Elko-Lebensdauerabschätzung

Wer schreibt

Jianghai entwickelte und produzierte vor allem spezielle chemische Produkte (wie z. B. Elektrolytsysteme). Ab 1970 kamen Aluminium-Elektrolytkondensatoren und geätzte und formierte Anodenfolien hinzu, danach Folien-, Polymer-, Doppelschicht und Lithium-Ionen Kondensatoren.

Dr. Albertsen ist im Bereich des Design-ins und der Anwendungsunterstützung für Kondensatoren in professionellen Industrieapplikationen tätig. Er ist seit 2011 ehrenamtlich als Experte für Elektrolytkondensatoren und stellvertretender Obmann im Normungsgremium „K611" der DKE Deutschen Kommission Elektrotechnik im DIN und VDE tätig.

Aluminium-Elektrolytkondensatoren („Alu-Elkos", „Elkos") stellen einen unverzichtbaren Bestandteil vieler elektronischer Geräte dar. Gestiegene 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 hängt die Lebensdauer des Gerätes unmittelbar von der Lebensdauer der Elkos ab [9]. Um einen zuverlässigen Betrieb von elektronischen Geräten für eine definierte Lebensdauer zu erzielen, ist ein Verständnis der Eigenschaften von Elkos unerlässlich.

Der vorliegende Beitrag erläutert zunächst den Aufbau von Elkos und die Begriffe ESR, Ripplestrom, Eigenerwärmung, chemische Stabilität und Lebensdauer. Zwei Hilfsmittel zur Abschätzung der Elko-Lebensdauer in einer Applikation werden vorgestellt und anhand eines Beispiels illustriert.

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

Aufbau von Elkos

Aluminium-Elektrolytkondensatoren vereinen Spannungsfestigkeiten im Bereich von wenigen Volt bis zu ca. 700 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).

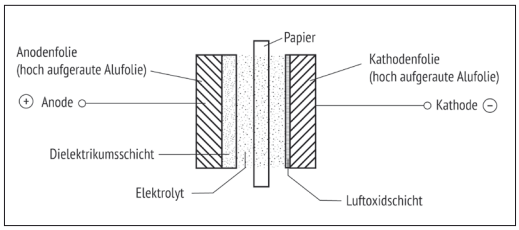

Bild 1: Innerer Aufbau eines Alu-Elkos

Der flüssige Elektrolyt stellt die Besonderheit in der Konstruktion des Aluminium-Elektrolytkondensators dar und seine Präsenz führt zu technischen Konsequenzen.

- Da der Stromfluss durch den Elektrolyten auf Ionenleitung beruht, sorgt eine steigende Temperatur des Elektrolyten für ein Absinken der Viskosität und damit des Widerstandes (ESR).
- Der Siedepunkt des Elektrolyten bestimmt die obere Kategorietemperatur und limitiert die maximal zulässige Eigenerwärmung durch den überlagerten Wechselstrom („Ripplestrom") in Verbindung mit der herrschenden Umgebungstemperatur.

- Elektrolytverluste durch elektrochemische Reaktionen an der Dielektrikumsschicht (Selbstheilung) und Diffusion durch die Dichtung (Austrocknung) bewirken eine Drift der elektrischen Parameter des Elkos und führen zu einer Begrenzung seiner Lebensdauer.

Äquivalenter Serienwiderstand ESR

Der ESR-Wert (Equivalent Series Resistance) gestattet die einfache Berechnung der beim Betrieb eines Elkos mit einer überlagerten Brummspannung entstehenden Verlustleistung [1]. Die äquivalente Serieninduktivität ESL sowie der Widerstand R_{Leck} (parallel zur idealisierten Kapazität C) werden hier nicht weiter betrachtet

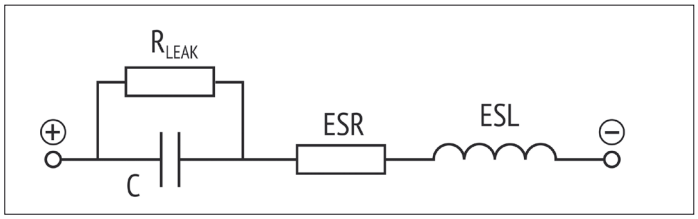

Bild 2: Ersatzschaltbild des Elektrolytkondensators

Der ESR (Bild 2) besteht aus der Summe eines relativ konstanten, eines frequenzabhängigen und eines temperaturabhängigen Anteils [2]:

$ESR = R_o + R_d + R_e$

1. Relativ konstanter ohmscher Widerstand von Folie, Anschlussfähnchen und Lötanschlüssen

$R_o \cong const.$ typ. Werte von R_o liegen im Bereich einiger 10 mΩ.

