

Wie misst man Elkos?

Manfred Zollner

Nach den an erster Stelle stehenden Röhren sind Elektrolyt-Kondensatoren (Elkos) die Bauteile eines Röhrenverstärkers, die am zweithäufigsten ausfallen. In alten Datenblättern konnte man schon mal "5% Ausfallrate in 10⁴ Stunden" finden, und in dieser Zeit ist auch die spannungsfreie Lagerzeit enthalten. Ein Hauptgrund für das frühe Ableben: Viele Alu-Elkos enthalten einen "nassen" Elektrolyt – trocknet der aus, ist der Elko kaputt. Wie kann man mit einfachen Mitteln feststellen, ob ein Elko kaputt ist? Oder halb-kaputt? Wie misst man Elkos?

Gleich zu Beginn: Die im Netzteil eines Röhrenverstärkers arbeitenden Elkos werden mit hohen Spannungen betrieben. Mit lebensgefährlichen Spannungen, die auch nach dem Ziehen des Netzsteckers noch lange bestehen können. Deshalb ist eine **Grundausbildung** in elektrischer Sicherheit erforderlich, wenn man die im Folgenden dargestellten Messverfahren anwenden möchte. Wer Zweifel hat, ob er über die nötigen Kenntnisse verfügt, muss einen Fachmann (bzw. eine Fachfrau) hinzuziehen.

Kondensatoren speichern beim Laden elektrische Energie. Nach der einfachen Theorie unendlich lange, bzw. so lange, bis diese Energie wieder abgerufen wird, d.h. bis der Kondensator wieder entladen wird. Die Ladung berechnet sich ganz einfach aus dem Produkt von Kapazität und Spannung, z.B. $Q = 47 \mu\text{F} * 450 \text{ V} = 0.021 \text{ As}$. Wenn 1 Sekunde lang 21 mA fließen, ist der Elko aufgeladen. $450 \text{ V} * 21 \text{ mA}$ ergäbe eine Leistung von 9.5 Watt, aber bei diesem Ladevorgang ist die Spannung nicht konstant – sie steigt vielmehr linear über der Zeit auf den Endwert (450 V) an, und deshalb ist die *mittlere Leistung* nur halb so groß. Denselben Faktor (0.5) finden wir auch bei der im Kondensator gespeicherten Energie: $E = 0.5 * C * U^2$. Für das o.a. Beispiel sind das $E = 4.76 \text{ Js}$. Diese Energie kann man "in den Kondensator" laden, und da bleibt sie dann, bis man sie wieder rauslässt. Sagt die einfache Theorie. Die Praxis lehrt indes, dass sich Kondensatoren "von selbst entladen", dass die Ladung und damit auch die Spannung eines geladenen Kondensators mit der Zeit abnehmen, auch wenn der Kondensator nicht beschaltet ist. Im Kondensator, d.h. zwischen seinen Anschlüssen, fließt ein **Leckstrom**. Der ist nicht sehr groß, vielleicht 100 μA , aber er zeigt, dass das ideale Kondensatormodell mit seinem isolierenden Dielektrikum die Realität nicht genau genug abbildet. Im etwas erweiterten Ersatzschaltbild (ESB) findet man deshalb parallel zur Kapazität einen Widerstand, den "**Leakage-Resistor**" R_p . Er bewirkt, dass nach dem Aufladen ein dauernder Gleichstrom fließt, und dass sich nach dem Abtrennen der Ladeschaltung der Elko wieder von selbst entlädt. Wenn bei einem auf 450 V aufgeladenen Elko ein Leckstrom von 100 μA fließt, entspricht dies einer Verlustleistung von $450 \text{ V} * 10^{-4} \text{ A} = 45 \text{ mW}$. Das ist wenig, und kein Grund zur Sorge. Der Leckstrom kann aber wegen Fertigungsmängeln oder hohem Alter auf viele Milliampere ansteigen, und das wäre dann ein Indiz auf einen defekten Elko. Ein Messverfahren besteht also in der Ermittlung des Leckstroms, doch da beginnen die Schwierigkeiten, denn der Leckstrom ist keine Konstante. Die Isolationseigenschaften des Kondensator-Dielektrikums hängen von vielen Parametern ab, und deswegen ist der Wert des Leakage-Resistors nicht konstant.

Die restlichen Seiten sind als PDF downloadbar: www.gitec-forum.de

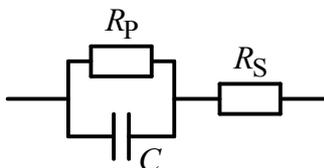
Ein Aluminium-Elektrolytkondensator besteht aus zwei einander gegenüber liegenden Aluminiumfolien, zwischen denen sich eine mit Elektrolytflüssigkeit getränkte Papierfolie befindet. Der (zur Kathode gehörende) Elektrolyt leitet (Ionenleitung), er ist nicht das Dielektrikum. Dieses befindet sich als sehr dünne **Oxidschicht** (Al_2O_3) auf der Innenseite der Anodenfolie. Die Oxidschicht, der eigentliche Isolator, "wächst" bei der Herstellung auf die Anodenfolie auf (**Formierung**), sie kann sich im Lauf der Zeit aber auch wieder zurückbilden. Je nach Güte der Oxidschicht entsteht daraus ein mehr oder weniger großer Leckstrom. Besonders schnell baut sich die Oxidschicht bei falscher Polung des Elkos ab – dann entsteht Wasserstoff, **der Elko kann explodieren**. Die Grenzspannung für falsche Polung liegt sehr niedrig, einige Hersteller geben hierfür nur 1 V an!

