

Stromsparer

Reststromverhalten moderner Elektrolytkondensatoren



Moderne Aluminium-Elektrolytkondensatoren, vor allem in dem niedrigen Spannungsbereich bis 63 V, sind heutzutage nur von der Baugröße her auffällige Bauteile in der modernen Elektronik. Kaum jemand, der sich mit allen möglichen Problemen in der Entwicklung elektronischer Schaltungen herumschlägt, beachtet sie besonders, sie funktionieren einfach, sofern sie nicht falsch gepolt werden. Und das unter immer

schwierigeren Bedingungen. Die folgende Betrachtung fokussiert sich besonders auf das Reststromverhalten von Elkos. Denn über das Reststromverhalten moderner Aluminium-Elektrolytkondensatoren mit flüssigem Elektrolyten haben viele Anwender von der Größenordnung her oftmals eine völlig falsche Vorstellung. Als „Stromfresser“ kann man sie jedenfalls nicht mehr bezeichnen.

Dieser Artikel ist eine leicht korrigierte Version des Originalartikels vom 31.08.2001

Reststrom (Leckstrom, Leakage Current)

Sommer. Ostseestrand. Aus einer kleinen Sanddüne, bewachsen mit Strandhafer und Hagebutten, rinnt ein wenig Wasser. Diese Strandquelle ist bei Kindern äußerst beliebt. Wie schön lassen sich hier mit dem 2 bis 3 handbreit fließendem Wasser Staudämme bauen. Einen richtigen See zu schaffen, das ist das Höchste. Aber so sehr die kleinen Buttjes auch immer schaufeln, ein See wird es nicht, es bleibt immer nur eine kleine Pfütze. Denn irgendwo rinnt das aufgestaute Nass immer durch den Damm.

Ein Kondensator ist im Grunde genommen auch nichts anderes als ein Staubecken, allerdings nicht für Wasser sondern für elektrische Ladungsträger. Und der Reststrom kann durchaus mit dem durchsickernden Wasser verglichen werden. Auch ein Kondensator wird nicht „voll“, wenn der abfließende Strom größer oder gleich dem zufließenden Strom ist. Wer jemals mit einem Elektrolytkondensator über ein Zeitglied eine längere Zeit erzeugen wollte und dann feststellte, dass sich mit einem Vorschaltwiderstand in der Größenordnung $M\Omega$ kein Erfolg ergibt, kennt das Problem: Die Ladung verschwindet einfach, der Kondensator kommt nicht „auf Spannung“, er wird einfach nicht „voll“.

Der Reststrom eines Elkos beruht auf physikalischen Gegebenheiten, die zu elektrischen Verlusten führen. Das sind:

- Energie, die zum Aufbau von Oxidschichten benötigt wird.
- Schwachstellen im Dielektrikum, über die es zu einem geringen Stromfluß kommt
- Tunneleffekte
- Querströme außerhalb des Elko-Wickels, z. B. geringe Ströme zwischen den Anschlüssen über Elektrolytfilme auf der Innenseite des Verschluss-Stopfens.

Der Reststrom eines Elkos lässt sich am ehesten vergleichen mit dem Sperrstrom einer Zener-Diode, die einem idealen Kondensator parallel geschaltet ist. Bedingt durch den Aufbau des Elektrolytkondensators sind es genau genommen sogar 2 Dioden, eine parallel zur Anodenkapazität und die Zweite parallel zur Kathodenkapazität, die das Ersatzschaltbild des Elkos hinsichtlich des Reststromes bilden. Allerdings bildet dieses Ersatzschaltbild nicht die Querströme außerhalb des Elko-Wickels ab. Insofern ist es lediglich ein Idealbild der Leckströme über die im Elko befindlichen Oxidschichten.

Nicht zuletzt trägt allerdings der Reststrom auch dazu bei, dass das Bauelement „Elko“ in der Elektronik von der Zuverlässigkeit her so unauffällig ist. Denn die dem Elko gegebene Eigenschaft der Selbstheilung, dem ständigen „reparieren“ schwacher Stellen im Oxid des Dielektrikums, ist verbunden mit einem Energieverbrauch, der sich letztendlich im Reststrom wiederfindet.

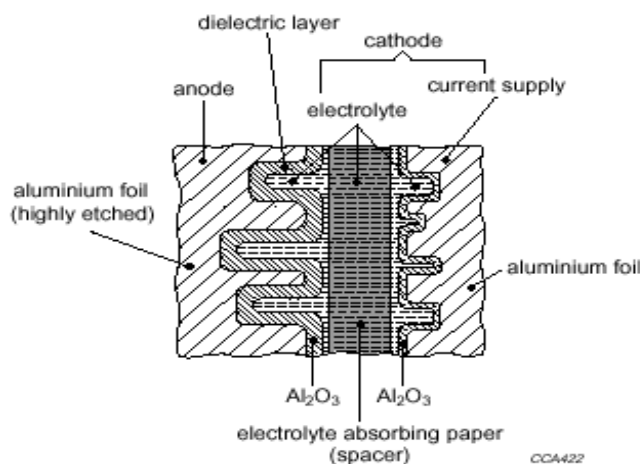


Bild 1

Prinzipieller Aufbau eines Al-Elektrolytkondensators
Die Oxidschicht auf der Anode bildet das Dielektrikum des Kondensators. Der flüssige Elektrolyt bewirkt als Kathode die großflächige Kontaktierung der aufgerauhten Strukturen.

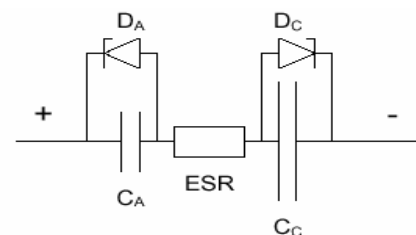


Bild 2

Ersatzschaltbild zum Reststromverhalten eines Al-Elkos

Der spezifizierte Reststrom und der Betriebsreststrom

Im Idealfall hängt der Reststrom I_L eines Elektrolytkondensators ab vom Kapazitätswert des Kondensators, von der anliegenden Spannung, von einem Summanden und, besonders wichtig, von der Messzeit. Üblicherweise wird der Reststrom eines Elkos deshalb mit einer Formel spezifiziert, die die Kapazität C_R und die Nennspannung U_R enthält und die den Grenzwert des Reststromes nach einer bestimmten Meßzeit (hier 2 und 5 Minuten) definiert, z. B. nach den Formeln:

- $I_L (2 \text{ min}) < (0,01 * U_R * C_R) + 3 \mu\text{A}$
- $I_L (5 \text{ min}) < (0,002 * U_R * C_R) + 3 \mu\text{A}$
für $U_R \leq 100 \text{ V}$

- $I_L (5 \text{ min}) < (0,01 * U_R * C_R) + 3 \mu\text{A}$
für $U_R > 100 \text{ V}$

oder nach EN 130300

- $I_L (5 \text{ min}) < (0,3 (U_R * C_R)^{0,7}) + 4 \mu\text{A}$

Allerdings gibt jeder Hersteller seine eigenen Berechnungsformeln an, die meist auch noch von Baureihe zu Baureihe unterschiedlich sind. Der Reststromwert, der sich nach der jeweiligen Formel ergibt, definiert den maximal zulässigen Wert bei anliegender Nennspannung nach Ablauf der Messzeit. Im Normalfall wird sich ein weit kleinerer Wert des Reststromes ergeben.