2. Frequenzabhängiger Widerstand der Dielektrikumschicht (Bild 3 (a))

$R_d(f) = D_{ox}/(2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)$

mit D_{ox} = Verlustfaktor der Dielektrikumsschicht
f = Frequenz
C = Kapazität des Elkos

Die Frequenzabhängigkeit beruht auf den dielektrischen Verlusten, die beim Anlegen einer Spannung durch die Ausrichtung von Dipolmomenten innerhalb der Oxidschicht entstehen [3]. Dieser Anteil am ESR fällt infolge der dickeren Oxidschicht (ca. 1,4 nm/V) bei Elkos mit höherer Nennspannung stärker ins Gewicht.
Typische Werte des Verlustfaktors betragen: $D_{ox} = 0{,}06 \ldots 0{,}1$.

3. Der temperaturabhängige Widerstand des Elektrolyten in Verbindung mit dem Wickelpapier (Bild 3 (b)) lässt sich bei einem bekannten Bezugswert für Zimmertemperatur R_e (25 °C) approximieren durch [3]:

$$R_e(T) = R_e(25°C) \cdot 2^{-\left[\frac{T-25}{A}\right]^B}$$

Das System aus Elektrolyt und Wickelpapier hat einen bis zu Faktor 10 höheren Widerstand als der Elektrolyt an sich. Das (nicht leitende) Papier verdrängt zum Teil den (leitenden) Elektrolyten, so dass der für den Stromfluss verbleibende freie Querschnitt sich verringert. Typische Werte für Elkos mit Ethylenglykol-basierten Elektrolyten sind A = 40 und B = 0,6 [3].

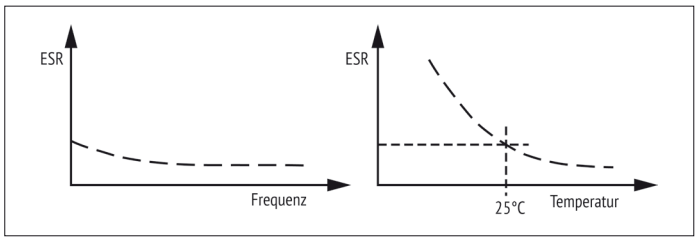

Bild 3: (a) Frequenz- und (b) Temperaturabhängigkeit des ESR

Um die Anwendung des ESR-Wertes zu vereinfachen, der neben Frequenz- und Temperaturabhängigkeit eine kontinuierliche Veränderung über die Zeit zeigt, gibt Jianghai zusätzlich zu den typischen Werten jeweils die maximalen ESR-Werte in den Datenblättern an. Diese maximalen ESR-Werte sollten bei der Auslegung von Schaltungen berücksichtigt werden, damit ein robustes Design entsteht.

Ripplestrom

Durch die in den meisten Anwendungen vorliegende Brumm- bzw. Wechselspannungsüberlagerung der am Elko anliegenden Gleichspannung kommt es zu Rippleströmen und einer Erwärmung des Elkos. In die folgenden Betrachtungen geht der Effektivwert (quadratische Mittelwert) der gewichteten Rippleströme ein, denn Ströme aller Frequenzen tragen ihren Anteil zum Entstehen der Wärmeleistung bei [8]:

$$I_A = \sqrt{\left(\frac{I_{f1}}{F_{f1}}\right)^2 + \left(\frac{I_{f2}}{F_{f2}}\right)^2 + \cdots + \left(\frac{I_{fn}}{F_{fn}}\right)^2}$$

I_A	Effektivwert der gewichteten Rippleströme
$I_{f1} \ldots I_{fn}$	Effektivwerte der Rippleströme bei den Frequenzen $f_1 \ldots f_n$
$F_{f1} \ldots F_{fn}$	Korrekturfaktoren für den Strom bei Frequenzen $f_1 \ldots f_n$
$F_{fi} = \sqrt{\frac{ESR(f_0)}{ESR(f_i)}}$	mit f_0= Bezugsfrequenz des Nominal-Ripplestromes

Die Korrekturfaktoren für Ströme unterschiedlicher Frequenzen haben ihren Ursprung in der Frequenzabhängigkeit des ESR. Um die praktische Anwendung zu vereinfachen, werden im Datenblatt direkt Stromkorrekturfaktoren angegeben und nicht etwa nur das Verhältnis der ESR-Werte bei der vorliegenden Frequenz zur Frequenz des Nenn-Ripplestromes. Da die Frequenzabhängigkeit des ESR für Elkos unterschiedlicher Nennspannung variiert, sind die im Datenblatt tabellierten Korrekturfaktoren oft nach Spannungsbereichen unterteilt.

Eigenerwärmung von Elkos im Betrieb

Im Betrieb erwärmen sich Elkos über die Umgebungstemperatur hinaus. Dabei übersteigt ihre Kerntemperatur die Temperatur an der Elko-Oberfläche und es stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen zugeführter elektrischer Leistung P_{el} und der an die Umgebung abgegebenen Wärme P_{th} ein.

$P_{el} = P_{th}$

Die wesentlichen Mechanismen zur Kühlung von Elkos sind Wärmestrahlung und (freie oder erzwungene) Konvektion (Bild 4). Der Anteil der Wärmestrahlung übertrifft bei größeren Bauformen in der Regel den der Konvektion (es sei denn, dass durch Ventilation eine Zwangskonvektion eingestellt wird).