Liegen Elkos jahrelang ungebraucht herum, verschlechtert sich ihr Isolationsverhalten. Wenn sie dann an Spannung gelegt werden, fließt zunächst ein relativ hoher Leckstrom, der bei noch gutem Elektrolyt aber eine Nachformierung bewirkt, d.h. ein "Nachwachsen" der Oxidschicht. Ist der Elko jedoch ausgetrocknet, funktioniert dieser Mechanismus nicht mehr, die Kapazität nimmt ab, die Verluste nehmen zu, der Elko ist am Ende seiner Brauchbarkeit angelangt.

In **Abb. 1** ist ein einfaches Elko-Ersatzschaltbild dargestellt. Es sei nochmals erwähnt, dass alle Bauteilwerte von Temperatur, Frequenz, anliegender Spannung und Alter abhängen, dass somit also kein linear-zeitinvariantes System vorliegt, sondern ein nichtlinear-zeitvariantes. Mit R_S wird der in Reihe zum Dielektrikum liegende Serienwiderstand (ESR) bezeichnet, der vor allem vom Elektrolyt (und vom Folienwiderstand) gebildet wird. Könnte man diesen Elko an eine ideale 450-V-Spannungsquelle anschalten, es ergäbe sich im ersten Moment ein Strom von 225 A – der den Elko beschädigen könnte. An ein unter Spannung stehendes Netzgerät dürfen Elkos nur angeschaltet werden, wenn eine Strombegrenzung vorhanden ist. Wählt man z.B. $I_{\max} = 21 \text{ mA}$, dann fließt nach dem Anschalten 1 Sekunde lang dieser Strom, danach ist der Elko geladen ($Q = C \cdot U = I \cdot t$), und es sollte nur noch der Leckstrom fließen. Bei alten, lange nicht gebrauchten Elkos muss sich jedoch erst wieder eine ausreichend dicke Oxidschicht aufbauen, da ist eine Strombegrenzung besonders wichtig. Die Literatur ist sich über den Maximalstrom beim Laden lange gelagerter Elkos nicht einig, das geht von "maximal 5 mA" bis zu "alles nicht so schlimm". Einige Hersteller spezifizieren sogar eine Formel:

$$\text{Maximalstrom in mA} = \text{Außenfläche in mm}^2 / \text{Nennspannung in V.}$$

Es überrascht vielleicht, dass ein z.B. 8 cm^3 großer Elko nur mit 5 mA geladen werden darf; die Leistung beträgt hierbei ja nur gut 2 W, ein entsprechend belastbarer Widerstand wäre viel kleiner. Der dürfte aber auch viel heißer werden, und bildet keinen explodierenden Wasserstoff. Im Zweifel also lieber etwas länger warten, und den Strom begrenzen.



C = Kapazität, z.B. $47 \mu\text{F}$

R_P = Leakage, z.B. $10 \text{ M}\Omega$

R_S = ESR, z.B. 2Ω

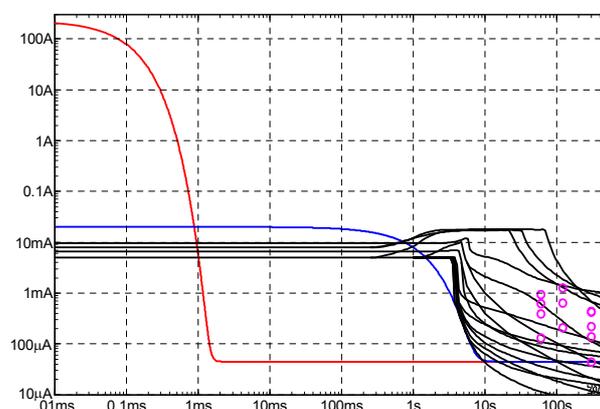


Abb. 1: Einfaches Ersatzschaltbild (links), Ladeströme (rechts). Rot = Ladung auf 450 V ohne Vorwiderstand, blau = dgl. mit Strombegrenzung (20 mA), Kreise = Herstellerangaben (Grenzwerte), schwarz = Messungen an alten und neuen Elkos. Der Stromanstieg kommt von der Strombegrenzung des Netzgerätes.

