

10.9.3 Koppelkondensatoren

Koppelkondensatoren? Für die einen ein Cent-Artikel, in seiner Bedeutungsschwere einer Blechschraube vergleichbar, für die anderen das Objekt der Begierde, in das schon mal 50 € investiert werden. Der Koppelkondensator (Koppel-C) trennt den Wechselanteil der Anodenspannung vom Gleichanteil, er koppelt den Wechselanteil aus. Wenn die Anodenspannung zwischen 200 V und 300 V sinusförmig schwankt, kann alternativ von 250 V Gleichspannung mit überlagerter Wechselspannung (50 V Amplitude) gesprochen werden. Der Koppel-C lässt nur den Wechselanteil durch und sperrt den Gleichanteil. Dass er eigentlich gar nichts durchlässt, weil in seinem Inneren ein Isolator sitzt, kann zunächst genauso ignoriert werden wie die Tatsache, dass dieser Isolator, noch genauer betrachtet, nicht perfekt isoliert. Ein Kondensator lässt Wechselstrom durch und sperrt Gleichstrom ist eine gute erste Arbeitshypothese. Die bei Bedarf verbessert werden kann und muss. Wenn's denn so einfach ist: Warum berichten dann "those in the know", die selbsternannten Verstärkergurus aller Herren Länder, mit verschwörerischer Miene, dass sich erst mit dem Austausch der Koppelkondensatoren der heißersehnte Klang eingestellt hat? Dass, so man in dem einen Lager sitzt, nur mit den ABC-Orange-Drops der Original-Fender-Sound entsteht, während das gegnerische Lager vor eben jenen ABC-Orange-Drops warnt (mittiger Sound, völlig ungeeignet), und stattdessen die gelben Mustard-Caps empfiehlt. Aber nicht die ABC-Mustards, weil das inadäquate Nachbauten sind, Clones sozusagen, nein, die anderen, die Original-Nachbauten. Oder noch besser: Silber-Folien-Kondensatoren, oder, wenn das Budget beschränkt ist: Kupfer-Folien-Kondensatoren. Nein, das mit der Beschränktheit vertiefen wir jetzt nicht, mit der naiven Neugier des Forschers suchen wir lieber, ob in einem Haufen Unsinn nicht doch ein Körnchen Wahrheit liegt.

Ein Kondensator ist im Rahmen der vorliegenden Betrachtung ein Bauteil einer elektrischen Schaltung, und als solches dem Regelwerk der Elektrotechnik zugehörig. Ob er eine Aura hat, ob ihm spirituelle Energie innewohnt oder ein feinstoffliches Psi, wird hier nicht untersucht. Das sehr leistungsfähige Instrumentarium der **Maxwellschen Gleichungen** beschreibt zu allseitiger Zufriedenheit die Vorgänge in elektromagnetischen Feldern, hiermit wurden Funktechnik, Weltraumfahrt und EMP berechenbar, warum nicht auch die Triodenvorstufe eines Gitarrenverstärkers? Aber diese große Keule, die immer dann geschwungen wird, wenn man wirklich bei Adam und Eva bzw. bei James und Clerk anfangen möchte, soll hier nur als Startpunkt dienen, den man möglichst schnell wieder verlässt. Bei Beschränkung auf den Hör-frequenzbereich und auf konzentrierte Bauteile, also Bauteile, die kleiner als etwa 1 km sind, kann die zweite Maxwellsche Gleichung zum zweiten Kirchhoffschen Satz (**Maschensatz**) vereinfacht werden:

$$\oint_K \vec{E} \cdot d\vec{k} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^n U_i = 0 \quad \text{2. Maxwellscher bzw. Kirchhoffscher Satz.}$$

Das Linienintegral (Kurvenintegral) der Feldstärke \vec{E} längs der geschlossenen Kurve K ist null, sowie auch die Summe von n Zweigspannungen U_i über die geschlossene Masche null ist. Ganz entsprechendes gilt für den (leicht modifizierten) 1. Maxwellschen Satz:

$$\oiint_A \vec{S} \cdot d\vec{a} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad \text{1. Maxwellscher bzw. Kirchhoffscher Satz.}$$

Das Hüllflächenintegral über die Stromdichte \vec{S} ist null, die Summe aller n Knotenströme I_i ebenso (**Knotensatz**, Satz von der Ladungserhaltung).