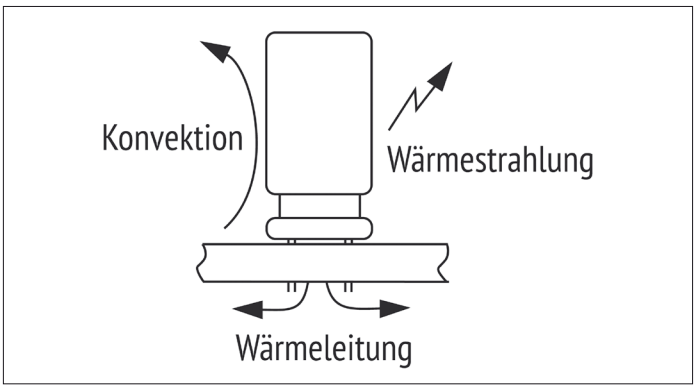

Bild 4: Kühlungsmechanismen von Elkos

Die Fähigkeit, Wärme im infraroten Spektralbereich abzustrahlen, hängt von der Materialbeschaffenheit der Elko-Mantelfläche A ab: bezogen auf

einen schwarzen Strahler hat ein Elko mit Schrumpfschlauchisolierung einen Strahlungskoeffizienten von ε = 0,85 während ein blanker Elkobecher lediglich auf einen Wert von ε = 0,4 kommt [5]. Die Farbe des Schrumpfschlauches im sichtbaren Wellenlängenbereich (ca. 400 ~ 700 nm) ist dabei unerheblich.

Für die Wärmestrahlung gilt das Stefan-Boltzmann'sche Strahlungsgesetz:

Bei freier Konvektion gilt

$$P_{rad} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_a^4) = h_{rad} \cdot A \cdot \Delta T$$

mit:	$\varepsilon \cong 0{,}85$	Strahlungskoeffizient
	$\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$	Stefan-Boltzmann Konstante
	A	Elko-Mantelfläche (o. Dichtung)
	$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s + T_a)(T_s^2 + T_a^2)$	Wärmeübergangszahl Strahlung
	T_s	Oberflächentemperatur Elko
	T_a	Umgebungstemperatur
	$\Delta T = T_s - T_a$	Erwärmung

Bei freier Konvektion gilt

$$P_{conv} = h_{free} \cdot A \cdot \Delta T$$

mit	$h_{free} = 1{,}32 \cdot \left[\frac{\Delta T}{D}\right]^{1/4}$	Wärmeübergangszahl Konvektion
	D	Elko-Durchmesser

Im Fall der freien Konvektion ergeben sich in Verbindung mit der Strahlungswärme typische Gesamtwärmeübergangszahlen von

$$h_{tot} = h_{free} + h_{rad} \cong 13{,}5 \sim 17 \frac{W}{m^2K}$$

Bei Zwangsbelüftung mit der Strömungsgeschwindigkeit v (in m/s) gilt näherungsweise für die gesamte Wärmeübergangszahl (unter Berücksichtigung von Strahlung und Konvektion) [5]:

$$h_{tot} \cong 5 + 17 \cdot [v + 0{,}1]^{0{,}66}$$

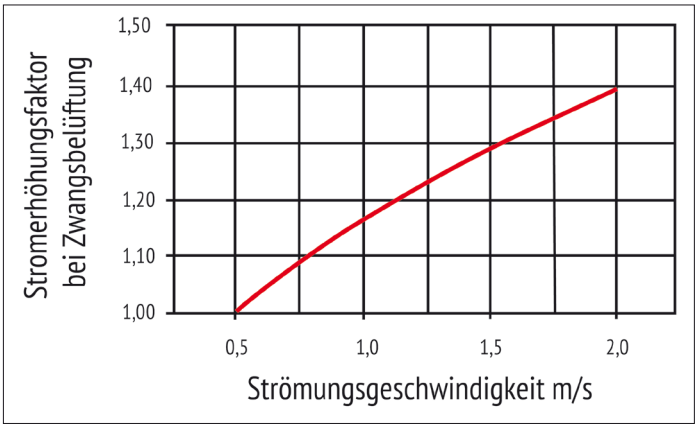

Bild 5: Erhöhung der Strombelastbarkeit durch Zwangskühlung

Durch eine Zwangsbelüftung mit Strömungsgeschwindigkeiten von v = 1 ~ 2 m/s lässt sich der Anteil der Konvektion an der Kühlung des Elkos deutlich gegenüber der freien Konvektion Formel (v <= 0,5 m/s) erhöhen (Bild 5).