Die Hersteller spezifizieren den maximal erlaubten Leckstrom auf unterschiedliche Art, nach 1, 2 oder 5 Minuten, in alten Datenblättern auch einfach "nach längerer Betriebszeit". Ein paar Beispiele sind in Abb. 1 als Kreise eingezeichnet (47 μ F, 450 V). Die große Streubreite (Faktor 10) ist ein Abbild heutiger Elko-Vielfalt. 1969 "listete" der RIM-Katalog unter der Rubrik "HV-Elkos" genau einen einzigen Typ mit entsprechenden Daten auf: Schaleco, für DM 3,30. Heute (2017) findet man mit diesen Daten 9 verschiedene Typen – bei einem Hersteller! Bis 85°C oder 105°C, mit normaler oder extra langer Lebensdauern, mit besonders kleinem Leckstrom oder besonders kleinem ESR, für hochfrequente Schaltungen oder für Netzfrequenz, in kleinen oder großen Bechern. Vor 50 Jahren war der Standard –20 ... +70°C, mit der Option "85°C auf Anfrage". Heute sind 105°C Standard, mit $\pm 20\%$ Toleranz, vor 50 Jahren waren –20% ... +50% üblich, und es wurden sogar Elkos mit –30% ... +100% gesichtet. Vor 50 Jahren verrichtete ein HV-Elko (Hochvolt-Elko) seinen Dienst in einem Netzteil, nach einem Selen- oder Röhrengleichrichter. Heute gibt es unzählige Einsatzgebiete, Röhrenverstärker mit Gleichrichterröhren sind aber nur mehr in HiFi-Inseln und in Gitarrenverstärkern anzutreffen. Ein besonders kleiner Leckstrom wird bei ihnen nicht gefordert, wohl aber eine lange Lebensdauer bei hohen Temperaturen. Sitzt der Elko zu nahe an den sehr heißen Endröhren, wird er selbst auch heiß! In einem Marshall-Verstärker können schon mal 70°C entstehen, und dann, sagen alte Datenblätter, beträgt die Lebensdauer nur 10.000 Stunden. Oder auch nur 2.000 Stunden, je nach Hersteller und Typ. Der Elektrolyt trocknet aus, und das passiert um so schneller, je heißer der Elko wird. Wenn nicht andere Fehler vorliegen, nimmt bei der regulären Alterung der Leckstrom ab. Das scheint vorteilhaft zu sein – gleichzeitig nimmt aber auch die Kapazität ab, und das ist ungünstig. Der Leckstrom ist folglich nur ein notwendiges Kriterium, kein hinreichendes.

Wenn beim Audio-Verstärker die Kapazität der Netzteil-Elkos abnimmt, nimmt die Welligkeit der Anodenspannung zu, und damit nehmen auch Brumm-Modulationen zu [1]. Kapazitätsmessgeräte ermitteln Elko-Kapazitäten in der Regel mit einer kleinen Wechselspannung. Eine hohe Wechselspannung dürfte auch nicht anliegen, die würde den Elko zerstören. Näher am praktischen Betrieb eines Netzteil-Elkos ist jedoch die Ladung und Entladung in der Nähe der Nennspannung – da wird er ja schließlich betrieben. Da die Entladung eines Kondensators nach einfachen Regeln verläuft, kann aus der Spannungsabnahme die Kapazität berechnet werden. Zum Beispiel kann man einen Elko aufladen, und die Zeit messen, die vergeht, bis die Spannung beim Entladen auf die Hälfte abgenommen hat ($T_{50\%}$). Es gilt:

$$C = T_{50\%} / (R \cdot \ln 2) = 1.443 \cdot T_{50\%} / R ; \quad R = \text{Gesamtwiderstand}$$

Als Beispiel: Wird ein 47- μ F-Elko mit $R = 180 \text{ k}\Omega$ entladen, hat die Spannung nach 5.9 s auf die Hälfte abgenommen. Bei dieser Rechnung ist zu berücksichtigen, dass die Entladung über den externen Entladewiderstand R_E erfolgt (dazu zählt auch der Voltmeter-Widerstand), und parallel dazu über R_P . Je größer R_E , desto mehr stört R_P , je kürzer $T_{50\%}$, desto ungenauer kann die Entladezeit gestoppt werden. Sehr flexibel gestaltet sich die Analyse, wenn der Spannungsverlauf gespeichert werden kann. **Abb. 2** zeigt Entladespannungen eines 47- μ F-Elkos, hierbei wurde R_P zu 4.5 M Ω angenommen. Um die Selbstentladung zu messen, muss entweder ein Messgerät mit sehr hohem Eingangswiderstand verwendet werden ($> 100 \text{ M}\Omega$), oder man lässt den geladenen Elko für längere Zeit unbeschaltet, und schließt das Voltmeter erst nach z.B. 1 Minute an. Natürlich kann das Messergebnis auch rechnerisch korrigiert werden, es wird aber um so ungenauer, je niedriger der Voltmeter-Widerstand in Relation zu R_P ist. Die Entladungsmessung liefert als Ergebnis C und R_P , jedoch nicht R_S . Dieser ESR hat auf den Verlauf der Entladespannung so gut wie keinen Einfluss, unwichtig ist er dennoch nicht, denn in ihm wird Wärme erzeugt, und die ist unerwünscht.

