



**CAPACITOR
COMPETENCE**
since 1958

ELKO-LECKSTROM

Fachartikel von Dr. Arne Albertsen



ENGINEERED SOLUTIONS

JIANGHAI EUROPE
Electronic Components GmbH

Elko-Leckstrom

Dr. Arne Albertsen, Jianghai Europe Electronic Components GmbH

Einleitung

Aluminium-Elektrolytkondensatoren („Alu-Elkos“, „Elkos“) stellen einen wichtigen Bestandteil vieler Geräte der Leistungselektronik 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. Während frühere Beiträge des Autors einen Überblick über Elkos [1] gaben sowie die Themen Lebensdauerabschätzung [2], Zuverlässigkeit [3] und Grenzen der Spannungsfestigkeit [4] beleuchteten, geht der vorliegende Artikel auf den Elko-Leckstrom ein.

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 aus Aluminium mit einer dünnen Dielektrikumsschicht aus Aluminiumoxid wird dabei vollflächig von einer passgenauen Kathode, der Elektrolytflüssigkeit, kontaktiert (Abb. 1).

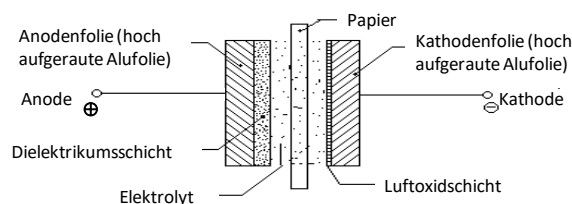


Abb. 1: Innerer Aufbau eines Alu-Elkos

Ein elektrochemisches Verfahren mit der Bezeichnung „anodische Oxidation“ bzw. „Formierung“ erzeugt die Dielektrikumsschicht auf der Oberfläche der aufgerauten Anodenfolie. Die Güte der Formierung bzw. Aufbau und Schichtdicke des Dielektrikums sind dabei wesentliche Schlüssel für eine hohe Zuverlässigkeit der Elkos im Betrieb. Abbildung 2 zeigt eine elektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche einer geätzten Hochvolt-Anodenfolie.

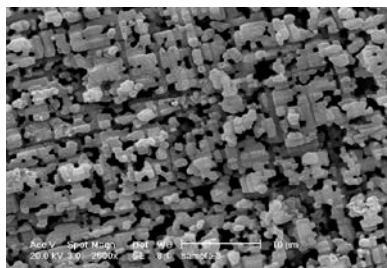


Abb. 2: Oberfläche einer geätzten Anodenfolie

Abbildung 3 zeigt den Schichtaufbau des Dielektrikums im Querschnitt. Auf die Aluminiumfolie ① folgt zunächst eine Schicht amorphen Aluminiumoxids ②, der sich eine kristalline ③ und schließlich eine hydratisierte Schicht ④ anschließen.

Die kompakten Moleküle der amorphen Schicht ② weisen nur einen losen Verbund auf, d.h. sie haben nur geringe Wechselwirkungen untereinander. Dies ist vorteilhaft, wenn ein durch den Ripplestrom aufgeprägtes Feld sie anregt, denn in diesem Fall wird weniger Wärme dissipiert als bei fester gekoppelten Molekülen. Die „Reibung“ untereinander fällt gering aus.

Die ebenfalls kompakten Moleküle in der kristallinen Schicht ③ sind enger angeordnet und bieten einen guten Isolationswiderstand, der kleine Leckströme begünstigt.

Die großen Moleküle der Hydratschicht ④ lassen sich leicht polarisieren und erzeugen im Wechselfeld relativ viel „Reibungsverluste“. Bei erhöhter Temperatur lösen sich zudem Wassermoleküle aus der Hydratschicht, was u.a. zu einer Schwächung der kristallinen Schicht ③ und damit zu einem Anstieg des Leckstromes führt.