Im elektromagnetischen Feld gibt es nur drei materialkennzeichnende Größen: Den spezifischen Widerstand ρ , die Permittivität (Dielektrizität) ϵ , und die Permeabilität μ . Beschränkt man sich wieder auf den Hörfrequenzbereich, können magnetische Eigenschaften bei typischen Kondensatormaterialien vernachlässigt werden, sodass zur formalen Beschreibung nur Knoten- und Maschensatz, sowie zwei Materialgleichungen übrigbleiben. Trotz dieser relativ einfachen Analysis existiert eine Reihe von Missverständnissen, die ihre Ursachen häufig im unsachgemäßen Anwenden eigentlich richtiger Erkenntnisse haben. Die Elektrotechnik wurde ja nicht entwickelt, um damit Gitarrenverstärker bauen zu können, sie ist – mit Verlaub – älter. Neben anderen wichtigen Gebieten, wie z.B. der Energietechnik, war die Übertragung von Nachrichten ein zentrales Thema: Wie überträgt man mithilfe von "**Funkwellen**" Sprache oder Morsezeichen über große Entfernungen? Heinrich Hertz [1886] und Marconi [1901] sind hier neben vielen anderen zu nennen. Die erste Funkübertragung über den Atlantik fand eine Generation vor Rickenbacker/Gibson/Fender statt, und schon da gab es Kondensatoren: Die sog. "Leidener Flasche" wurde noch viel früher erfunden, nämlich 1745. Funkübertragung funktioniert nun aber gerade nicht im Hörfrequenzbereich, hier wird *Hochfrequenz* benötigt: Ca. 1 MHz für den Mittelwellenbereich, ca. 10 MHz für Kurzwelle. Wenn nun eine der Bibeln der frühen Tage "The Radio Engineers' Handbook" hieß, und nicht "The Guitar Amp Designers' Handbook", kann man sich leicht vorstellen, was passiert: Da liest dann einer, dass Kondensatoren bei höheren Frequenzen ihre Probleme haben, gar induktiv werden sollen, und fürchtet prompt um die silbrigen Höhen des weltberühmten Fender-Sounds. Und, als hätte man sie hierfür gebaut: Es gibt tatsächlich **Silver-Mica-Caps**! Die müssen doch den silbrigen Fender-Höhen auf die Beine helfen können! Nicht, dass die Lautmalerei "silbrige Höhen" angegriffen werden soll, das kann als Fachbegriff durchaus so stehen bleiben. Es trifft auch zu, dass Kondensatoren **induktiv** werden, aber bei welchen Frequenzen? Selbst die mit einer Spule nur sehr entfernt verwandten Wickelkondensatoren weisen Auswirkungen dieser Induktivität erst oberhalb von 1 MHz auf, also "bei höheren Frequenzen". Das heißt aber nicht "im höheren Hörfrequenzbereich", da liegt ungefähr der Faktor 50 dazwischen! Auch die **Verlustfaktoren**, die bei Kondensatoren bekanntermaßen "zu höheren Frequenzen hin ansteigen", machen eher dem HF-Techniker oder Filter-Designer zu schaffen. Ein typischer Röhren-Gitarrenverstärker enthält jedoch weder einen Kurzwellen-Eingang, noch ein Cauer-Filter 12. Ordnung, der verlustarme Styroflex-Kondensator ist hier deplaziert (Hitze!).