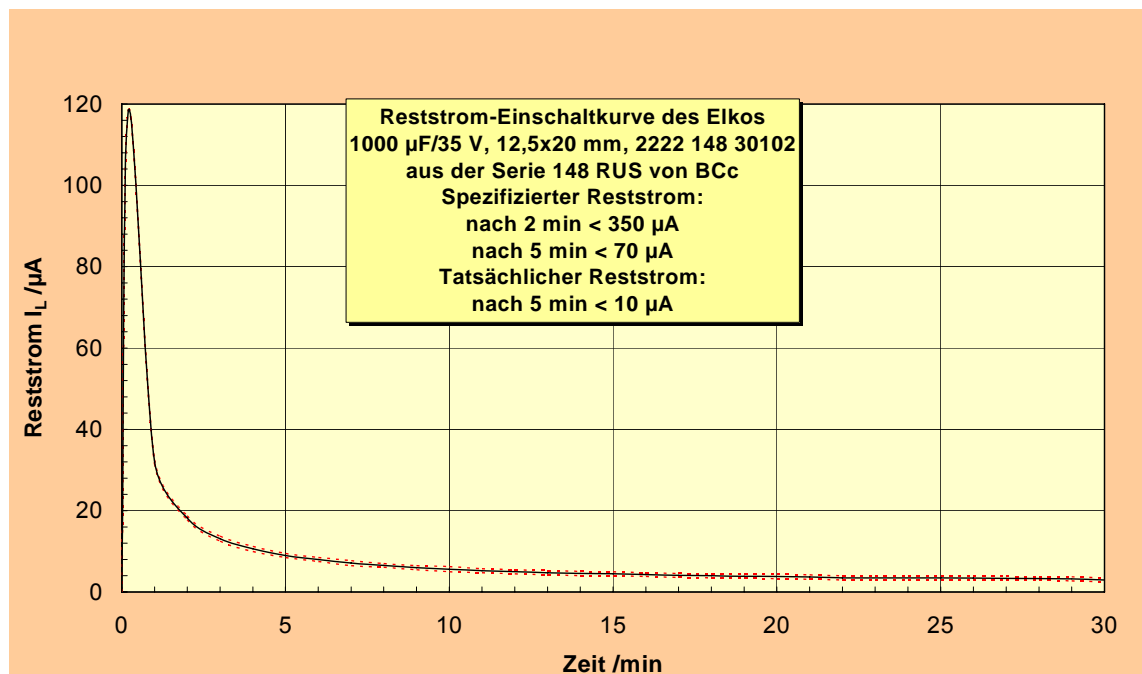


Bild 3 Typischer zeitlicher Verlauf des Reststromes eines Al-Elkos nach dem Einschalten

Wie aus der Kurve in Bild 3 ersichtlich ist, wird der 5 Minuten-Grenzwert von 70 μA in diesem Beispiel bei weitem nicht erreicht. Und in diesem Beispiel nähert sich nach etwa 20 Minuten der gemessene Reststromwert asymptotisch einem konstantem, kleinen Wert, von etwa 5 bis 10 μA. Dieser Endwert wird **Betriebsreststrom** genannt und soll sich nach ungefähr einer Stunde eingestellt haben. Nach dieser Zeit haben sich normalerweise bei den heutzutage gelieferten modernen professionellen Elektrolytkondensatoren alle Schwachstellen im Dielektrikum des Elkos

ausgeheilt und der Reststrom ist auf einem verbleibenden niedrigen Wert abgesenkt, der jetzt der Situation im Ersatzschaltbild des Bildes 2 entspricht.

Der Reststromwert nach 2 oder 5 Minuten, der sog. Abnahmewert, ist relativ hoch, verglichen mit dem Kurvenverlauf im Bild 3. Er wird deshalb so groß spezifiziert, weil im Normalfall verschiedene Einflüsse der „Vorgeschichte“, wie z. B. längere spannungslose Lagerung, den Meßwert beim ersten Einschalten des Kondensators deutlich beeinflussen.

Der Einfluß der Vorgeschichte

Sehr deutlich kommt in der Kurve des Bildes 3 die Zeitabhängigkeit des Reststromes heraus. Dieses Verhalten ergibt sich aus der Selbstheilung der Elkos, der Formierung des Dielektrikums. Denn Schwachstellen im Dielektrikum, die aufgrund chemischer Prozesse an der Oxidschicht während der Lagerung oder aufgrund mechanischer Beschädigungen während der Fertigung des Gerätes entstehen können, werden beim Anlegen einer Spannung wieder ausgeheilt. Allerdings wird für das Ausheilen, die Formierung oder auch Nachformierung genannt, Zeit benötigt. Die Schwächung des Dielektrikums aber ist eine Frage der Vorgeschichte des Kondensators. Folgendes Beispiel mag den Begriff „Vorgeschichte“ etwas näher erläutern.

Ein Großabnehmer aus dem Bereich Konsumelektronik meldete zunehmend Probleme mit Elkos eines Herstellers. Beim automatischen Abgleich der Einstellungen von Fernsehchassis nach der Montage erreichten verschiedene Positionen in der Schaltung nicht die vorgesehene Spannung, so dass der Abgleich nicht durchgeführt werden konnte. Die Abgleichbedingungen waren nicht verändert. Das frisch gefertigte Chassis sollte nach 15 s abgeglichen werden. Ein Nachmessen der Elektrolytkondensatoren an diesen Positionen ergab „zu hoher Reststrom“. Nun lagen die Reststromwerte der betroffenen Elkos alle noch unter dem 5 Minuten Grenzwert. Ein Abgleich in der Schaltung schon nach 15 s wurde allerdings durch keinen Datenblattwert abgesichert. Aber die Kondensatoren desselben Herstellers hatten

bislang keine Probleme bereitet. Was in dieser Charge jedoch festgestellt wurde, war, dass diese Charge ein deutlich höheres allgemeines Reststromniveau aufwies als vorherige Chargen.

Als Ursache dieses ungewöhnlichen Verhaltens stellte sich letztendlich die Vorgeschichte heraus. Die Fertigung dieser Elkos in Fernost erfolgte im August/September in einer nicht klimatisierten Halle. Eine Jahreszeit, die sich in dieser Region durch tropische Luftfeuchtigkeit auszeichnet. Die Elko-Papiere und der hygroskopische Elektrolyt hatten sich mit Wasser vollgesogen. Das im Elko chemisch recht aggressiv wirkende Wasser hatte während der „Lagerzeit“, die zwischen der Herstellung des Elkos und dem ersten Einschalten des Kondensators lag, das Dielektrikum partiell angegriffen und teilweise geschwächt. Und diese Schwachstellen waren Ursache des erhöhten Leckstromniveaus kurz nach dem Einschalten beim Kunden.