Ein Ziel bei der Entwicklung von neuen Anodenfolien ist daher auch eine dünnere Hydratschicht bei einer gleichzeitig dickeren amorphen Schicht. Jianghai verfügt dank seiner Strategie der vertikalen Integration über eigene Werke zur Formierung des Anodenmaterials und kann daher die Technologie der Folien optimieren.

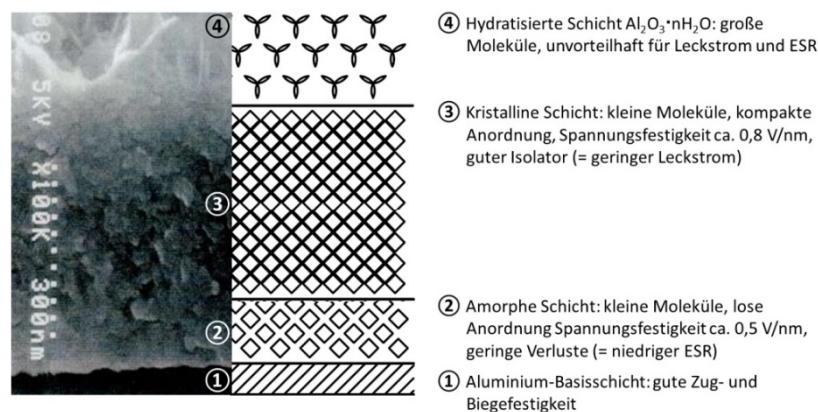


Abb. 3: Schichtaufbau des Aluminiumoxid-Dielektrikums eines Hochvolt-Elkos (links: Elektronenmikroskop-Aufnahme, rechts: schematische Darstellung)

Leckstrom

Eine wesentliche Ursache des Leckstromes von Elkos sind Fehlstellen im Dielektrikum der Anode. Fehlstellen resultieren z.B. aus Kristallbaufehlern, der Anwesenheit von Fremdatomen in der Aluminium-Basissschicht, mechanischen Spannungsrissen (vom Wickeln), fertigungsbedingten Beschädigungen (Zuschnitt der Folie, genietete Verbindungen mit den Anschlussföhnchen) und Anlösungen der Oxidschicht durch den Elektrolyten [5].

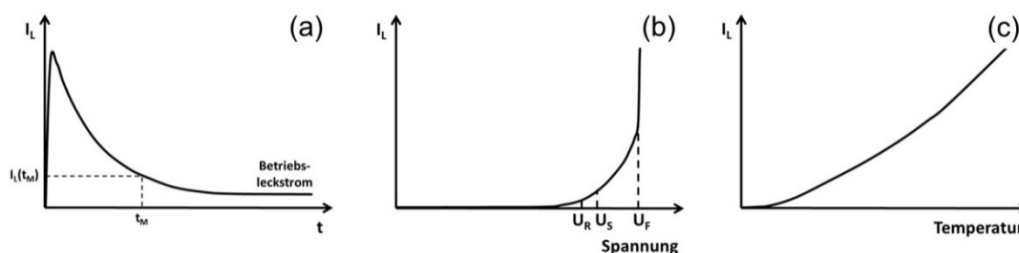


Abb. 4: Elko-Leckstrom in Abhängigkeit von (a) Zeit, (b) Spannung und (c) Temperatur

Kleinere Beiträge zum Leckstrom leisten die dielektrische Absorption, Querströme außerhalb des Elko-Wickels sowie Tunneleffekte [6]. Innerhalb weniger Minuten an Spannung klingt der Elko-Leckstrom in etwa exponentiell ab und nimmt einen fast konstanten Wert, den Betriebsleckstrom an (Abb. 4 (a)).

Der Betriebsleckstrom [5] als Maß für den Formierzustand der Anodenfolie hängt von der Zeit, angelegter Spannung, Temperatur und Vorgeschichte des Kondensators ab (Abb. 4 (a) ~ (c)). Typische Werte des Betriebsleckstromes können ca. 5 ~ 15% vom Datenblattwert des Leckstromes betragen und stellen sich in der Regel bereits nach mehreren zehn Minuten kontinuierlichen Betriebs ein.