Zu den Schwierigkeiten, Bücher über Hochfrequenztechnik richtig zu interpretieren, kommen die Probleme der **Psychometrie**: Wie misst man Hörwahrnehmungen? In Kap. 10.9.4 (Schallereignis, Hörereignis) werden hierzu einige Vorschläge unterbreitet, und insbesondere auf die Notwendigkeit von Blindversuchen hingewiesen. Die Praxis sieht anders aus: Da schreibt ein Hersteller, seine Kondensatoren müssten erst **100 Stunden** eingespielt werden, bevor sie gut klingen. Und genau das hört auch der Gitarrist, der seinen (klanglich nicht überzeugenden) Marshall damit ausrüstet: "Erst nach 100 Stunden", so erzählt er all seinen Kollegen, "waren die Höhen so, wie sie sein sollten." Dass technisches Gerät eine Anlaufphase braucht, ist ja bekannt: Das betrifft den Automotor (1000 km einfahren) genauso wie die Grillkohle (nach 10 Minuten sollte kein Rauch mehr aufsteigen). Und wenn man dem Politiker 100 Tage Schonfrist zugesteht, warum nicht dem Kondensator 100 Stunden? Überlegen wir mal: Der Amateur, der wöchentlich 10 Stunden spielt, kommt nach 2,5 Monaten an den Punkt, wo er sich zurückerinnert, wie das war, als die Kondensatoren gerade frisch eingelötet waren: Grausam war das, die Höhen wollten einfach nicht klingen. Aber jetzt, nach einem knappen Vierteljahr, sind die Höhen plötzlich da. Und der Grund dieser Klangverbesserung ist nicht bei den gealterten Röhren* zu suchen, nicht beim Lautsprecher, und schon gar nicht bei den mehrfach gewechselten Saiten. Nein, die Kondensatoren sind's, die Gitarrenzeitschrift hat ja

* Die, laut Herstellerangabe (anno 1952) eine Einspielzeit brauchen. Und zwar, oh Wunder: ca. 100 Stunden.

dasselbe herausgefunden, empfiehlt sogar bis zu 200 Stunden Einspielzeit (noch ein weiteres Vierteljahr warten). Aber vielleicht ist ja doch etwas dran, bei Röhren bezweifelt ja auch niemand zeitvariante Klangänderungen? Ob Kupferfolien-Kondensatoren besser klingen als Aluminiumfolien-Kondensatoren (weil Kupfer niederohmiger ist), das muss doch zweifelsfrei rauszubringen sein! Skeptiker, die hierbei auf fehlende Daten zur Foliendicke verweisen, ließen sich vielleicht überzeugen, wenn denn die Hörversuche nicht gar so große Defizite aufweisen würden. Ein Hörversuch mit der Ankündigung: "Jetzt löte ich die Kupferfolien-Kondensatoren ein, das gibt einen viel druckvolleren Sound" ist nutzlos, weil alle Teilnehmer befangen sind. Einen viel besseren Weg findet man bei **Tone-Lizard.com** beschrieben: Da werden am 6-stufigen Umschalter schon mal 5 Schalterstellungen mit demselben Kondensator beschaltet. Also nicht 5 gleiche, sondern wirklich ein und derselbe Kondensator an 5 Schalterpositionen – aber ohne dass der Beurteilend das weiß! Und dann erklärt der befragte Gitarrist: *'Der Orange-Drop-Cap von Position 1 klingt besser als der von Position 4'*. Selbstverständlich ist das nur ein Einzelfall, ebenso selbstverständlich darf die Aussage *'ich hör' da einfach keinen Unterschied'* nicht vorkommen, der Soundexperte will sich ja nicht selbst demontieren. Und deshalb haben Kondensatoren ihren eigenen Sound, wie jede Schraube und Niete auch.