Eine längere spannungslose Lagerung also kann unter Umständen das Dielektrikum durch Lösungsprozesse schwächen. In diesem Punkt werden die Eigenschaften unterschiedlicher Elektrolytsysteme deutlich sichtbar. Sogenannte „wässrige“ Elektrolyte besitzen meist ein deutlich schlechteres Lagerverhalten als die Lösungsmitttelelektrolyte. Und wenn in dieser Abhandlung von „professionellen“ Elkos die Rede ist, dann sind hier die Baureihen für 105 °C oder 125 °C gemeint, die mit chemisch weitgehend inerten Lösungsmitttelelektrolyten versehen sind.

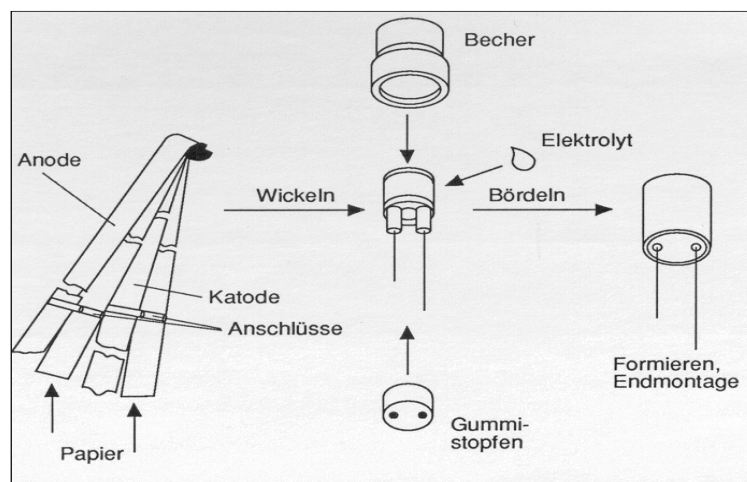


Bild 4 Prinzipieller Herstellprozess von Al-Elektrolytkondensatoren

Auch die Gerätefertigung gehört zur Vorgeschichte



Bild 5

SMD-Elkos der Serie 140 CLZ von BCcomponents sind für Applikationen bis 125 °C vorgesehen

Eine andere Einflußgröße, die in den Bereich der Elko-Vorgeschichte gehört, ist z. B. der Lötprozess. Insbesondere bei kleineren Baugrößen wird die Wärme des Lotes über die Anschlüsse direkt in den Elko-Wickel hineingeleitet. In kleinen Bereichen des Wickels steigt damit die Temperatur metallischer Teile weit über den Siedepunkt eines jeden Elektrolyten an. Damit werden Schwächungsprozesse der Oxidschicht auf der Anode erheblich beschleunigt wodurch der Reststrom beim ersten Einschalten entsprechend ansteigt.

Einen weitaus stärkeren Einfluss auf elektrische Parameter hat der Lötprozess bei SMD-Bauteilen. Die Reflow-Lötkurve erreicht eine Spitzentemperatur von 230 °C. Normalerweise liegt der Siedepunkt üblicher Elektrolyte aber im Bereich von etwa 150 °C bis etwa 180 °C. Bei den zum Teil recht kleinen SMD-Bauteilen wird die Siedetemperatur im Innern des Elkos sehr schnell überschritten. Ein Teil des Elektrolyten wird also in den gasförmigen Zustand versetzt. Die Folgen sind dramatisch: Starker Abfall der Kapazität, drastischer Anstieg des ESR und auch des Reststromes. Während sich die Kapazität und der ESR des Elkos aber mit dem Abkühlen wieder normalisieren und nach etwa 6 bis 12 Stunden bis auf kleinere Abweichungen wieder den Ursprungszustand erreicht haben, wird der Reststrom erst nach Anlegen einer Spannung absinken. Die durch die große Wärme beschleunigten Schwächungen des Dielektrikums müssen

zunächst ausgeheilt werden, und das kostet Zeit.

Ein weiterer Einfluß aus der Vorgeschichte soll nicht verschwiegen werden. Die mechanische Beanspruchung an den Anschlußdrähten bei der Fertigung, z. B. beim Schneiden oder beim Biegen der Drähte während der Fertigung die insbesondere bei radialen Elkos leicht mechanische Kräfte in den Wickel hineinbringen können.

Der Einfluß der Vorgeschichte auf den Reststrom eines Elkos hat auch die Meßvorschriften elektrischer Parameter in den gültigen Normen bestimmt. Unter anderem soll die Messung des Kapazitätswertes bei Elektrolytkondensatoren immer **nach** der Messung des Reststromes erfolgen. Der Grund liegt auf der Hand; ist der Reststrom zu hoch so wird der Meßwert der Kapazität verfälscht.

Natürlich ist heutzutage kein Hersteller von Elektrolytkondensatoren gut beraten, wenn er sich bei entsprechend gelieferter Ware auf diesen Passus zurückzieht, um eine Beanstandung abzuweisen. Aber die enorme Streubreite der Restströme bei der Anlieferung, die sich ja aus chemischen und physikalischen Gegebenheiten in der Vorgeschichte des Elkos ergeben, lässt eine Sonderbetrachtung von Reststrom-Messergebnissen sinnvoll erscheinen. Zumal die Bauteile sich selbst wieder Ausheilen und in der Praxis hervorragend funktionierende Bauteile ergeben.

Der Betriebsreststrom

Anwender erwarten und erhalten heutzutage im Normalfall auch bei Aluminium-Elektrolytkondensatoren in Bezug auf Reststromverhalten relativ stabile Bauelemente. Relativ deshalb, weil natürlich bei Elkos nicht die Rest- oder Leckstromwerte von Kunststoff-Folienkondensatoren oder Keramik-Kondensatoren erreicht werden.

Gefühlsmäßig wird der Reststrom eines Elkos aber im Allgemeinen als überaus großer Wert eingeschätzt. Das liegt daran, dass auch der in den Datenblättern meist spezifizierte 5 Minuten-Wert des Reststromes um Faktoren höher als der tatsächliche Betriebsreststrom ist. Und der Betriebsreststrom stellt sich ja erst nach einer gewissen Betriebszeit ein, nach der die Schwachstellen im Dielektrikum sicher ausgeheilt worden sind. Und je länger die Spannung am Kondensator anliegt, desto geringer wird der Reststrom, siehe Bild 6.

Welch verblüffend geringe Größe der Reststrom bei guter professioneller Ware heutzutage annehmen kann, verdeutlicht anschaulich ein einfacher Versuch. Man lade

einen Elko auf Nennspannung und trenne ihn dann von der Stromquelle. Dann messe man im stündlichen Abstand die am Elko verbleibende Spannung. Da der Reststrom für eine ständige geringe Entladung des Kondensators sorgt, muss also nach einer gewissen Zeit die Restspannung auf Null abgesunken sein. Was schätzen Sie, nach welcher Zeit, und die ist ja vollkommen unabhängig vom Kapazitätswert, siehe Reststromformel, ist die Spannung auf Null abgesunken ?