Lagerung von Elkos

Der im Datenblatt spezifizierte Leckstrom soll auch nach längerer, spannungsloser Lagerung eingehalten werden – und hat daher auch einen wesentlich höheren Zahlenwert als der Betriebsleckstrom. In Abhängigkeit von Temperatur und Elektrolyt-Zusammensetzung löst sich die Oxidschicht teilweise mehr oder weniger auf, denn ohne angelegte Spannung kann sich die Oxidschicht nicht regenerieren („Selbstheilung“) [5].

Zu Wartungszwecken eingelagerte Geräte sollen daher von Zeit zu Zeit betrieben werden. Die Zeiträume für einen „Regenerationsbetrieb“ hängen von den eingesetzten Elkos ab und liegen typischerweise im Bereich von mehreren Jahren.

Bei neuen, noch nicht bestückten und gelöteten Elkos empfiehlt Jianghai, einen Zeitraum von zwölf Monaten nach dem Eintreffen beim Endanwender bis zur Verarbeitung und Nutzung nicht zu überschreiten. Eine längere Lagerung kann die Verarbeitbarkeit beim Löten beeinträchtigen bzw. zu erhöhten Leckströmen beim ersten Betrieb führen. In Abhängigkeit von der Baureihe und den Umgebungsbedingungen bei der Lagerung können längere Lagerdauern individuell vereinbart werden.

Während Niedervolt-Elkos (bis 100V Nennspannung) mit lösemittel-basierten Elektrolytsystemen in der Regel sehr stabil sind, können Hochvolt-Elkos (ab 160V Nennspannung) mit Ethylenglykol-basierten Elektrolyten und insbesondere sogenannte „Low ESR“-Typen mit wasserhaltigen Elektrolyten einen Anstieg der Leckströme ausprägen.

Ein ca. 15 ~ 30 minütiger Betrieb der Elkos an einer über Widerstände (Niedervolt: 100Ω, Hochvolt: 1kΩ, vgl. [7], Abschnitt 4.1 „Vorbehandlung“) zugeführten, schrittweise auf Nennspannung erhöhten Spannung kann in diesem Fall eine weitgehende Ausheilung der geschwächten Stellen im Dielektrikum bewirken und den Leckstrom wieder unter den Datenblattwert senken.

Symmetrierung – alles in Balance

Bei einer Serienschaltung von Elkos teilt sich die Spannung im Verhältnis der Isolationswiderstände der Kondensatoren (bzw. im Verhältnis der reziproken Leckströme der Kondensatoren) auf [8].

Um eine gleichmäßige Aufteilung der Spannung zu gewährleisten, sollte der Ruhestrom I_0 durch einen Spannungsteiler aus Widerständen in Abb. 5 den (Betriebs-) Leckstrom um ein Mehrfaches übersteigen. Die Verwendung von Elkos aus einem Fertigungslos ist dabei vorteilhaft, denn diese weisen in der Regel geringere Abweichungen der Leckströme aus als Elkos aus verschiedenen Fertigungslosen.

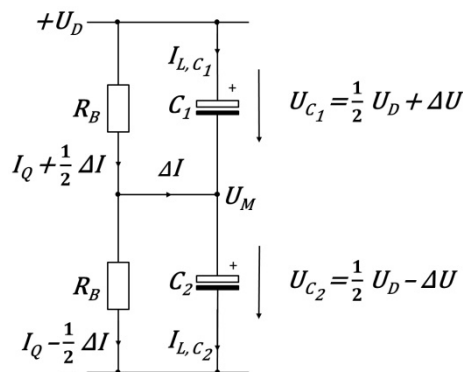


Abb. 5: Passive Symmetrierung der Elko-Spannungen mit Widerständen (nach [9])

Die Mittelpunktspannung ergibt sich nach [8] zu:

$$U_m = \frac{(I_{L,C_2} - I_{L,C_1}) \times R_B}{2} + \frac{U_D}{2} \quad (1)$$

Gleichung (1) zeigt, dass die Mittelpunktspannung U_m vom gewünschten Idealwert $U_D/2$ um einen Wert abweicht, der proportional zu dem Widerstandswert und der Leckstromdifferenz verläuft.