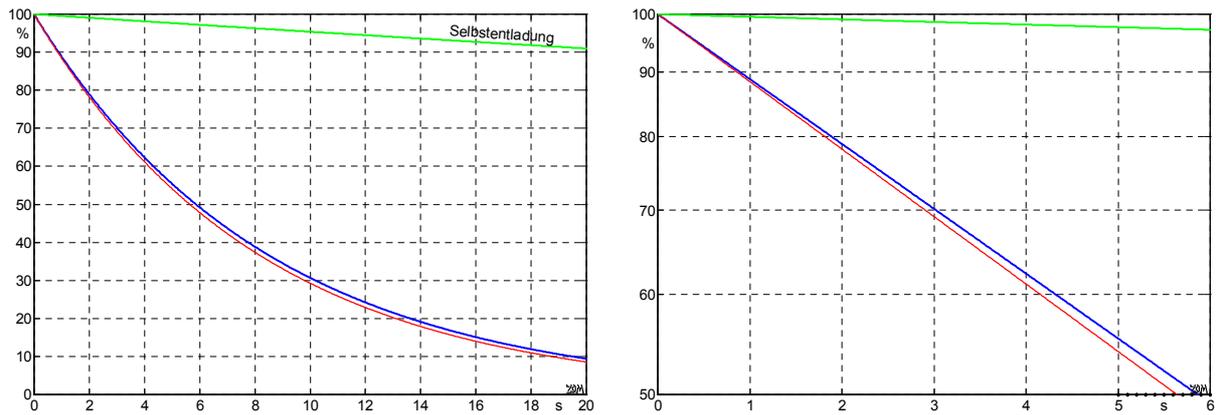


Abb. 2: Entladespannung, grün = nur R_P (4.5 M Ω), blau = nur R_E (180 k Ω), rot = Entladung mit R_E und R_P .

Der **ESR** (equivalent series resistance R_S) bestimmt die Elko-Impedanz bei hohen Frequenzen. Im Impedanz-Frequenzgang (Abb. 3) ist er der hochfrequente Grenzwert, solange man das einfache ESB aus Abb. 1 zugrund legt. Alternativ zum hochfrequenten Impedanzgrenzwert kann man auch den **Verlustfaktor*** ermitteln: $d = \tan \delta = 2\pi f \cdot R_S C$; in Datenblättern wird er meistens für 100 oder 120 Hz angegeben. Jedoch weicht der bei 100 Hz ermittelte ESR von dem bei z.B. 10 kHz ermittelten ab, der ESR dieses Ersatzschaltbildes ist frequenzabhängig. Das ist ein Zugeständnis an die Einfachheit der Schaltung, denn eigentlich müsste man nicht nur *eine* Kapazität vorsehen, sondern mehrere, mit entsprechend vielen individuellen Verlusten. Eine Begründung: Zwischen Anode und Kathode liegen mehrere inhomogene Schichten, die Metalloberflächen werden durch Ätzen sehr stark aufgeraut, die Oxidschicht ist örtlich unterschiedlich strukturiert, Feldstärke und Stromfluss sind ebenfalls ortsabhängig, sodass ein kompliziertes System mit kontinuierlich verteilten Kapazitäten und Widerständen vorliegt. Die auch noch nichtlinear und temperaturabhängig sind. Steht die genaue Modellierung zeitabhängiger Verläufe im Vordergrund, kann mit Methoden der Netzwerksynthese eine impedanzäquivalente Approximation mit frequenzunabhängigen Bauteilen erstellt werden, für einfache Betrachtungen ist aber das ESB aus Abb. 1 ausreichend. Der tieffrequente Impedanzabfall in Abb. 3 ist direkt mit der Kapazität verknüpft [$Z_C = 1/(\omega C)$], das Minimum kommt vom ESR, der hochfrequente Impedanzanstieg von der Induktivität der aufgewickelten Elektroden-Folien. Speziell die 32- μ F-Kurven zeigen starke Streuungen beim ESR. Fasst man Datenblattangaben und Messungen zusammen, erhält man als erste Näherung für den ESR: hochfrequent 0.4 ... 4 Ω , tieffrequent etwa um den Faktor 2 mehr (jeweils für 32 μ F / 450 V).

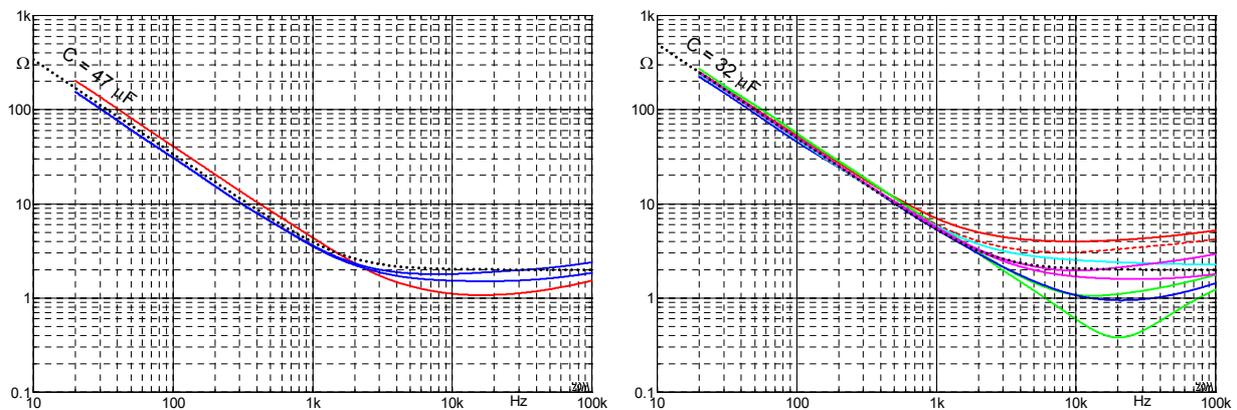


Abb. 3: Gemessene Impedanzfrequenzgänge verschiedener 450-V-Elkos. Gepunktete Kurve = einfaches ESB.