Stunden ? Tage ? Wochen ?

Und jetzt kommt das Erstaunliche: Selbst nach Monaten der offenen Lagerung kann meist noch eine verbleibende, kleine Restspannung am Elko gemessen werden. D. h., über die Größenordnung des Reststromes von Aluminium-Elektrolytkondensatoren mit flüssigem Elektrolyten hat man im Allgemeinen eine völlig falsche Vorstellung. Oder hätten Sie auf „Monate“ geschätzt ?

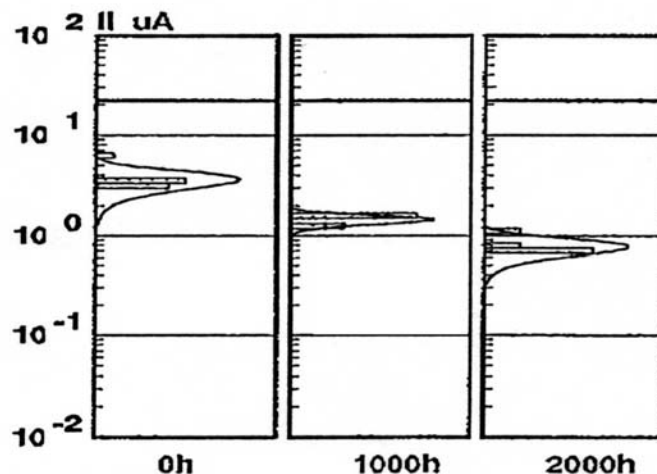


Bild 6
Reststromverhalten von Elkos
während einer Lebensdauerprüfung
Je länger die Spannung am Kondensator anliegt,
desto geringer wird der Reststrom

Spannungs- und Temperaturabhängigkeit des Betriebsreststromes

Wie das oben beschriebene Beispiel zeigt, ist der Betriebsreststrom um Faktoren kleiner als der in den jeweiligen Datenblättern spezifizierte Abnahmewert. Allgemeine Angaben für den Betriebsreststrom in Form von Formeln in der Literatur streuen erheblich. Aber das ist auch kein Wunder, hat sich die Qualität der professionellen Elektrolytkondensatoren hinsichtlich des Reststromes in den letzten 20 Jahren doch erheblich verbessert.

Ein Reststromwert von etwa 10 μA für einen 1000 μF -Elko an 35 V (siehe Bild 3) ist also nichts Ungewöhnliches. Dieser Wert ist aber

nicht stabil. Der Betriebsreststrom eines Al-Elektrolytkondensators mit flüssigem Elektrolyten ist sehr stark temperatur- und spannungsabhängig. Dieses Verhalten ist verständlich und mit Hilfe des Modells der Aktivierungsenergie leicht erklärbar. Die Größe des Betriebsreststromes bei Betriebsbedingungen kann mit Hilfe der unten in den beiden Bildern 7 und 8 angegebenen Multiplikatoren I_{op}/I_L annähernd berechnet werden. Bild 9 zeigt das Ergebnis einer Messung des Reststromes eines 2100 μF -Kondensators bei 2 Temperaturen, um die oben beschriebene Temperaturabhängigkeit an einem praktischen Beispiel zu zeigen.

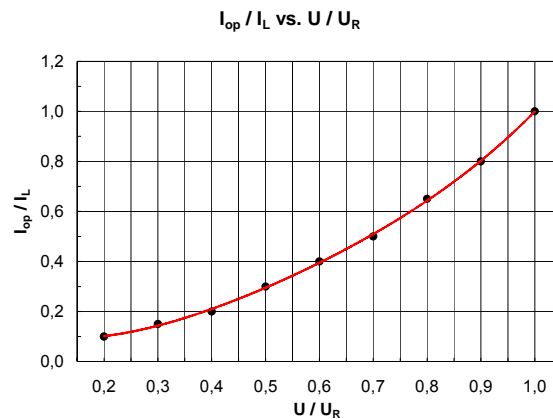


Bild 7

Typischer Multiplikator des Betriebsreststromes in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung

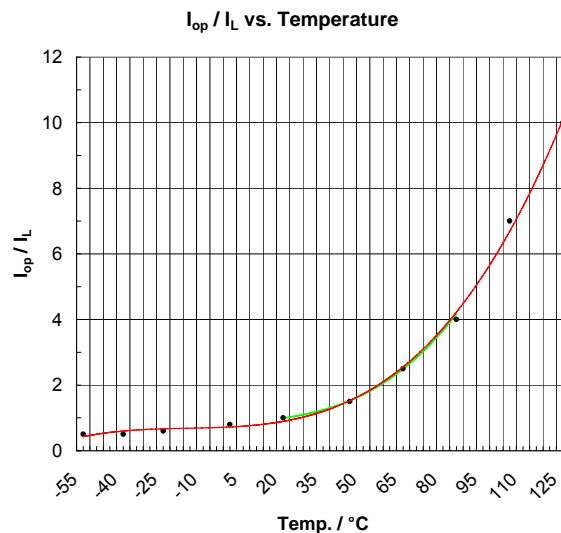


Bild 8

Typischer Multiplikator des Betriebsreststromes in Abhängigkeit von der Temperatur des Kondensators

Reststrom-Messergebnisse bei 23°C und bei 105°C
Elko 2100 µF/63 V, 25x40 mm, 2222 058 90019

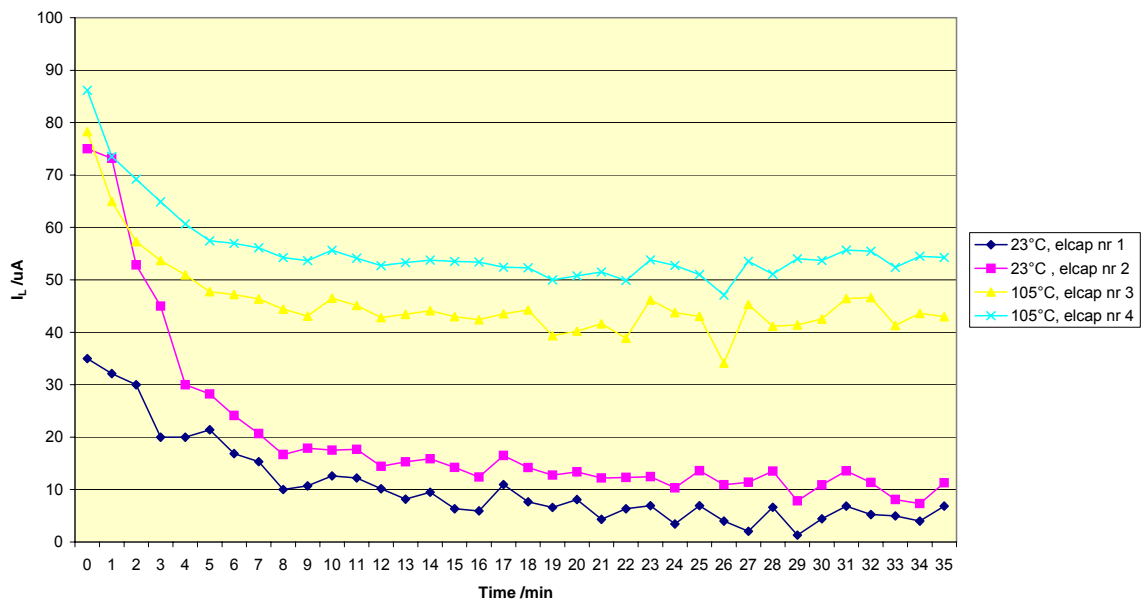


Bild 9

Temperaturabhängigkeit des Betriebsreststromes eines 2100 µF/63 V-Elkos bei 23 °C und 105 °C