Zur Dimensionierung der Symmetrierwiderstände R_B gilt es, einen guten Kompromiss zwischen geringer Verlustleistung und noch akzeptabler Spannungsdifferenz zu finden.

Als Schätzwert für die Leckstromdifferenz der Elkos bei oberer Kategorietemperatur gilt laut [8] Gleichung (2):

$$I_{L,C_2} - I_{L,C_1} = \frac{0,003 \times C \times U_D}{2000} \left[\frac{\text{mA}}{[\mu\text{F} \times \text{V}]} \right] \quad (2)$$

Auflösen von Gleichung (1) nach R_B und Einsetzen des Terms für $I_{L,C_2} - I_{L,C_1}$ aus (2) ergibt:

$$R_B = \frac{2000 \times (2 \times U_m - U_D)}{0,003 \times C \times U_D} \quad [\mu\text{F} \times \text{k}\Omega] \quad (3)$$

Für ideale Symmetrierwiderstände mit identischen Widerstandswerten könnte man die Mittelpunktspannung U_m der Elko-Nennspannung gleichsetzen. Reale Widerstände sind jedoch mit einer Toleranz behaftet, so dass auch die Mittelpunktspannung vom Idealwert der halben Zwischenkreisspannung abweicht. Bei einer Toleranz der Widerstandswerte von z.B. $\pm 5\%$ ergibt sich im ungünstigsten Fall eine Abweichung der Mittelpunktspannung vom Idealwert von nahezu 10% [8]. Es empfiehlt sich daher für die Auslegung einer passiven Symmetrierung, eng tolerierte Widerstände zu verwenden und eine Mittelpunktspannung unterhalb der Nennspannung der eingesetzten Elkos zu wählen.

Die Qual der Wahl: Zwischenkreis-Topologien

Bei einer Parallelschaltung mehrerer Zweige aus in Serie geschalteten Elkos ergibt sich zudem noch die Frage nach der Topologie für die Symmetrierschaltung: sollen alle Zweige einzeln symmetriert werden (Abb. 6a) oder aber die Mittelpunkte aller Zweige miteinander verbunden werden und eine

zentrale Symmetrierung (Abb. 6b) erfolgen – oder sollen die Kondensatoren in Gruppen symmetriert werden (Abb. 6c)?

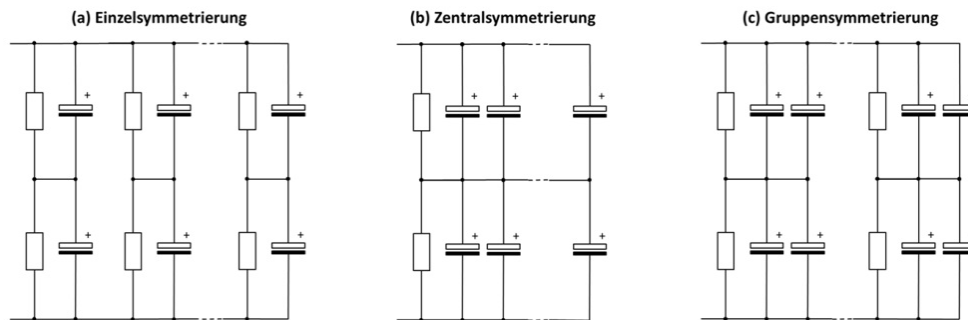


Abb. 6: Topologien von passiven Symmetrierschaltungen für Elko-Spannungszwischenkreise

Jede dieser Topologien (a) ~ (c) hat spezifische Vor- und Nachteile [8]:

(a) Einzelsymmetrierung

Vorteil: Bei Ausfall eines Elkos durch Kurzschluss erfährt nur ein weiterer Elko im Zweig des defekten Elkos eine Beschädigung durch Überspannung. Die übrigen Elkos in der Bank bleiben zunächst unberührt vom Ausfall eines Zweigs der Bank.