Wer als erster den Mythos der 100 h Kondensator-Einspielzeit aufgebracht hat, ist nicht mehr herauszufinden. Denkbar ist: In Kondensator-Datenblättern wird eine **Zeitkonstante** angegeben, deren Wert bei hochwertiger Bauweise z.B. 100.000 s beträgt, das entspricht knapp 28 h. Wenn jetzt noch Erinnerungsreste da sind, dass man beim Ladevorgang etwa 5 Zeitkonstanten abwarten muss, ist man schon bei 140 Stunden angekommen: Das ist die Einspielzeit. Das ist sie natürlich nicht, das sind Angaben zum Isolationsverhalten! Auch wichtig, aber auf später vertagt. Diese Leerlauf-Zeitkonstante (!) würde nur eine Rolle spielen, wenn der Kondensator völlig unbeschaltet wäre, und wer möchte das in einem Gitarrenverstärker? Eingebaut ist der Kondensator am einen Ende vom Gitterableitwiderstand (z.B. 1 M Ω) belastet, und am anderen Ende von Röhre und Anodenwiderstand (z.B. 50 k Ω). Multipliziert man die Summe dieser Widerstände mit der Kapazität, erhält man die Betriebs-Zeitkonstante, und die ist viel kleiner als die Leerlauf-Zeitkonstante, z.B. 22nF · 1,05 M Ω = 0,023 s. Nimmt man diesen Wert noch mal 5 (wie oben), landet man bei 0,12 Sekunden "Einspielzeit", wenn man so will.

Alternativ wird auch mit Materialveränderungen argumentiert, die nach Anlegen der Spannung beginnen, und sich erst stabilisieren müssen. Da wurde wohl den Kollegen aus der Elko-Abteilung zu intensiv über die Schulter geschaut: Ein **Elektrolyt**-Kondensator (Al-Elko) verwendet wie der Folienkondensator eine aufgerollte Aluminiumfolie, das Dielektrikum wird aber nicht von der dazwischenliegenden Kunststofffolie gebildet, sondern von einer dünnen Al₂O₃-Schicht (Aluminium-Oxid), die erst beim **Formierungsprozess** auf die Anode aufwächst. Nur diese Oxidschicht isoliert einigermaßen, deshalb darf kein unformierter Elko abrupt an Spannung gelegt werden. Nur – was hat das mit Koppelkondensatoren zu tun, die im Gitarrenverstärker niemals als Elkos ausgeführt sind? Dort werden Polyester- oder Polypropylen-Kondensatoren eingesetzt, die kann/muss man nicht formieren. Aber könnten nicht doch irgendwelche langsamen, u.U. unbekanntenen Prozesse an der Metalloberfläche oder im Dielektrikum ablaufen? Ja, das ist sogar sehr wahrscheinlich, die Feldstärke ist hoch, die Temperatur auch. Nehmen wir also an, der Kondensator verändert sich in den ersten 100 h. Welche Parameter könnten sich dabei verändern? Auf alle Fälle müsste sich die **Impedanz**, d.h. der komplexe Wechselstromwiderstand, ändern. Eine Änderung, die keinerlei Auswirkung auf die Impedanz hätte, könnte auch nicht die Gitterspannung der folgenden Verstärkerstufe ändern – und es wird ja wohl niemand behaupten wollen, der Klang könne sich ändern, obwohl alle Verstärkerspannungen gleich bleiben. Nun ist das mit der Impedanz aber

so eine Sache: Die ist nur im linearen Modell definiert, im **nichtlinearen Modell** gibt's keine Impedanzen. Kann ein Koppelkondensator nichtlinear sei? Natürlich, jeder Kondensator ist nichtlinear, vergrößert sich doch seine Kapazität, sobald eine Spannung anliegt (geladene Elektroden ziehen sich an, verkleinern den Elektrodenabstand und vergrößern die Kapazität). Schon eine einfache Orientierungsrechnung zeigt aber, dass die entstehenden Drücke (einige kPa) zusammen mit dem Elastizitätsmodul (um 1.000.000 kPa) um Größenordnungen unter kritischen Verformungs-Grenzwerten bleiben. Wie auch die Klirrfaktor-Messung bestätigt: Sofern man nicht einen HDK-Keramik-Kondensator nimmt (untypisch für Koppelkondensatoren), bleibt der Klirrfaktor unter 0,01%. Ergo: Linearität, in sehr guter Näherung.