Hat der Reststrom Einfluß auf die Elko-Lebensdauer ?

Bei vielen Herstellern findet man Hinweise und sogar Formeln, die den Einfluss der Höhe der anliegenden Spannung auf die zu erwartende Lebensdauer beschreibt. Da nun bekannt ist, dass die Höhe der anliegenden Spannung die Größe des Reststromes mit bestimmt, kann durchaus ein Spannungseinfluss auf die Lebensdauer mit angenommen werden. Denn der Reststrom ist ein Maß auch für die Formierarbeit, die über die Lebensdauer geleistet wird. Da diese Formierarbeit dem Elektrolyten letztendlich Sauerstoff entzieht, der zur Reparatur geschwächter Oxidschichten verwendet wird, wird also Elektrolyt verbraucht. Und der Elektrolytverlust bestimmt nach dem gängigen Modell die Lebensdauer der Elkos. Rein theoretisch müsste also beim Anlegen der vollen Nennspannung der Elko eine kürzere Lebensdauer erreichen als bei Unterspannung.

Betrachtet man jedoch die physikalischen Ursachen des Elko-Reststromes, so wird wohl

nur ein Teil des Reststromes als Formierarbeit wiederzufinden sein. Der Rest der Elektronen wird über Tunneleffekte durch das Dielektrikum tunneln bzw. in Form von Querströmen über Elektrolytfilme im Bereich der Abdichtung fließen, also keinen Einfluss auf einen möglichen Elektrolytverlust haben. Gewichtet man dann noch die Größenordnung des Reststromes quantitativ, so kommt man zu dem Ergebnis, dass der Einfluss des Reststromes auf die Lebensdauer eher gering einzuschätzen ist. Dies gilt jedenfalls für Elkos im Spannungsbereich bis etwa 100 V (low voltage) und für Elkos mit wasserarmen Lösungsmittellektrolyten. Für diese Kondensatoren sind kleine mechanische Streuungen in der Dichtigkeit der Abdichtungen und damit die Streuung des zu erwartenden Elektrolytverlustes über die Lebensdauer sicherlich bedeutsamer als die Höhe der anliegenden Spannung und dem damit verbundenen Reststrom.

Niedrige Restströme – Die Bedeutung für die Praxis

Im normalen Einsatzfall dienen Elkos als Puffer- und Siebkondensatoren in der Stromversorgung elektronischer Schaltungen. Sie liegen meist niederohmig an der Speisung. Ein niedriger Reststrom ist eigentlich zur Funktionsfähigkeit der Schaltung nicht erforderlich. Es gibt jedoch Einsatzbereiche, da kommt es doch schon auf die Größenordnung der Verluste an. Denken Sie an die Kfz-Elektronik. In jedem modernen Auto findet man, je nach Ausstattung zwischen 100 bis 400 Elkos. Und viele Geräte liegen im stand-by-Betrieb ständig an der Batterie. Wenn nun die Summe aller Verluste in die Größenordnung einiger 100 mA kommt, dann wird der Urlauber, der nach 14 Tagen erholt aus seinem Mallorca-Urlaub zurückkommt, sehr schnell seine gute Laune verlieren, wenn der Akku seines auf dem Parkplatz abgestellten Wagens leer ist. Bei einem Einzelwert aber in der Größenordnung „ μA “,

der sich bei 200 Exemplaren dann zum Gesamtwert im Bereich „mA“ bewegt, besteht diese Gefahr nicht.

Bei einer anderen, früheren Kfz-Anwendung jedoch wurde schon von Anfang an großer Wert auf ein sehr gutes Reststromverhalten gelegt. Die früheren Blinker im Auto wurden mit Zeitgliedern (RC-Glied) realisiert. Ein zu hoher Reststrom veränderte die Blinkfrequenz. Und hier waren die Kfz-Abnahmebehörden äußerst pingelig. Die Blinkfrequenzen mussten genau innerhalb präzise definierter Grenzen liegen. Aus der Diskussion über Zeitglieder, realisiert mit Widerstand und Elektrolytkondensator, stammt auch die folgende Faustformel zum Funktionieren einer solchen Schaltung: Der durch den Vorschaltwiderstand definierte Strom sollte 10 mal so groß sein wie der 5-Minuten-Wert des Reststromes des Elkos.