Nachteil: Es entsteht ein höherer Schaltungsaufwand mit mehr Widerständen und Verbindungen (und damit einem höheren Platzbedarf und Kosten).

(b) Zentralsymmetrierung

Vorteile: Im stationären Zustand nähern sich die mittleren Kapazitäts- und Leckstromwerte der oberen und unteren Zwischenkreishälfte aneinander an. Es kommen nur zwei Widerstände zum Einsatz, die durch die nahezu gleichen Leckstromwerte von oberer und unterer Zwischenkreishälfte höhere Ohmwerte haben dürfen bzw. sogar wegfallen können.

Nachteile: Bei Ausfall eines Elkos durch Kurzschluss können mehrere weitere Elkos durch Überspannung beschädigt werden. Eine gleichmäßige Aufteilung der Ströme auf die einzelnen Zweige erfordert eine sorgfältige Leiterführung zu den Elko-Anschlüssen sowie eine homogene Umgebungstemperatur im Bereich des Elko-Zwischenkreises.

(c) Gruppensymmetrierung

Abbildung 6c) zeigt eine mögliche Kombination aus (a) Einzel- und (b) Gruppensymmetrierung, die Vor- und Nachteile der Einzelvarianten vereint.

Alternativ zur passiven Symmetrierung finden auch Schaltungen zur aktiven Symmetrierung Einzug in die (Groß-) Umrichtertechnik. Das aktive Schaltungskonzept, das zum Beispiel in Kaskode-Spannungsfolger-Topologie ausgeführt werden kann, bietet einige Vorteile [9]:

- Es können Widerstände mit kleineren Verlustleistungen eingesetzt werden
- Energiekostensparnis über die Betriebsdauer des Umrichters
- Bessere Ausgleichsgenauigkeit im stationären Zustand
- Kostengünstige Lösung

Ein Nachteil der aktiven Symmetrierung ist jedoch, dass beim Abschalten des Umrichters keine selbsttätige Entladung des Spannungszwischenkreises eintritt. Die sichere Entladung des Zwischenkreises nach dem Abschalten muss daher auf anderem Wege gewährleistet werden.

Zusammenfassung

Aluminium-Elektrolytkondensatoren haben konstruktionsbedingt die Besonderheit eines im Betrieb auftretenden Leckstromes, der vor allem für die sog. „Selbsteilung“ sorgt. Der Leckstrom hängt unmittelbar mit dem Aufbau der Dielektrikumsschicht zusammen. Eine nähere Betrachtung der Dielektrikumsschicht zeigt, dass diese aus verschiedenen Schichten von Aluminiumoxid besteht, deren Eigenschaften sich durch eine geeignete Prozessführung beim Formieren des Anodenmaterials vorteilhaft beeinflussen lassen. Bei Elkos für anspruchsvolle Anwendungen sind Anbieter wie Jianghai, die über eine eigene Formierung der Anodenfolien verfügen, technisch besser gestellt.

Der Leckstrom hängt ab von der Betriebsdauer, der Betriebsspannung, der Temperatur sowie von der Vorgeschichte des Elkos. Die Dauer einer spannungslosen Lagerung von Elkos ist zeitlich begrenzt. Die Streuung der Leckströme von Elkos, selbst wenn diese aus demselben Fertigungslos stammen, ist derart hoch, dass sie eine Symmetrierung der Spannungsabfälle über einer Serienschaltung von Elkos erfordert. Der Artikel stellt die Methode der passiven Symmetrierung dar und gibt praktische Hinweise zur Dimensionierung. Abschließend verweist der Artikel auf eine Methode zur aktiven Symmetrierung und gibt Literaturhinweise zur Vertiefung.