Welche Parameter könnten sich also ändern? Der **Isolationswiderstand**, um mit ihm zu beginnen. Von 50 G Ω könnte er z.B. auf 100 G Ω zunehmen (☺), oder auf z.B. 25 G Ω abnehmen (☹?). Setzt man für den Eingangswiderstand der folgenden Stufe 1 M Ω an, so fließt (bei 200 V Anodenspannung) ein Leckstrom von 4 nA (bzw. 2 nA, bzw. 8 nA), das ergibt zusammen mit dem 1-M Ω -Widerstand eine Arbeitspunktverschiebung um 4 mV (bzw. 2 mV, bzw. 8 mV). Keiner dieser Werte ist so richtig besorgniserregend, vor allem: Bei nur 25 G Ω Isolationswiderstand hätte der Hersteller bereits die rote Karte gezogen: Das ist, zumindest bei Marke, außerhalb der Spezifikation. Und ganz im übrigen: Wartet man wirklich 100 Stunden, bis sich der Isolationswiderstand ausreichend verschlechtert hat? Das könnte man einfacher haben. Nein, der Isolationswiderstand kann zwar sehr schlecht sein, und ist es auch bei sehr altgedienten Kondensatoren (!), aber bei neuer Marke ist er ausreichend gut, und verändert den Klang nicht hörbar.

Also die **Kapazität**. Ändert die sich in den ersten 100 Stunden? Ja natürlich, *panta rhei*, wie wir wissen, alles ändert sich, aber ändert sie sich wesentlich? Die Datenbücher guter Kondensatoren spezifizieren tatsächlich eine Änderung: Z.B. $<\pm 1\%$, bei 70°C, während der ersten 2 Jahre. Wieder nichts. Und auch hier würde gelten: Falls der Sound erst gut ist, wenn die Kapazität um x% zu- oder abgenommen hat – das könnte man einfacher erreichen.

Bleibt: Der **Verlustfaktor**. Er könnte abnehmen, was auch ohne genaue Kenntnisse wünschenswert klingt (weniger Verlust von was auch immer), oder zunehmen. Aber nein, nach 100 h klingt der Kondensator ja besser, also vermutlich *weniger* Verluste. Von "smeared sound to clear sound", wie der Guru erläutert. Hat eigentlich schon mal jemand gefragt, warum man sich für teures Geld einen, ach was, mehrere Kondensatoren in den Verstärker löten soll, die 100 oder sogar 200 oder noch mehr Stunden "smeared" klingen?? Vermutlich schon, mit der verblüffenden Antwort: "Weil danach ein unerhörtes Sounderlebnis einsetzt, das die Massenware niemals vermitteln kann". Per *Aspera ad Astra*, auch das kennen wir. Wenn der Verlustfaktor klangbestimmend ist (wer will schon Klang verlieren?), dann müssten für Koppelkondensatoren die verlustärmsten Dielektrika Verwendung finden, richtig? Also käme, so man das weniger temperaturfeste Polystyrol aussondert, **Polypropylen** in Frage. Und tatsächlich, ebendies findet sich in den schon erwähnten Orange-Drop-Kondensatoren. Nur: Gerade die soll man – so empfiehlt der Gegenguru – nicht einbauen, sondern nur die mit **Polyester** als Dielektrikum, wie bei den Originalen der 60-er-Jahre. "Because of its deeper tonal quality" (was immer das sein mag), ergänzt der Hersteller. Polyester hat nun aber einen ca. 100x höheren Verlustfaktor als Polypropylen – jetzt wird's kritisch. Könnte es also sein, dass die Lösung lautet: *Mehr* Verluste für besseren Sound? Eine kurze Rechnung hilft weiter: Polyester lässt bei 10 kHz einen Verlustfaktor von 1% erwarten, im HF-Ersatzschalbild (siehe später) entspricht das einem 7- Ω -Reihenwiderstand (bei $C = 22$ nF). Den muss man sich nun in Reihe zu dem Quellwiderstand der vorhergehenden Röhrenstufe denken (z.B. 50000 Ω), und das war's dann: 50007 Ω statt 50000 Ω . Clear? Oder smeared?