Der Beitrag der Wärmeleitung zur Kühlung von Elkos spielt lediglich bei sehr kleinen, axialen Bauformen und bei Flüssigkeitskühlung eine Rolle. Die äquivalenten thermischen Übergangswiderstände der einzelnen Kühlungsmechanismen lassen sich grob vereinfacht zusammenfassen zu einem gemeinsamen thermischen Widerstand R_{th}. Damit ergibt sich für die Temperaturerhöhung ΔT eines Elkos mit der Mantelfläche A beim Anlegen eines Ripplestromes I:

$$\Delta T = I^2 \cdot ESR \cdot R_{th}$$

mit $$R_{th} = \frac{1}{h_{tot} \cdot A}$$

Der nächste Schritt bei der Betrachtung der thermischen Verhältnisse von Elkos ist die Ermittlung der Kerntemperatur, denn diese ist der wichtigste Parameter zur Abschätzung der Lebensdauer eines Elkos. Die Kerntemperatur T_c lässt sich abschätzen mit

$$T_c = \Delta T \cdot \frac{R_{th}^{innen}}{R_{th}} + T_s$$

wobei die zusammengefassten thermischen Widerstände des Elko-Wickels in axialer und radialer Richtung bei den Produkten von Jianghai ungefähr in der Größenordnung von

$$R_{th}^{innen} \cong 1 \sim 3 \frac{K}{W}$$

liegen.

In der Praxis kann im Bereich radialer und kleiner Snap-in Elkos (bis zu Durchmessern von 25 mm) die Kerntemperatur durch eine Messung der Temperatur am Becherboden des Elkos genähert werden. Bei größeren Elkos empfiehlt sich der Einbau eines Thermoelementes zur direkten Messung der Kerntemperatur. Elkos mit eingebautem Thermoelement sind von Jianghai verfügbar.

Chemische Stabilität

Moderne Elektrolytsysteme sind Vielstoffgemische, deren chemische Stabilität während der Nutzung des Elkos erwünscht ist. Ein Indikator für die Stabilität von Elkos ist die „Shelf Life" (Tabelle 1, rechte Spalte). Im Gegensatz zur normalen Lagerung bei moderaten Temperaturen ist der Shelf Life Test ein anspruchsvoller, beschleunigter Lebensdauertest, der die spannungslose Lagerung von Elkos bei ihrer oberen Kategorietemperatur für eine bestimmte Dauer vorsieht. Ohne eine am Elko anliegende Betriebsspannung entfällt seine Möglichkeit zur Selbstheilung, was diesem Test seine besondere Schärfe gibt. Bei Testende müssen Leckstrom, Kapazitätsverlust und Verlustfaktor innerhalb vordefinierter Änderungsgrenzen liegen. Ein hoher Zahlenwert für die Shelf Life ist ein guter Indikator für chemische Stabilität des Elektrolytsystems, hohe Reinheit der verwendeten Materialen und die gute Qualität der Verarbeitung. Die Ergebnisse dieses Tests werden in den Datenblättern sämtlicher Baureihen von Jianghai dargestellt.

Zuverlässigkeit und Lebensdauer

Zuverlässigkeit und Lebensdauer ermöglichen es, Antworten auf die Fragen „Wie viele Elkos fallen während der Nutzungsdauer meiner Applikation aus?" und „Wie lange überleben die Elkos in meiner Applikation?" zu finden. Diese beiden Fragestellungen sind zwar unterschiedlich, aber nicht völlig unabhängig voneinander zu beantworten.

Der typische Verlauf der zeitlichen Entwicklung der Zuverlässigkeit von Elektrolytkondensatoren wird durch die sog. „Badewannenkurve" charakterisiert [6]. Die Ausfallrate („Fitrate") λ gibt die Anzahl von Ausfällen je Zeiteinheit an (die Maßeinheit FIT = „Failures in Time" bezeichnet die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte in (10^{-9} Ausfällen)/h). Die Badewannenkurve in Bild 6 hat drei zeitlich aufeinanderfolgende Abschnitte:

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

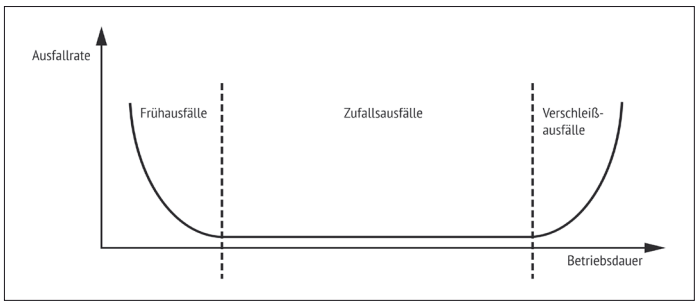

Bild 6: Zeitliche Entwicklung der Ausfallrate

Bei der Herstellung von Elektrolytkondensatoren erfolgt durch die Formierung der Kondensatoren im Werk gleichsam ein „Burn-in“, so dass Frühausfälle in der Anwendung eine sehr seltene Ausnahme sind [1].

Für die weiteren Betrachtungen gehen wir davon aus, dass der Elko stets im Zeitbereich konstanter Fitraten und in einem zulässigen Arbeitspunkt betrieben wird. „Zulässige Arbeitspunkte“ sind gekennzeichnet durch eine geeignete Kombination von Spannung, Polarität, Umgebungstemperatur, Ripplestrom, mechanischer Belastung und „sauberer“ Umgebung (Abwesenheit von chemisch aggressiven Stoffen in der Nähe des Elkos).