* d = Verlustfaktor, δ = Verlustwinkel.

Ein großer **ESR** hat mehrere Auswirkungen: Beim Laden und Entladen erwärmt er den Elko, Ladung und Entladung werden u.U. verzögert, die Siebung (Glättung) der Betriebsspannung ist u.U. mangelhaft. Zur **Erwärmung**: Nimmt man für den tieffrequenten Wert des ESR eines Netzteil-Elkos $10\ \Omega$ an, und eine Last, die daraus 250 mA zieht, so ist die im ESR erzeugte Wirkleistung meistens 0.625 W. "Meistens", weil der Elko ja auch nachgeladen werden muss. Dabei fließt allerdings ein größerer Strom (z.B. 1 A, [1]), und die Leistung steigt auf 10 W. Die genauen Werte von Stromflusswinkel und Spitzenstrom hängen von mehreren Parametern ab [1, Kap. 10.7], als Richtwert verbleiben im Mittel ein paar Watt, die man dem Elko gern ersparen würde. Denn je wärmer er wird, desto kürzer ist seine Lebensdauer. Als Richtwert kann man eine Halbierung der Lebensdauer für je 10° Temperaturerhöhung ansetzen, das ist schon beachtlich. Doch muss deswegen nicht gleich nach Elkos mit besonders niedrigem ESR gesucht werden, der ESR sollte nur nicht ganz am oberen Ende der Möglichkeiten liegen. Es müssen ja alle Parameter zusammenpassen: Ein Elko mit "very low ESR" kann sehr enttäuschen, wenn er 450 V aushalten muss, aber nur bis maximal 100 V produziert wird.

Durch den ersten Elko einer Stromversorgung – das ist der direkt beim Gleichrichter – fließt ein großer Wechselstrom, die Wärmeentwicklung ist beachtlich. In Elko-Datenblättern findet man gelegentlich auch Angaben zum maximalen Strom*, z.B. 0.8 A. Oder auch nur 0.13 A, die Variationsbreite ist erheblich. Gemeint ist immer der Strom-Effektivwert, er kann nur durch Messung ermittelt werden. Der durch den ersten Elko fließende Wechselstrom (ripple current) ist ungefähr 2 – 4 mal so groß wie der aus dem Netzteil entnommene Gleichstrom (Quadrat beim Effektivwert!). Überschreitet der tatsächlich fließende Strom den spezifizierten Maximalstrom, verkürzt sich (wg. Erwärmung) u.U. die Lebensdauer (→ Datenblatt).

Durch die anderen Elkos einer Stromversorgung (z.B. **Sieb-Elko** bei der Vorstufe) fließt nur ein geringer Wechselstrom. Sie wirken (zusammen mit den Längswiderständen) als Tiefpassfilter – wie wichtig ist hierbei der ESR? Eher unwichtig, wie **Abb. 4** offenbart. Bei Vollweg-Gleichrichtung ist der Gleichspannung eine 100-Hz-Wechselspannung überlagert, die auch höhere Harmonische enthält. Deren Amplituden nehmen aber zu hohen Frequenzen hin schnell ab, sodass ESR-Unterschiede praktisch nicht zum Tragen kommen.

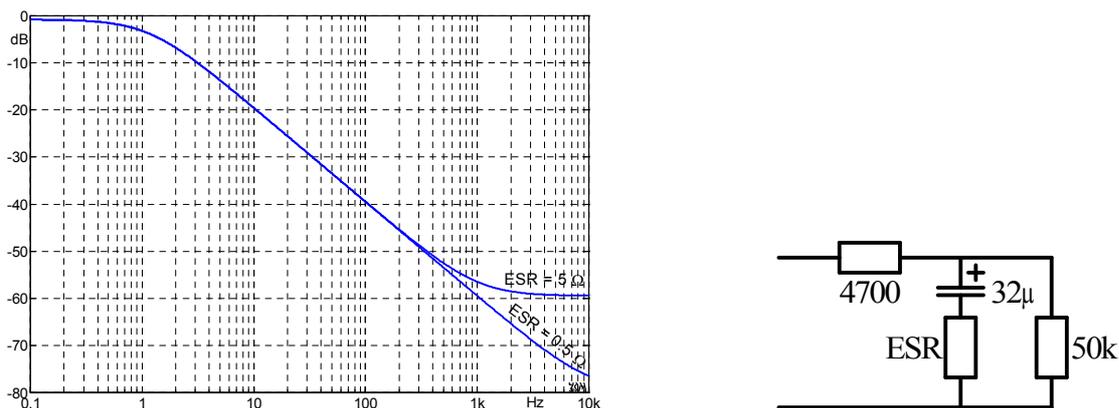
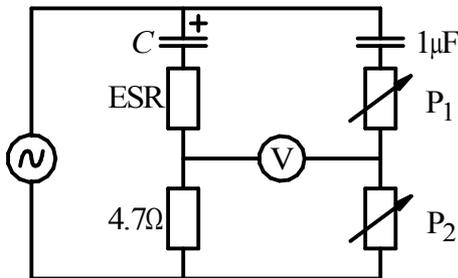


Abb. 4: Filterwirkung, Sieb-Elko mit unterschiedlichem ESR. 50 k Ω = Lastwiderstand (z.B. Vorstufenstrom).