Nein, die Verluste helfen auch nicht weiter. Bei einem Kurzwellenschwingkreis könnte man eher in Bedrängnis kommen, aber da baut niemand einen frequenzbestimmenden 22-nF-Kondensator ein. Nein, Verluste erklären keine Klangunterschiede beim Koppel-C.

Next comes the **Slewrates**, der Hersteller hat noch Asse im Ärmel. Die Slewrates ist der zeitliche Differentialquotient der am Kondensator anliegenden elektrischen Spannung, auch Änderungsgeschwindigkeit der Spannung genannt, angegeben in V/μs. Wieder hilft der Blick in die Datenbücher, und tatsächlich: Da gibt's Grenzwerte, die nicht überschritten werden dürfen. Z.B. 500 V/μs beim Polyesterkondensator, oder auch nur 30 V/μs; oder 750 V/μs beim Polypropylenkondensator, oder sogar mehr als 1000 V/μs. Und nicht zu vergessen: Die *beträchtlich klangsteigernden Glimmerkondensatoren* mit ihren 100.000 V/μs. Da sind tatsächlich große Unterschiede festzustellen, liegt hier das Geheimnis? Rechnen wir: Eine Röhre, die bei 3 kHz eine Anoden-Wechselspannung von $30V_{\text{eff}}$ erzeugen muss, erreicht 0,8 V/μs. Vollaussteuerung bei 20 kHz schafft der Magnettonabnehmer nicht, deshalb 3 kHz. Oder etwas mehr, dann ist die Slewrates gerade 1 V/μs. Das scheint angesichts der o.a. Werte problemlos zu sein, aber: Die Röhre kann erheblich übersteuert werden, z.B. 30-fach, und damit wird der o.a. Grenzwert erreicht. Treffer? Nein, wieder nicht: Diese Slewrates entsteht an der Anode, nicht am Kondensator! Die Kondensatorwechselspannung ist ja viel kleiner, und nimmt mit steigender Frequenz sogar noch ab. Deshalb ist beim Koppelkondensator die Slewrates auch ein *wenig* aussagekräftiger Parameter, da eignet sich die äquivalent angebbare **maximale Strombelastbarkeit** des Kondensators viel besser. Datenbücher spezifizieren Grenzwerte von 0,1 – 1 A, bzw. *über 1000 A beim Glimmer-Kondensator*; reicht das? Schon, die typische Noval-Triode kann ja nur einige wenige Milliampere liefern. Wieder nichts. Außer vielleicht der Vermutung, dass der Urheber des Kondensatorgerüchtes einmal eine Lautsprecher-Frequenzweiche gebaut hat. Da schaut's natürlich ganz anders aus, da fließen die großen Ströme, $100\text{ W} = (5\text{ A})^2 \cdot 4\Omega$, also 7 A Spitzenstrom. Könnte es sein, dass da jemand Entwurfsregeln, die für **Frequenzweichen** gelten, für Koppelkondensatoren missbraucht hat? Der Hersteller mit den teuren Kupferfolien-Kondensatoren ist ja auch für seine Frequenzweichen bekannt. O-Ton Guru: "Ein unglaublich fetter Sound...". Unglaublich?

Weiter geht's, die **Induktivität** des Koppelkondensators taucht auf: Sie lässt sich *heute so weit reduzieren, dass bereits 0,8 nH/mm RM erreicht werden können*. RM steht für Rastermaß und nicht etwa für Raummeter, wie man angesichts der schieren Größe dieser Super-Koppelkondensatoren (45mm x 26 mm) auch vermuten könnte. Bei Roederstein (ERO) liest man viel größere Nanohenrywerte (12 nH), aber Halt, das ist ja auch ein Katalog von 1980. Wie groß war gleich noch mal dieser Super-C? 45 mm lang? Also $45 \times 0,8\text{ nH} = 36\text{ nH}$? Und ERO war auch pro RM? Nein, das war die Gesamtinduktivität. Was sich doch seit den 80-er-Jahren so alles getan hat! Ganz nebenbei: Auch 36 nH sind in Ordnung, bei 10 kHz beträgt ihr Blindwiderstand 0,0023 Ω. Der kommt zu den 50000 Ω hinzu. Pythagoreisch, natürlich.