Das Ende der Lebensdauer ist erreicht, wenn vordefinierte Driftgrenzen überschritten werden. Üblich ist es auch, im Rahmen einer statistischen Betrachtung einer bestimmten Anzahl von Produkten eine Überschreitung dieser Grenzen zu gestatten. Änderungsausfälle führen im Gegensatz zu Totalausfällen nicht zu einem Verlust der Funktion des Elkos, jedoch sollte die Schaltung so dimensioniert sein, dass sie auch beim Erreichen der Änderungsgrenzen noch funktioniert.

Es existieren mehrere Definitionen und verschiedene Begriffe zur Beschreibung der Elko-Lebensdauer:

1. Endurance

Das Verfahren zur Durchführung des Endurance Tests ist in der IEC60384-4 beschrieben: die Elkos werden bei Nennspannung, oberer Kategorietemperatur, mit oder ohne Ripplestrom betrieben und die zeitliche Entwicklung ihrer elektrischen Parameter (Kapazität, ESR und Leckstrom) aufgezeichnet.

2. Brauchbarkeitsdauer

Der Begriff Brauchbarkeitsdauer geht auf ein (inzwischen geändertes) deutsches Vorwort zur DIN IEC 60384-4 zurück [1]. Die Durchführung des Tests zur Ermittlung der Brauchbarkeitsdauer (engl. „useful life“) orientiert sich am normalen Einsatz von Elkos in der Anwendung: zusätzlich zur Gleichspannung und oberen Kategorietemperatur wird eine Wechselspannung überlagert, die durch die auftretenden Rippleströme zu einer Eigenerwärmung des Elkos und damit zu einer zusätzlichen Wärmebelastung führt. Häufig wird in Verbindung mit der Brauchbarkeitsdauer ein gewisser Prozentsatz von Ausreißern („outlier percentage“), d. h. von Bauteilen außerhalb der Änderungsgrenzen, spezifiziert. Einige Hersteller verwenden hier auch den Begriff „failure rate“ – dieser Begriff ist jedoch leicht mit der FIT-Rate zu verwechseln, so dass Jianghai hier zur Abgrenzung den Terminus „outlier percentage“ nutzt.

Bei der Durchsicht von Datenbüchern unterschiedlicher Hersteller fällt der uneinheitliche Sprachgebrauch auf, durch den beide Begriffe vermischt und mit unterschiedlichen Bezeichnungen versehen werden. Das Spektrum der Definitionen und Wortschöpfungen erstreckt sich von der Load Life über die Useful Life zur Endurance, von der Life Expectancy über die Operational Life bis hin zur Service Life.

Keine einheitliche Norm

Es existiert keine aktuell gültige, einheitliche Norm, die zur exakten Definition der Bezeichnungen und der mit ihnen assoziierten Änderungsgrenzen verwendet werden könnte. Einen Beitrag zur Vereinheitlichung der Testbedingungen (und damit der verbesserten Vergleichbarkeit von Angaben unterschiedlicher Hersteller) haben die Normungsgremien in den USA geleistet, als die EIA IS-749 („Rectified Mains Application Expected Wear-Out Lifetime Test“) zur Vereinheitlichung der Lebensdauertests für Elkos hinter dem Netzgleichrichter verabschiedet wurde [4].

Bis weiterreichende Normen verfügbar sind, besteht die von Jianghai gewählte Lösung darin, im Datenblatt zusätzlich zu den Begriffen eine vollständige Definition der Testbedingungen und der Änderungsgrenzen anzugeben (Tabelle 1).

Jianghai stellt dem eher als Marketing-Begriff geprägten „Useful Life“ die Angaben zu „Load Life“ und „Endurance“ zur Seite, um die Transparenz für den Anwender zu erhöhen. Die Ergebnisse des „Shelf Life“ Tests als Indikator für die Stabilität vervollständigen das Bild, so dass sich der Anwender auf einfache Weise einen Überblick über die Leistungsfähigkeit der Elko-Baureihe verschaffen kann.

Elko-Lebensdauerdiagramm und Lebensdauermodell

Um den Anwendern Hilfsmittel für die Abschätzung der Lebensdauer von Elkos in einer Applikation zu geben, hat Jianghai Lebensdauerdiagramme und ein Lebensdauermodell für Elkos entwickelt. Während in den Lebensdauerdiagrammen zulässige Betriebspunkte gekennzeichnet sind, berücksichtigt das Lebensdauermodell zusätzlich den Einfluss der Betriebsspannung auf die Lebensdauer. Die Verwendung von Ergebnissen beider Hilfsmittel ist in vielen Applikationen möglich. Individuelle Eigenschaften (z. B. Betrieb im thermischen Grenzbereich, intermittierender Betrieb, irreguläre Kurvenformen für den Ripplestrom, spezielle Elko-Konstruktionen,…) können jedoch dazu führen, dass die vorgestellten Hilfsmittel nur noch eingeschränkt oder nicht mehr anwendbar sind. In jedem Fall ist eine Bestätigung der Ergebnisse durch den Hersteller erforderlich.