Die Anwendbarkeit der hier formulierten Modelle und ihrer Ergebnisse hängen im Einzelfall von der Baureihe und der Applikation ab. Daher ist immer eine intensive Projektbegleitung und Bestätigung der Abschätzungen durch den Elko-Hersteller erforderlich.

Literatur

- [1] Albertsen, A., Elko-Grundlagen: Das „1 x 1“ für Entwickler, Elektronik Components Oktober 2016, 35-39 (2016)
- [2] Albertsen, A., Lebe lang und in Frieden! Hilfsmittel für eine praxisnahe Elko-Lebensdauerabschätzung, Elektronik Components 2009, 22-28 (2009)
- [3] Albertsen, A., Auf eine sichere Bank setzen – Zuverlässigkeit von Elektrolytkondensatoren, Elektronik Components 2010, 14-17 (2010)
- [4] Albertsen, A., Gebührenden Abstand einhalten! – Spannungsfestigkeitsbetrachtungen bei Elektrolytkondensatoren, Elektronik Power, 54-57 (2011)
- [5] Thiesbürger, K.H., Der Elektrolytkondensator, Roederstein, Landshut (1991)
- [6] Both, J., Stromsparer – Reststromverhalten moderner Elektrolytkondensatoren, BCcomponents, Hamburg (2001)
- [7] DIN EN 60384-4:2017-04, Festkondensatoren zur Verwendung in Geräten der Elektronik – Teil 4: Rahmenspezifikation – Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren mit festen (MnO₂) und flüssigen Elektrolyten, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin (2017)
- [8] CLC/TR 50454:2008, Guide for the application of aluminium electrolytic capacitors, CENELEC, Brüssel (2008)
- [9] Ertl, H., Wiesinger, T., Kolar, J.W., Active voltage balancing of DC-link electrolytic Capacitors, IET Power Electronics, 2008, Vol. 1, No. 4, pp. 488–496 (2008)

Unternehmen

Die Jianghai Europe Electronic Components GmbH mit Sitz und Warenlager in Krefeld und Kempen unterstützt die europäischen Kunden der Nantong Jianghai Capacitor Co., Ltd. (Jianghai) in Nantong, China. Jianghai wurde im Jahre 1958 gegründet. Während Jianghai am Anfang vor allem spezielle chemische Produkte (wie z.B. Elektrolytsysteme) entwickelte und produzierte, kamen ab 1970 Aluminium-Elektrolytkondensatoren und geätzte und formierte Anodenfolien hinzu. Folien-, Polymer-, Doppelschicht und Lithium-Ionen Kondensatoren komplementieren das Produktportfolio. Jianghai ist der größte chinesische Elko-Hersteller und zählt im weltweiten Vergleich zu den drei führenden Herstellern von Snap-in und Schraubanschlusselkos.

Autor



Dr. Arne Albertsen studierte Physik mit dem Schwerpunkt Angewandte Physik an der Universität Kiel. Nach Diplom (1992) und Doktorarbeit (1994) über die Messung und Analyse von Stromzeitreihen aus Ionenkanälen in biologischen Membranen wechselte er in die Industrie, wo er in verschiedenen Bereichen des umwelt- und verfahrenstechnischen Anlagenbaus tätig war. Seit 2001 widmet er sich als Mitarbeiter führender Hersteller (BCcomponents bzw. Vishay und KOA) dem Marketing und Vertrieb von passiven und diskreten aktiven Bauelementen. Seit November 2008 zeichnet er als Senior Sales Manager bei Jianghai Europe Electronic Components GmbH (Krefeld) verantwortlich für die Betreuung europäischer Key-Account-Kunden. Die Schwerpunkte der Tätigkeit von Dr. Albertsen liegen im Bereich des Design-ins 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.

www.jianghai-europe.com

a.albertsen@jianghai-europe.com