Was bleibt? Nicht mehr viel, eventuell der **Skineffekt**, auch damit wird geworben. "*Bei hohen Frequenzen (das kennen wir jetzt schon) fließt der Strom nur mehr entlang der Außenseite des Drahtes, dadurch wird der Leitungsquerschnitt verkleinert, und der Widerstand vergrößert.*" Das ist völlig richtig erkannt: *Bei hohen Frequenzen*. H. H. Meinke begann seine berühmte HF-Vorlesung immer genau damit, und meinte: "*Und das kann schon bei 10 kHz angehen*". So in etwa ab dieser Frequenz nimmt der Widerstand der Zuleitungsdrähte merklich zu. Von vielleicht 0,002 Ω auf 0,004 Ω. Alles, was hierzu zu sagen ist, wurde oben unter Verlustfaktor schon gesagt. Nein, auch der Skineffekt gibt bei Hörfrequenzen nichts her. Ach ja, noch was: Da wirbt einer damit, dass die Zuleitungsdrähte seiner Kondensatoren aus verzinnem Kupfer sind, und nicht aus verkupferem Stahl, der ja, wie wir alle wissen, nur 30% der Leitfähigkeit

des Kupfers erreicht. Verbesserungsvorschlag: *"Unsere Replica-Caps werden mit Anschlussdrähten geliefert, und nicht ohne – die Verbesserung der Leitfähigkeit ist in Prozent gar nicht mehr auszudrücken"*.

Bevor nun die Erläuterungen zu sehr ins Kabarettistische abdriften, sollte mit zusammenfassenden Worten das Fazit eingeläutet werden. Doch Halt, noch ein Blick ins Internet, es soll ja Begründungen geben, die sind so unsinnig, dass man mit üblicher E-Technik-Ausbildung niemals auch nur in deren Nähe kommen könnte. Lassen wir uns vom Kondensator-Guru inspirieren: *Jeder Kondensator hat **unerwünschte Effekte**, nämlich zusätzliche Induktivitäten und Widerstände (ESR = Ersatz-Serienwiderstand). Die Induktivität hat praktisch keinen Einfluss, der ESR bestimmt zusammen mit Frequenz und Kapazität den Verlustwinkel $\tan(\delta)$. Ja, das kann man so sagen, das steht in ähnlicher Form in jedem Grundlagenbuch. Weiter: $\tan(\delta)$ ist nicht bei allen Frequenzen gleich groß, sondern frequenzabhängig (korrekt). Steigt $\tan(\delta)$ über der Frequenz stark an, werden nicht alle Frequenzen gleich behandelt; ändert er sich zwischen 1 kHz und 100 kHz weniger, so dürfte das Frequenzspektrum eines Impulsgemisches zeitgenauer übertragen werden. Höchste Frequenzen werden Amplituden- und zeitverschoben = differenzielle Phasenfehler. Beim idealen Kondensator muss $\tan(\delta)$ möglichst frequenzunabhängig sein, was einen zu hohen Frequenz hin abnehmenden ESR bedeutet. Zeitverzerrte Frequenzen werden damit weiter in Richtung MHz-Bereich verschoben (=geringste differenzielle Phasenfehler im Audibereich). Und da beginnt das Durcheinander von Wunsch und Wirklichkeit, von Vertrieb und Wissenschaft, da wird's echt falsch.*

Die obige "vertriebsunterstützende Erläuterung" könnte man auch verkürzen auf: *Jeder signalführende Kondensator verschlechtert die Impulswiedergabe, und zwar um so mehr, je stärker sein Verlustfaktor von der Frequenz abhängt.* Ob es zeitverzerrte Frequenzen wirklich gibt, muss noch nicht untersucht werden, die **Impulswiedergabe** schon. Beginnen wir mit einem einfachen Hochpass-Schaltbild, wie es auch der Kondensator-Guru für einen Koppelkondensator angibt (**Abb. 10.9.7**):