ITEM	USEFUL LIFE		LOAD LIFE	ENDURANCE TEST	SHELF LIFE	
Lifetime	7 000h	> 200 000h	5 000h	5 000h	1 000h	
Leakage Current	Not more than specified value		Not more than specified value	Not more than specified value	Not more than specified value	
Capacitance Change	Within ± 30% of initial value		Within ± 20% of initial value	Within ± 20% of initial value	Within ± 20% of initial value	
Dissipation Factor	Not more than 300% of specified value		Not more than 200% of specified value	Not more than 200% of specified value	Not more than 200% of specified value	
Condition: Applied Voltage Applied Current Applied Temperature	U_R I_R 105°C	U_R 1,6 x I_R 40°C	U_R I_R 105°C	U_R I_R = 0 105°C IEC 60384	U_R = 0 I_R = 0 105°C	After test: U_R to be applied for 30 min > 24h before measuremen

Tabelle 1: Vollständige Definition von Testparametern und Änderungsgrenzen

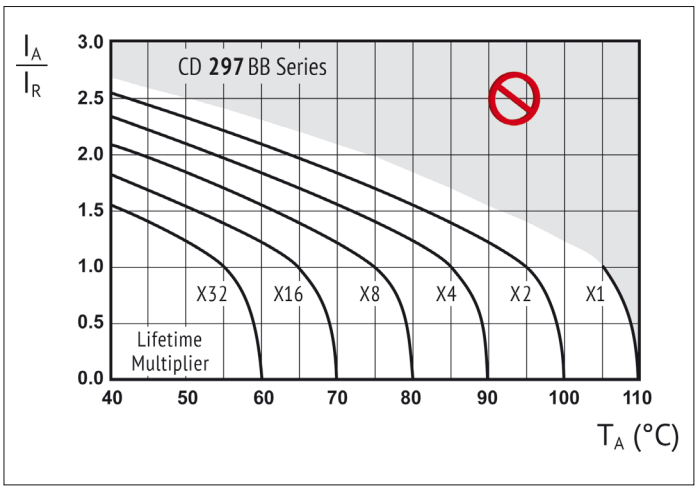

Bild 7: Lebensdauerdiagramm für Elkos der Baureihe CD_297_BB

Endliche Lebensdauer

Der flüssige Elektrolyt im Elko ist die Hauptursache für seine endliche Lebensdauer und die kontinuierliche Drift seiner elektrischen Parameter [7]. Elektrochemische Alterungsvorgänge, die bei steigenden Temperaturen und höheren Spannungen beschleunigt verlaufen, lassen sich jedoch mit Hilfe eines halbempirischen Lebensdauermodells abschätzen. Die in den Datenblättern der Elkos von Jianghai angegebenen Lebensdauerdiagramme leiten sich für viele Baureihen aus dem numerischen Lebensdauermodell ab und zeigen den Bereich zulässiger Kombinationen von Umgebungstemperatur und Ripplestrom im hellen Bereich der durchgezogenen Lebensdauerlinien (Bild 7). Das Lebensdauermodell gestattet die Abschätzung, welche Lebensdauer für einen Elko in einer bestimmten Applikation zu erwarten ist. Als Eingangsgrößen verwendet das Lebensdauermodell neben den Datenblattangaben des Elkos die applikationsbezogenen Parameter wie Umgebungstemperatur, Ripplestrom und die im Betrieb angelegte Spannung. Bei Zwangskühlung ist ein entsprechend der Luftgeschwindigkeit modifizierter Wert für den Ripplestrom zu berücksichtigen.

Struktur des Lebensdauermodells

$$L = L_0 \cdot K_T \cdot K_R \cdot K_V$$

mit L resultierende Lebensdauer
L_0 Lebensdauer bei Nennripple und oberer Kategorietemperatur (Datenblatt)
K_T Temperaturfaktor (Umgebungstemperatur)
K_R Ripplestromfaktor (Eigenerwärmung im Betrieb)
K_V Spannungsfaktor (Betriebsspannung)