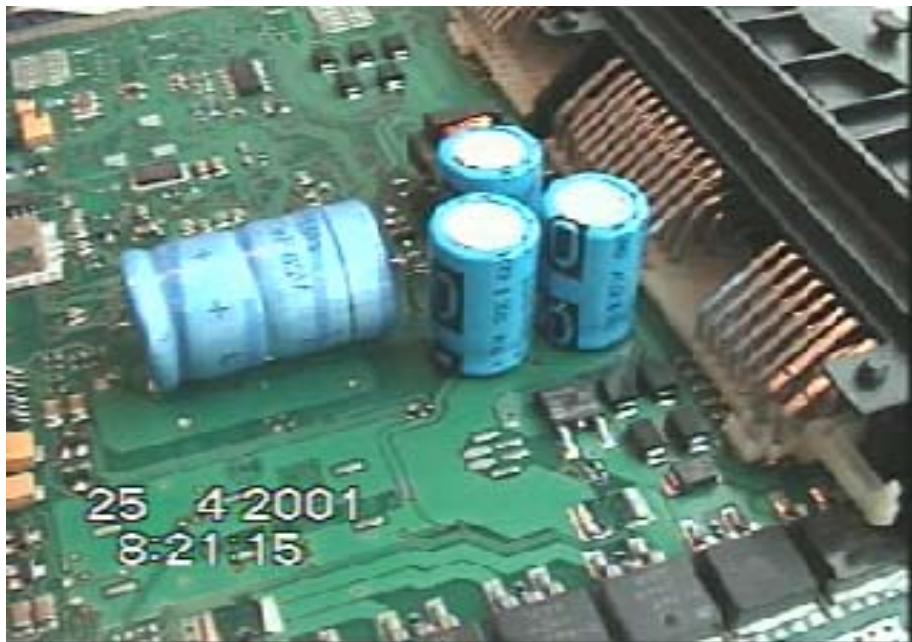


Bild 10 Elektrolytkondensatoren in einer Kfz-Einspritzschaltung von Bosch

Reststromarme Elkos für höchste Anforderungen

Höchste Anforderungen an äußerst geringe Reststromwerte findet man heute in einer Applikation, die man in vielen Haushalten antrifft. Es sind die Heizkosten-Ablesegeräte, die an der Heizung montiert per Sendeimpuls die Temperaturen des Heizkörpers an eine Rechenzentrale übermitteln. Die Ableeschaltung ist ohne Netzanschluss. Die Energie der Sendeimpulse für eine 10jährige Betriebszeit ist in einer Batterie gespeichert. In dieser Schaltung wird ein Puffer-Elko zur niederohmigen Bereitstellung der Sendeenergie für die Funksignale benötigt. Dadurch beeinflusst der Elko-Reststrom die Gesamt-Lebensdauer der Ableeschaltung. Es ist einleuchtend, dass hier um jedes μA weniger beim Reststrom des Elkos gerungen wird. Erschwerend kommt ja hinzu, dass die Schaltung am Heizkörper auch noch warm wird, der Reststrom des Elkos mit der Temperatur auch noch ansteigt.

In solchen Applikationen muss der Elko-Hersteller besondere Maßnahmen treffen, die zu besonders niedrigen Reststromwerten führen. Gelöst wird diese Anforderung durch entsprechende Wahl geeigneter Anodenfolien mit speziell strukturierten Oxidschichten in außergewöhnlich homogener Beschichtung. Hierunter versteht man, dass das Oxid kristallin, amorph oder auch in geeigneter

Folge geschichtet sein kann. Homogene Oxidschichten reduzieren die eigentlich schon sehr geringe Anzahl von Schwachstellen im Dielektrikum noch einmal und dies hat einen noch geringeren Reststrom des Elkos zur Folge.

Die ersten Versuche in dieser für Aluminium-Elektrolytkondensatoren äußerst schwierigen Anwendung wurden mit sehr homogen vorformierten Anodenfolien durchgeführt. In den weiteren Versuchen und in den ersten praktischen Erfahrungen hat sich dann aber herausgestellt, dass schon Kondensatoren aus den serienmäßig angebotenen sog. „Low Leakage Current Serien“ recht gute Ergebnisse hinsichtlich des Reststromes brachten. Erleichternd war dabei, dass die Betriebsspannung in dieser Applikation mit nur 3 V und dem Einsatz eines 16 V-Elkos schon allein über die Spannungsabhängigkeit des Reststromes eine erhebliche Verringerung brachten. In weiteren Dauerversuchen konnte festgestellt werden, dass sich nach einigen Tagen Dauerbetrieb bei Raumtemperatur Reststromwerte von nur einigen 10 nA ergaben. Das sind Reststromwerte, die man den „nassen“ Aluminium-Elektrolytkondensatoren normalerweise nicht zutraut und die gut genug sind, um auch den höchsten Anforderungen gerecht zu werden.



Bild 11,12 Geräte zur Wärmemengenzählung, Fa. Techem

Die Schaltung der Wärmemengenzählung wird durch eine Lithium-Batterie gespeist, die 10 Jahre wartungsfrei die Schaltung mit Energie versorgt.

Einfluss des Reststromes in der Reihenschaltung von Elektrolytkondensatoren

Die Reihenschaltung von Aluminium-Elektrolytkondensatoren hat eine Spannungsaufteilung zwischen den Bauteilen zur Folge, die durch den Reststromunterschied zwischen den Einzelkondensatoren einer Reihe beeinflusst wird. Es ist deshalb sehr wichtig, dass die Reststromunterschiede schon bei der Schaltungsauslegung ausgeglichen werden, da schon recht kleine Unterschiede Probleme bereiten können. Diese Unterschiede wirken sich normalerweise beim Einschalten als Überspannung an dem Bauelement mit dem niedrigsten Reststrom aus. Da beträchtliche Streuungen der Restströme auch bei Lieferung der Kondensatoren aus einer Charge auftreten

können, können auch große Spannungsdifferenzen auftreten. Wenn dadurch die Nennspannung eines Kondensators überschritten wird, kann es unter Umständen zum vorzeitigen Ausfall führen.

Dieser Reststromunterschied wird üblicherweise durch die Verwendung von Symmetrierwiderständen über jedem der einzelnen Bauelemente unter Kontrolle gehalten. Die Berechnung der Symmetrierwiderstände kann dem „Leitfaden für die Anwendung von Aluminium-Elektrolytkondensatoren, DIN 45811“ entnommen werden.

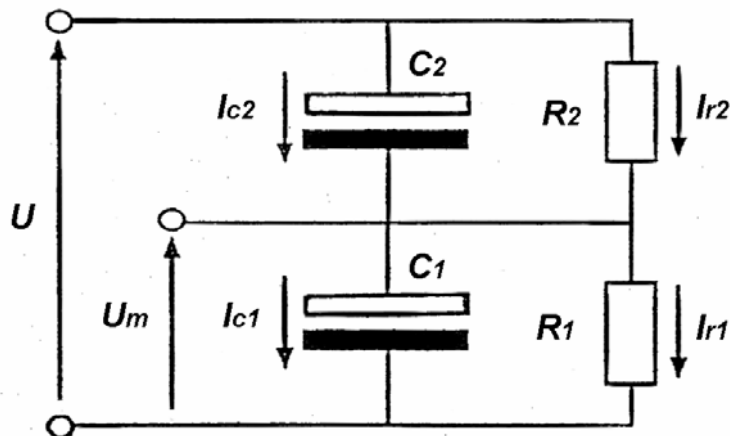


Bild 13 Reihenschaltung von Elektrolytkondensatoren

Reststrom, eine historische Betrachtung

Warum wird der Reststrom in der Diskussion mit den Kunden überhaupt noch so häufig angesprochen? Für die meisten Applikationen, in denen die Elkos in Stromversorgungen sitzen und genügend „bestromt“ werden, spielt dieser Parameter kaum eine Rolle. Und auch wenn Geräte längere Zeit im Regal stehen, Geräte-Ausfälle durch zu hohe Restströme der Elkos sind so gut wie unbekannt.

Die Erklärung kann nur gefunden werden, wenn man die Entwicklung elektronischer Schaltungen in den letzten 50 Jahren betrachtet. Auch jüngere Entwickler haben meist während der Ausbildung den Begriff „Reststrom“ im Zusammenhang mit Elkos mit gewissen Vorbehalten kennen gelernt. In der Literatur wird selten der heute erreichbare geringe Reststrom im richtigen quantitativen Zusammenhang dargestellt. Hier findet man oft noch eine Vorstellung, die aus Problemen der Frühzeit der Elko-Fertigung stammt. Tatsächlich war Korrosion bis in die 60er Jahre des letzten Jahrhunderts Ursache vieler Probleme. Hoher Reststrom bis hin zum

Kurzschluss waren häufig in Elkos der damaligen Zeit anzutreffen. Grund für die Korrosions-Probleme in Elkos waren Verunreinigungen, insbesondere mit Halogenen, z. B. Chlor. Chlor wirkt im Elko als Katalysator für die Aluminium-Korrosion. Dieser Prozess geht einher mit erhöhtem Formieraufwand, d. h. mit erhöhtem Reststrom.