Der hochfrequente ESR lässt sich leicht mit einer Impedanzmessung ermitteln, er ist aber, das zeigen die vorliegenden Ergebnisse, bei (nichtgetakteten) Stromversorgungen eher unwichtig. Der tieffrequente ESR kann mit einer einfachen Messbrücke bestimmt werden (**Abb. 5**).

* bei 100 Hz, für 47 μ F / 450 V. Achtung: Manchmal wird der Maximalstrom auch für 100 kHz spezifiziert!

Man benötigt hierfür zwei Potentiometer (z.B. 500 Ω linear), einen hochwertigen Folienkondensator (keinen Elko), einen Sinusgenerator, einen Widerstand und ein empfindliches AC-Voltmeter. Die Messbrücke ist abgeglichen, wenn die Spannung im Querzweig zu null wird. Selbstverständlich können auch andere Bauteilwerte verwendet werden, die Formeln sind dann dementsprechend abzuändern.



$$ESR = 4.7\Omega \cdot \frac{P_1}{P_2}$$

$$C = \frac{1\mu\text{F} \cdot P_2}{4.7\Omega}$$

Abb. 5: Messbrücke zur Ermittlung von C und ESR. Die Spannung am Elko sollte $0.5 V_{\text{eff}}$ nicht überschreiten.

Neben den Lade- und Sieb-Elkos der Spannungsversorgung kommen in Röhrenverstärkern auch im Kathodenkreis Elkos zur Anwendung. Sie überbrücken den Kathodenwiderstand und erhöhen dadurch die Wechselspannungs-Verstärkung. Häufig kommt ein $22\text{-}\mu\text{F}$ -Elko zur Anwendung, in einigen Marshall-Schaltungen auch ein $220\text{-}\mu\text{F}$ -Elko. **Abb. 6** zeigt Messergebnisse zum Impedanzfrequenzgang; die Kurven sind völlig unproblematisch, solange nur die Kapazität ungefähr stimmt und der hochfrequente Ast unter etwa 10Ω bleibt.

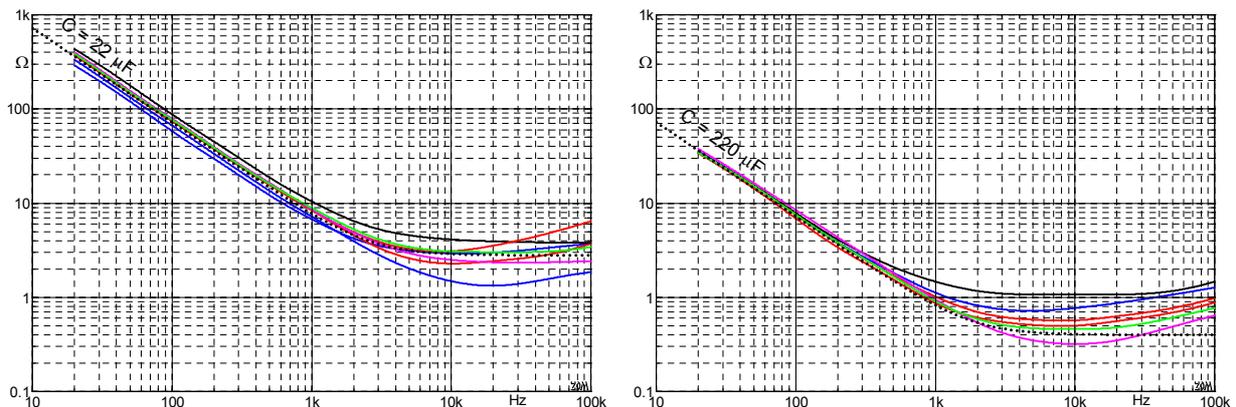


Abb. 6: Gemessene Impedanzfrequenzgänge einiger Elkos ($22 \mu\text{F}$ bzw. $220 \mu\text{F}$, $16 - 35\text{V}$),

Der Leckstrom der gemessenen Elkos war mit $< 0.1 \mu\text{A}$ weit unterhalb der kritischen Grenze. Im Kathodenkreis fließen meistens ca. $1 - 2 \text{ mA}$, der Leckstrom hat auf den Arbeitspunkt somit keinen Einfluss. Das heißt nun nicht, dass Elkos generell unproblematisch sind. Sie können defekt werden, und dann müssen sie ausgewechselt werden. Es ist (bei den hier im Fokus stehenden Gitarrenverstärkern) jedoch nicht erforderlich, Elkos mit ganz besonderen Daten zu selektieren – Standardware ist gut genug, solange kein Defekt vorliegt. Einen guten Überblick über den Elko-Zustand bekommt man mit drei einfachen Messungen: Leckstrom, Impedanz-Frequenzgang, und Verlustfaktor bzw. ESR bei 100 Hz . Beim Austausch defekter Elkos ist vor allem auf ausreichende Spannungs- und Temperaturfestigkeit zu achten. Die angegebene Nennspannung darf kurzfristig um 10% überschritten werden, langfristig ist keine Überschreitung zulässig – der Elko könnte explodieren! Ob 105°C -Elkos besser sind als 85°C -Elkos, kann nur im Einzelfall entschieden werden. Ein mit $85^\circ / 20.000\text{h}$ spezifizierter Elko könnte sich als besser herausstellen als ein mit $105^\circ / 2.000\text{h}$ spezifizierter, solange die Temperatur unter 85°C bleibt (Datenblätter vergleichen).