Temperaturfaktor K_T

Die Lebensdauer von Elkos folgt im Wesentlichen der fest in der Industrie etablierten „10-Kelvin-Regel“ von Arrhenius: Ein Absenken der Betriebstemperatur um 10 K führt zu einer Verdoppelung der Lebensdauer [1, 3, 4, 6, 9]. Die Formel für K_T lautet:

$$K_T = 2^{\frac{T_0 - T_A}{10K}}$$

mit T_0 obere Kategorietemperatur
T_A Umgebungstemperatur in der Applikation

Ripplestromfaktor K_R

Die Wirkung des angelegten Ripplestromes auf die Eigenerwärmung und damit auf die Lebensdauer des Elkos wird von Jianghai mit der folgenden Formel abgeschätzt:

$$K_R = K_i^{A \cdot \frac{\Delta T_0}{10K}}$$

mit $A = 1 - \left(\frac{I_A}{I_R}\right)^2$

wobei I_A Ripplestrom in der Applikation
I_R Nenn-Ripplestrom bei oberer Kategorietemperatur (Datenblatt)
ΔT_0 Kerntemperaturanstieg des Elkos (typ. 3,5~5 K bei T_0= 105 °C und 3,5~10 K bei T_0= 85 °C)
K_i empirisch gewonnener Sicherheitsfaktor, definiert als
$T_0 = 105°C$: $I > I_R$: $K_i = 4$
$I \leq I_R$: $K_i = 2$
$T_0 = 85°C$: $K_i = 2$

Spannungsfaktor K_V

Für die kleineren Bauformen der radialen Elkos dominiert der durch die Arrheniusgleichung beschriebene, temperaturabhängige Elektrolytverlust das Lebensdauermodell. Für radiale Elkos gilt daher K_V = 1. Bei mittleren (Snap-in) und größeren (Screw Terminal) Bauformen gewinnt dieser Term jedoch an Bedeutung, denn eine gegenüber der maximal zulässigen Nennspannung reduzierte tatsächliche Betriebsspannung führt zu einer geringeren Belastung des Dielektrikums. Die an sich vorteilhaften elektrochemischen Vorgänge zur Selbstheilung von Defekten im Dielektrikum tragen bei hohen Umgebungstemperaturen und Spannungen knapp unterhalb der Nennspannung durch Wasserstoff-Gasbildung und chemische Reaktionen zur beschleunigten Alterung bei. Eine Verringerung der Betriebsspannung kann unter diesen Bedingungen die Lebensdauer des Elkos verlängern [4].

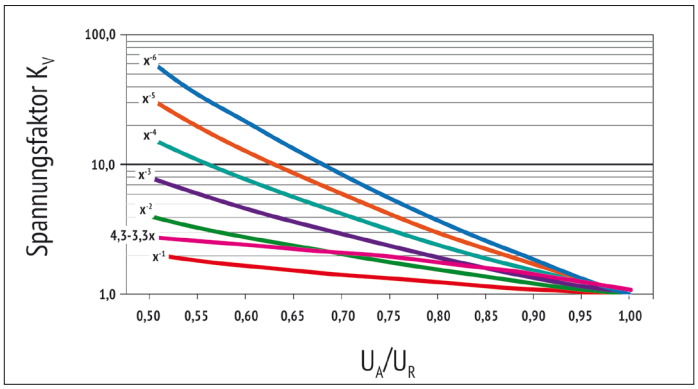

Bild 8: Spannungsfaktoren verschiedener Hersteller im Vergleich [4]

Der Beitrag der Spannungsverringerung zur Verlängerung der Lebensdauer von größeren Hochvolt-Snap-in und Schraubanschlusselkos wird von Jianghai mittels einer empirisch gewonnenen Formel abgeschätzt. Spannungen von weniger als 60 % der Nennspannung werden dabei als praxisfern und somit als nicht weiter lebensverlängernd angesehen. Im Vergleich mit den Modellen anderer Hersteller hat Jianghai sich hier bewusst im „Mittelfeld“ positioniert (Bild 8).

$$K_V = \left(\frac{U_A}{U_R}\right)^{-n}$$

mit U_R Nennspannung
U_A Betriebsspannung
n Exponent, definiert als:

$$0{,}6 \leq \frac{U_A}{U_R} \leq 1 \rightarrow n = 2{,}5$$

$$0 \leq \frac{U_A}{U_R} < 0{,}6 \rightarrow K_V = 3{,}59$$

Beispiel für eine Lebensdauerabschätzung

Das folgende Beispiel dient einer Illustration der praktischen Anwendung von Lebensdauerdiagramm und Lebensdauermodell.

Ein 105°C-Elko 390 µF, 400 V, 35x45 mm aus der Snap-in Baureihe CD_297_BB von Jianghai soll bei einer Umgebungstemperatur von T_A = 55 °C mit einem Ripplestrom von 2,51 A_{rms} und einer Frequenz des Ripples von 20 kHz betrieben werden. Die Spannung am Elko betrage 400 V, sodass lediglich Umgebungstemperatur und Ripplestrombelastung in die Lebensdauerbetrachtung eingehen. Die Kühlung erfolge durch freie Konvektion.

Im Datenblatt sind ein Nenn-Ripplestrom von 1,27 A_{rms} bei 120 Hz und 105 °C sowie ein Frequenzkorrekturfaktor von 1,4 für Frequenzen des Ripplestromes oberhalb von 10 kHz und Nennspannungen von 315 ~ 450 V spezifiziert. Die Lebensdauer im Sinne der „useful life" ist mit 7.000 h angegeben.