Die Erkenntnis dieses Sachverhaltes führte zu strengen Reinheitsvorschriften, insbesondere in Hinsicht auf Verunreinigungen mit Halogenen in Zusammenhang mit der Produktion von Elektrolytkondensatoren. Dadurch sanken die Reststromwerte der nahezu chlorfreien Kondensatoren dann auch beträchtlich. Korrosionsprobleme durch Verunreinigungen mit Halogenen sind bei heute gefertigten Elektrolytkondensatoren kein Thema mehr. Aber die Diskussion über den Reststrom ist geblieben. Nur hat heute die quantitative Betrachtung eine völlig andere Größenordnung erhalten.

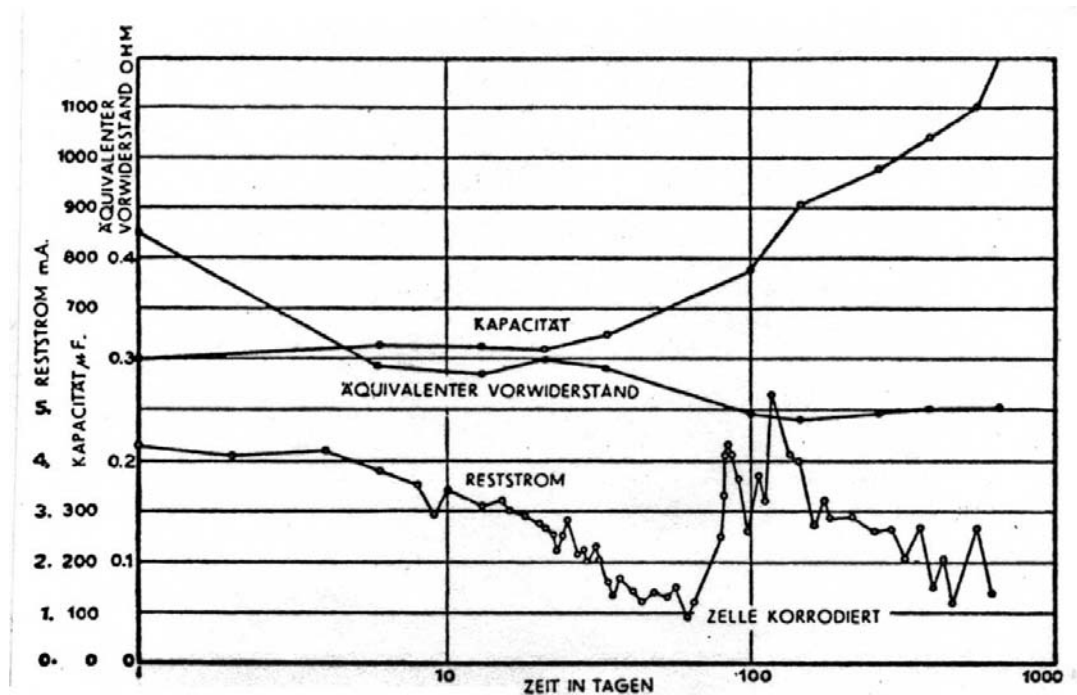


Bild 14

Kurvenverlauf der Kapazität, des ESR und des Reststromes in einer Lebensdauerprüfung eines 700 uF/65 V-Elkos aus dem Jahre 1929
Besonderheit: Korrosion und Einfluß auf den Reststrom

Die Qual der Wahl, Relevanz des Reststromes ?

Natürlich gibt es auch bei den heute gelieferten Elektrolytkondensatoren Unterschiede im Nachformier- bzw. im Reststromverhalten. Die Unterschiede können zum Teil recht groß sein. Wie kann ein Entwickler jetzt herausfinden, wie sich der ausgesuchte Elko wohl in Hinsicht auf sein Reststromverhalten benehmen wird ? Denn der 5 Minuten Grenzwert in den jeweiligen Datenblättern ist hier wirklich nicht aussagekräftig genug. Nun, zunächst muss der Betreffende erst einmal entscheiden, ob diese Frage überhaupt sinnvoll ist.

Zur Erklärung dieser Fragestellung ein Beispiel. Für ein Steckernetzteil, das extrem unter Kostendruck steht und an dem keine besondere Anforderung an die Lebensdauer gestellt wird, ist jede Diskussion um Zusatznutzen überflüssig, kein Kunde bezahlt diesen für ihn nicht bemerkbaren Vorteil eines besonders niedrigen Reststromes. Anders sieht es z. B. in der Kfz-Elektronik aus. Wie oben beschrieben, ist es durchaus sinnvoll, hier auf eine Ware zu achten, die sich durch niedrige Betriebsrestströme auszeichnet.

Es gibt aber für den informierten Entwickler einen Zusammenhang, einen Test, der zwar nicht auf besonders niedrige Reststromwerte hinweist, aber auf ein stabiles zeitliches Verhalten des Elkos. Es ist der Test Heißlagerung, „hot storage“. Hierunter wird ein Test verstanden, der bei der oberen Kategorietemperatur durchgeführt wird ohne dass Spannung angelegt wird. Spannungslos bedeutet, dass keine Selbstheilung durchgeführt werden kann. Und da der Test bei hoher Temperatur erfolgt, werden alle chemischen Löseprozesse schön beschleunigt. Die internationale Norm IEC 3874-4 schreibt eine Mindest-Testzeit von 50 Stunden vor. Eine Testdauer von 500 oder 1000 Stunden „hot storage“ bedeutet damit, dass der Hersteller sicher ist, dass der Elektrolyt weitgehend chemisch inert ist, dass keine Schwächung der Oxidschicht und somit kein erhöhter Reststrom auftritt. Das Fehlen einer solchen Spezifikation in einem Datenblatt oder eine Testzeit von nur 50 Stunden könnte dann auf ein Verhalten der Elkos hinweisen, in diesem Parameter vielleicht nicht ganz so stabil zu sein.