Es wurde schon darauf hingewiesen, dass die Elko-Parameter nicht nur von der Frequenz, sondern auch von der Temperatur abhängen. Bei sehr niedrigen Temperaturen "gefriert" der Elektrolyt, die Verluste nehmen zu, die Kapazität nimmt ab. Bei hohen Temperaturen trocknet der Elektrolyt zu schnell aus, die Lebensdauer nimmt ab. In Datenblättern werden die Elko-Parameter bei unterschiedlichen Temperaturen spezifiziert. Nicht untypisch ist z.B.:

Die Lebensdauer bei der Grenztemperatur (z.B. 2000 h bei 105°C)

Die Nennspannung bei der Grenztemperatur (z.B. 450 V bei 105°C)

Der maximale Wechselstrom bei der Grenztemperatur (z.B. 0.2 A bei 100 Hz, 105°C)

Der Leckstrom bei Raumtemperatur (z.B. $0.03 \mu\text{A} \cdot C \cdot U$; C in μF , U in V, bei 25°C)

Der ESR bei Raumtemperatur (z.B. $< 3 \Omega$ bei 25°C)

Die Kapazität bei 100 Hz und Raumtemperatur (z.B. 47 μF bei 25°C)

Abschließend soll noch kurz ein etwas unerwarteter Effekt erläutert werden: das "Nachladen". Wird ein geladener Elko schnell entladen, sodass seine Spannung auf kleine Werte abnimmt, steigt anschließend unter Leerlauf die Spannung wieder an – durchaus bis auf 10% der Ladespannung. Mit dem einfachen ESB aus Abb. 1 ist das nicht zu erklären, da kann die Spannung beim und nach dem Entladen nur abnehmen. Zur Erklärung des **Nachlade-Effektes** muss das ESB um weitere RC-Glieder ergänzt werden. Hierzu gibt es mehrere Schaltungsvarianten, die bezüglich ihres Zeit- und Frequenzverhaltens äquivalent sind*. In **Abb. 7** ist grün ein gemessener Entladestromverlauf dargestellt. Bei einem idealen Kondensator nimmt der Entladestrom nach einer e -Funktion ab, was in halblogarithmischer Darstellung eine Gerade ergibt. Ganz zu Beginn ist das bei der grünen Kurve auch zu sehen (blau approximiert), doch schon bald verläuft die grüne Kurve immer flacher und nähert sich in etwa der roten Geraden an. Die Approximation mit einer einzigen e -Funktion ist da unbefriedigend, mit drei überlagerten e -Funktionen (rechtes Bild) erhält man aber schon ein gutes Ergebnis.

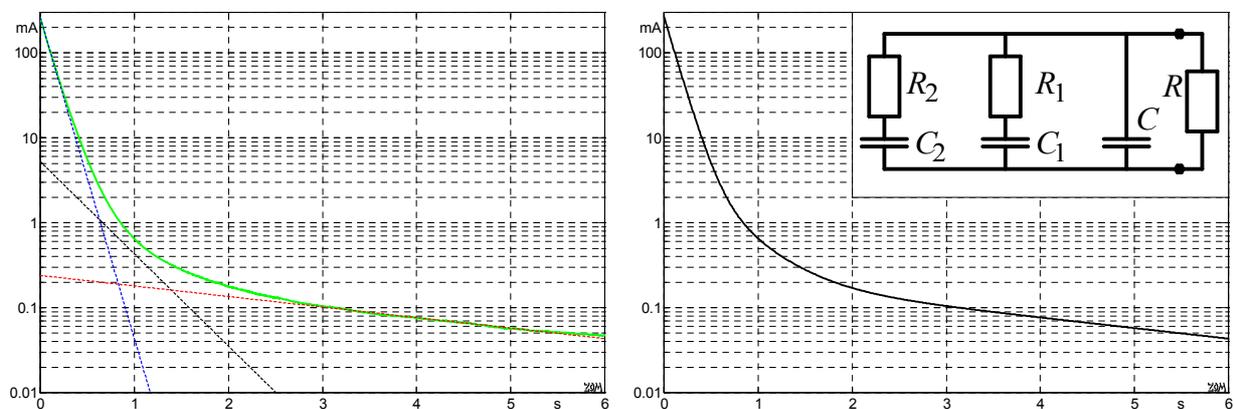


Abb. 7: Grün = Entladestrom eines auf 500 V aufgeladenen 58- μF -Elkos (Entladewiderstand = 2 k Ω). Die gestrichelten Geraden zeigen den Verlauf bei rein exponentieller Stromabnahme. Rechts: Modell dritter Ordnung.