Das Verhältnis des tatsächlichen, auf 120 Hz skalierten Ripples zum Nenn-Ripple beträgt

$$\frac{I_A}{I_R} = \frac{\frac{2{,}51 A_{rms}}{1{,}4}}{1{,}27 A_{rms}} = 1{,}41$$

Das Ablesen des Lebensdauerfaktors am Schnittpunkt von Betriebsripple/Nennripple und Umgebungstemperatur in Bild 9 ergibt ungefähr einen Wert von 16. Daraus folgt eine geschätzte Lebensdauer „useful life" des Elkos in der Applikation von

$$L = L_0 \cdot 16 = 7.000\ h \cdot 16 = 112.000\ h \cong 13\ Jahre$$

Alternativ lässt sich die Lebensdauer auch unter Verwendung des Lebensdauermodells numerisch ermitteln:

$$L = L_0 \cdot K_T \cdot K_R \cdot K_V$$

$$= L_0 \cdot 2^{\frac{T_0 - T_A}{10K}} \cdot K_i^{\left[1-\left(\frac{I_A}{I_R}\right)^2\right] \cdot \frac{\Delta T_0}{10K}} \cdot \left(\frac{U_A}{U_R}\right)^{-n}$$

Einsetzen von

$L_0 = 7.000\ h$

$T_0 = 105\ °C$

$T_A = 55\ °C$

$K_i = 4$

$I_A = \frac{2{,}51 A_{rms}}{1{,}4} = 1{,}79\ A_{rms}$

$I_R = 1{,}27\ A_{rms}$

$\Delta T_0 = 5\ K$

$U_R = U_A$: $\quad 0{,}6 \leq \frac{U_A}{U_R} \leq 1 \rightarrow n = 2{,}5$

ergibt

$$L = 7.000h \cdot 32 \cdot 0{,}5 \cdot 1$$
$$= 7.000\ h \cdot 16 = 112.000\ h \cong 13\ Jahre$$

Ergebnis der numerischen Abschätzung entspricht dem der graphischen Lösung unter Verwendung des Lebensdauerdiagramms.

Zusammenfassung

Aluminium-Elektrolytkondensatoren bestimmen über ihre Lebensdauer die Brauchbarkeitsdauer 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 elektrischen und thermischen Parameter sowie die Definitionen von Zuverlässigkeit und Lebensdauer werden erläutert. Als Hilfsmittel zur Lebensdauerabschätzung stehen graphische (Lebensdauerdiagramme) und numerische (Lebensdauermodell) Methoden zur Verfügung. Die Anwendbarkeit der allgemein formulierten Modelle und ihrer Ergebnisse hängen im Einzelfall von der Baureihe und der Applikation ab. Daher ist eine intensive Projektbegleitung und Bestätigung der Abschätzungen durch den Elko-Hersteller immer erforderlich.

Ein praktisches Beispiel zeigt, wie man die vorgestellten Hilfsmittel anwenden kann, um zu einer applikationsspezifischen Lebensdauerabschätzung zu kommen. ◀

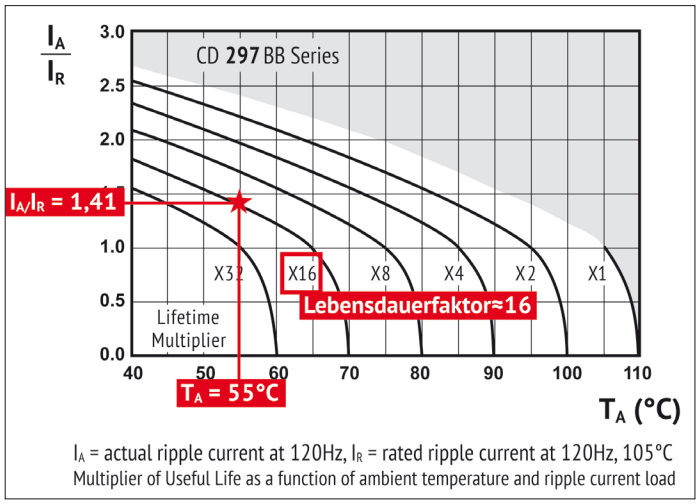

Bild 9: Der Schnittpunkt der Betriebspunktparameter führt zum Lebensdauerfaktor

Literatur

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

[2] Gasperi, M. L., A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors, IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, October 5-9, 1997

[3] Mirsky, G., Determining end-of-life, ESR, and lifetime calculations for electrolytic capacitors at higher temperatures, EDN, August 20, 2008

[4] Parler, S.G., Deriving Life Multipliers for Aluminum Electrolytic Capacitors, IEEE Power Electronics Society Newsletter, vol. 16, no.1, 11-12, February 2004

[5] Parler, S.G., Thermal Modeling of Aluminum Electrolytic Capacitors, IEEE Industry Applications Society Conference, October 1999

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

[7] Thiesbürger, K.H., Der Elektrolytkondensator, Roederstein, Landshut, 1991

[8] van de Steeg, T., Selecting electrolytic capacitors for power supplies, DATAWEEK Electronics & Communications Technology, Issue February 28, 2001

[9] 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)