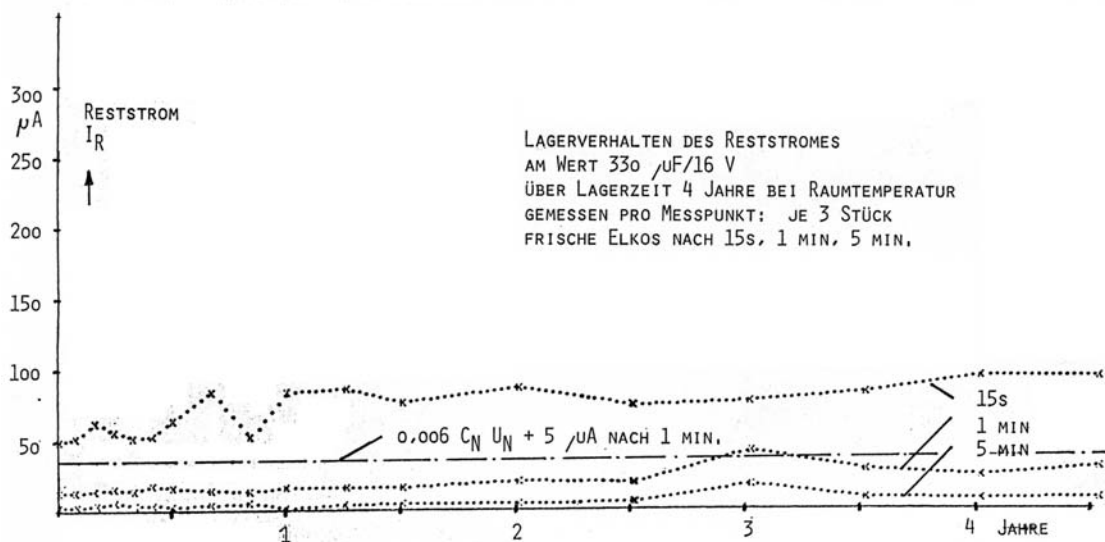


Bild 15

Überprüfung des Lagerverhaltens von Elkos anhand von Reststrom-Messungen an jeweils 3 „frischen“ Kondensatoren nach der angegebenen Lagerzeit
Auch nach 4 Jahren Lagerzeit waren an diesen Elkos von BCc keine erhöhten Reststromwerte festzustellen

BCcomponents, Baureihenempfehlungen

Baureihe 013 RLC
QUICK REFERENCE DATA

DESCRIPTION	VALUE
Case sizes ($\varnothing D_{nom} \times L_{nom}$ in mm)	5 × 11 and 8.2 × 11
Rated capacitance range, C_R	0.47 to 470 μF
Tolerance on C_R	$\pm 20\%$; $\pm 10\%$ available on request
Rated voltage range, U_R	6.3 to 50 V
Category temperature range	-40 to +85 °C
Leakage current after 2 minutes: $U_R = 6.3$ to 25 V $U_R = 35$ and 50 V	0.002 $C_R \times U_R$ or 0.7 μA , whichever is greater 0.002 $C_R \times U_R + 1 \mu A$
Endurance test at 85 °C	2000 hours
Useful life at 105 °C	750 hours
Useful life at 85 °C	3000 hours
Useful life at 40 °C, $1.4 \times I_R$ applied	80000 hours
Shelf life at 0 V, 85 °C	500 hours
Based on sectional specification	IEC 60384-4/EN130300
Climatic category IEC 60068	40/085/56

Selection chart for C_R , U_R and relevant nominal case sizes ($\varnothing D \neq L$ in mm)

 Preferred types in **bold**.

C_R (μF)	U_R (V)					
	6.3	10	16	25	35	50
0.47	-	-	-	-	-	5 × 11
1.0	-	-	-	5 × 11	-	5 × 11
2.2	-	-	-	5 × 11	-	5 × 11
3.3	-	-	-	5 × 11	-	5 × 11
4.7	-	-	-	5 × 11	-	5 × 11
10	-	-	-	5 × 11	-	5 × 11
22	-	-	-	5 × 11	-	5 × 11
33	-	-	5 × 11	-	5 × 11	8.2 × 11
47	-	5 × 11	5 × 11	8.2 × 11	-	8.2 × 11
68	-	5 × 11	-	-	-	8.2 × 11
100	-	5 × 11	8.2 × 11	-	8.2 × 11	-
220	-	8.2 × 11	-	-	-	-
330	8.2 × 11	-	-	-	-	-
470	8.2 × 11	-	-	-	-	-



Baureihe 148 RUS

QUICK REFERENCE DATA

DESCRIPTION	VALUE
Case sizes ($\varnothing D_{nom} \times L_{nom}$ in mm)	10 × 12 to 18 × 35
Rated capacitance range, C_R	47 to 22000 μF
Tolerance on C_R	$\pm 20\%$
Rated voltage range, U_R	6.3 to 100 V
Category temperature range	-40 to +105 °C
Endurance test at 105 °C: case $\varnothing D = 10$ mm case $\varnothing D \geq 12.5$ mm	1000 hours 2000 hours
Useful life at 105 °C: case $\varnothing D = 10$ mm case $\varnothing D \geq 12.5$ mm	2000 hours 3000 hours
Useful life at 40 °C, $1.6 \times I_R$ applied: case $\varnothing D = 10$ mm case $\varnothing D \geq 12.5$ mm	140000 hours 200000 hours
Shelf life at 0 V, 105 °C	1000 hours
Based on sectional specification	IEC 60384-4/EN130300
Climatic category IEC 60068	40/105/56

Selection chart for C_R , U_R and relevant nominal case sizes ($\varnothing D \times L$ in mm)

Preferred types in **bold**.

C_R (μF)	U_R (V)							
	6.3	10	16	25	35	50	63	100
47(1)	-	-	-	-	-	-	-	10 × 12
68	-	-	-	-	-	-	-	10 × 16
100	-	-	-	-	-	-	10 × 12	10 × 20
150	-	-	-	-	-	-	-	12.5 × 20
220	-	-	-	-	-	10 × 12	10 × 16	12.5 × 25
	-	-	-	-	-	-	-	16 × 20
330	-	-	-	-	10 × 12	10 × 16	12.5 × 20	16 × 25
470	-	-	-	10 × 12	10 × 16	10 × 20	12.5 × 20	16 × 31
680	-	-	10 × 12	10 × 16	10 × 20	12.5 × 20	12.5 × 25	-
	-	-	-	-	-	-	16 × 20	-
1000	-	10 × 12	10 × 16	10 × 20	12.5 × 20	12.5 × 25	16 × 25	-
	-	-	-	-	-	16 × 20	-	-
1500	-	10 × 16	10 × 20	12.5 × 20	12.5 × 25	16 × 25	16 × 31	-
	-	-	-	-	16 × 20	-	-	-
2200	10 × 16	10 × 20	12.5 × 20	12.5 × 25	16 × 25	16 × 31	18 × 35	-
	-	-	-	16 × 20	-	-	-	-
3300	-	12.5 × 20	12.5 × 25	16 × 25	16 × 31	18 × 35	-	-
	-	-	16 × 20	-	-	-	-	-
4700	12.5 × 20	12.5 × 25	16 × 25	16 × 31	18 × 35	-	-	-
	-	16 × 20	-	-	-	-	-	-
6800	16 × 20	16 × 25	16 × 31	18 × 35	-	-	-	-
10000	16 × 25	16 × 31	18 × 35	-	-	-	-	-
15000	16 × 31	18 × 35	-	-	-	-	-	-
22000	18 × 35	-	-	-	-	-	-	-