$R = 2 \text{ k}\Omega$ (Entladewiderstand), $C = 58 \mu\text{F}$, $R_1 = 99 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 4.0 \mu\text{F}$, $R_2 = 2.2 \text{ M}\Omega$, $C_2 = 1.6 \mu\text{F}$,

C ist die Nennkapazität, sie wird über R schnell entladen (blaue Asymptote). $R_1 C_1$ ist mit 0.4 s schon deutlich länger (schwarz), $R_2 C_2$ ist mit 3.5 s (rot) noch länger. Auch wenn man den Elko mit einem kleinen Widerstand schnell entlädt – die Modellkapazitäten C_1 und C_2 können ihre Ladung nur langsam abgeben. Sie können aber auch nur langsam aufgeladen werden, deshalb hängt die Entladekurve auch von der Ladezeit ab. Und da macht es einen merklichen Unterschied, ob der Elko 10 s oder 30 min an Nennspannung angeschlossen war.

* Die Zuordnung der Bauteile zu bestimmten Polarisationsmechanismen ist dabei nicht das Ziel.

In **Abb. 8** sind im linken Bild zwei Entladevorgänge dargestellt. In beiden Fällen wurde der Elko auf 500 V aufgeladen, einmal 10 Sekunden lang, das andere Mal 30 Minuten. Man erkennt, dass die rote Asymptote aus Bild 7 eigentlich immer noch nicht flach genug ist, für die gewählte Analysedauer wäre eine vierte Asymptote mit ungefähr $\tau = 30$ s erforderlich. Derart langsame Relaxationsvorgänge erklärt die Werkstofftechnik mit Orientierungs- und Raumladungspolarisation [2].

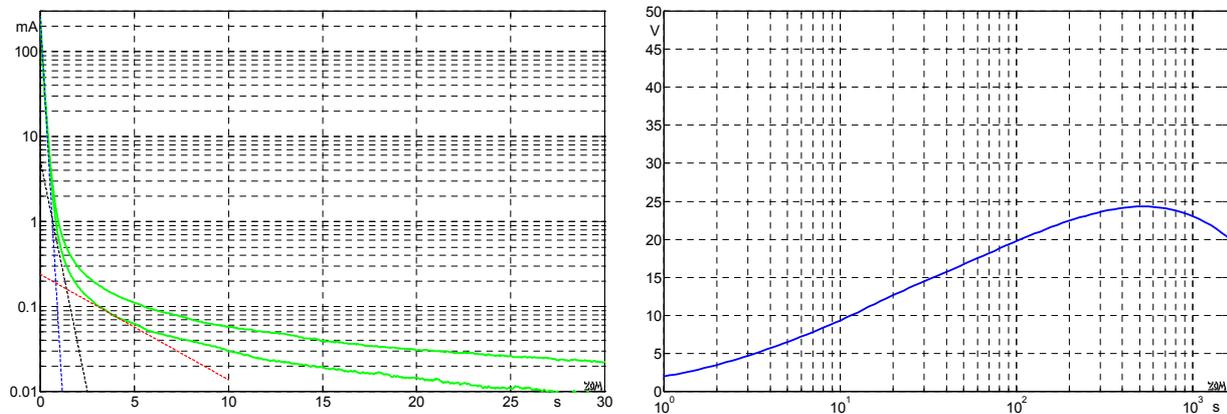


Abb. 8: Entladestrom (grün) nach unterschiedlich langer Ladung. Rechts: "Nachladen" nach Kurzschluss. Die Nachlade-Spannung kann bei Al-Elkos bis auf 10% der Ladespannung ansteigen.

Im rechten Bild von **Abb. 8** ist der Spannungsanstieg nach Entladung des Elkos dargestellt. Hierzu wurde der Elko 30 Minuten lang an 500 V aufgeladen, und anschließend 5 Sekunden lang niederohmig entladen. Danach wurde der Entladewiderstand abgetrennt, die Kurve zeigt den Spannungsanstieg bei Leerlauf. Auch dieser Effekt ist mit dem ESB aus **Abb. 7** gut erklärbar, ggf. sind weitere RC -Glieder (mit größerem R und kleinerem C) erforderlich, sowie ein Leakage-Resistor (parallel zum ESB) und der ESR (in Reihe zum ESB).

Literatur

[1] Zollner M.: Physik der Elektrogitarre, www.gitarrenphysik.de

[2] Dielektrische Eigenschaften von Materialien, TU Ilmenau, Inst. für Werkstofftechnik.

Fachartikel in www.gitarrenphysik.de

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1 Gitarren-Lautsprecher | 11 Schaltungsvarianten für das Reguitaring |
| 2 Studio-Lautsprecher | 12 Verzerrungen: gerade oder ungerade? |
| 3 Welche ECC83 darf's denn sein? | 13 Die Basswiedergabe beim Studio-Monitor |
| 4 Reamping and Reguitaring | 14 Vom Sinn und Unsinn der CSD-Wasserfälle |
| 5 Gitterstrom bei Trioden | 15 Artefakte bei Wasserfall-Spektrogrammen |
| 6 Der Verzerrer | 16 Equalizer, Teil 1 – 3 |
| 7 Der Range-Master rauscht | 17 Studio- und Messmikrofone, Teil 1 – 5 |
| 8 Raumakustik | 18 Die Dummy-Load als Lautsprecher-Ersatz |
| 9 Saitenalterung | 19 Nichtlineare Modelle |
| 10 Lautsprecherkabel | 20 Wie misst man Elkos? |
| | 21 Der Lautsprecher-Phasengang |