dieser Bauelemente, die durch den in ihnen enthaltenen flüssigen Elektrolyten eine Besonderheit unter den elektronischen Bauteilen darstellen, ist zur sicheren Auslegung von Geräten unabdingbar.

Die typischen Einflussfaktoren sowie die Definitionen der Zuverlässigkeit werden erläutert. Als Hilfsmittel zum erfolgreichen Einsatz stehen Leitlinien zur Verwendung von Elkos zur Verfügung.

Die Anwendbarkeit der allgemein formulierten Leitlinien hängt im Einzelfall von der Baureihe und der Applikation ab. Daher ist eine intensive Projektbegleitung und Bestätigung der Abschätzungen durch den Elko-Hersteller immer erforderlich.

Literatur

[1] Albertsen, A., Lebe lang und in Frieden! Hilfsmittel für eine praxisnahe Elko-Lebensdauerabschätzung, Elektronik Components 2009, 22-28 (2009)

[2] Both, J., Aluminium-Elektrolytkondensatoren, Teil 1 - Ripplestrom und Teil 2 - Lebensdauerberechnung, BC Components, February 10, 2000

[3] Stiny, L., Handbuch passiver elektronischer Bauelemente, Franzis Verlag, Poing, 2007

[4] Venet, P., A. Lahyani, G. Grellet, A. Ah-Jaco, Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method, Eur. Phys. J. AP 5, 71-83 (1999)

Wer schreibt:

Dr. Arne Albertsen studierte Physik mit dem Schwerpunkt Angewandte Physik an der Universität Kiel. Die Schwerpunkte der Tätigkeit von Dr. Albertsen bei Jianghai liegen im Bereich des Designins und der Anwendungsunterstützung für Kondensatoren in professionellen Industrieapplikationen. Dr. Albertsen ist seit 2011 ehrenamtlich als Experte für Elektrolytkondensatoren und stellvertretender Obmann im Normungsgremium „K611“ der DKE Deutschen Kommission Elektrotechnik im DIN und VDE tätig. ◀