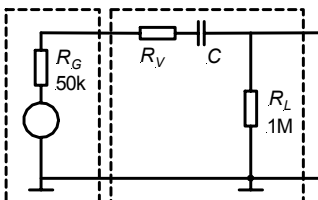


Abb. 10.9.7: Der Koppelkondensator in der Hochpass-Schaltung

Die Quelle (das könnte der Anodenkreis der vorhergehenden Röhre sein) ist als Spannungsquelle mit Innenwiderstand gezeichnet, der Kondensator im HF-Ersatzschaltbild mit Längswiderstand $R_V = \text{ESR}$, die Last (das könnte der Gitterkreis der folgenden Stufe sein) ist als einfacher reeller Widerstand R_L gezeichnet. Bei Bedarf lässt sich dieses einfache Schaltbild erweitern, für grundsätzliche Betrachtungen reicht es aus. Der R_V ist frequenzabhängig, das sagt auch der Guru; dass in diesem Ersatzschaltbild auch C frequenzabhängig sein muss, sagt er nicht, aber da diese Abhängigkeit gering ist, kann man sie (wie L) zunächst ignorieren. Nehmen wir nun an, R_V wäre ein einfacher, reeller, frequenzunabhängiger Widerstand. Z.B. ein kurzes Stückchen Kupferdraht. Kupfer? Nein, besser Silberdraht, wie er vom Kondensator-Hersteller auch gleich angeboten wird, wahlweise als Sterlingsilber (92,5%) oder reines Silber (99,97%). Natürlich nehmen wir für das Gedankenexperiment nur reinstes Silber, der besseren Leitfähigkeit wegen (Silber leitet ca. 5 – 10% besser als ordinäres Kupfer). So ein kurzes Drahtstück hat vielleicht 2 m Ω , die wir uns in Reihe zum Quellwiderstand denken müssen. Die beiden Widerstände darf man zusammenzählen, das gibt 50.000,002 Ω . Das ist

einer der o.a. unerwünschten Effekte: Der Quellwiderstand wird vergrößert. Wie sieht der Verlustfaktor dieses Modellkondensators aus? Da der ESR als frequenzunabhängig angenommen wurde, steigt $\tan(\delta)$ proportional zur Frequenz an. Mächtig großer Fehler, weil: *Beim idealen Kondensator muss $\tan(\delta)$ möglichst frequenzunabhängig sein*, der ESR sollte mit $1/f$ abnehmen: $R_V \sim 1/f$. Wie meint der Guru: *Je geringer der Anstieg von $\tan(\delta)$, desto höher die Spannungssteilheit dV/dt und geringer die differentiellen Phasenfehler im Audiobereich - besonders bei höheren Spannungen*. Spannungsabhängige Fehler? Das Guru-Modell ist ein lineares Modell, da gibt's keine spannungsabhängigen Bauteile. Nicht, dass Kondensatoren überhaupt keine nichtlinearen Effekte hätten, nur: Wenn man Nichtlinearität beschreiben will, braucht man ein nichtlineares Modell. Bleiben wir aber im linearen Modell, um das Durcheinander nicht noch größer zu machen; bei kleinen Spannungen ist die Schaltung ja linear.

Nochmals zurück: Da wird behauptet, *höchste Frequenzen werden amplituden- und zeitverschoben*. Um es hier mal zu präzisieren: Eine Frequenz kann weder amplituden-, noch zeitverschoben werden. Die Frequenz ist der Kehrwert der Periodendauer: 10 ms Periodendauer ergeben 100 Hz Frequenz. Gemeint ist vermutlich: Höchstfrequente Signale werden zeitverschoben und in ihrer Amplitude verändert. Man könnte auch sagen: Im höchsten Frequenzbereich entstehen Amplituden- und Phasenänderungen. Ja, so sagt man in der Systemtheorie. *Differentielle Phasenfehler* sagt man eher nicht. Was könnte hiermit gemeint sein? Vielleicht ist der spektrale Differentialquotient gemeint, $d\varphi/df$, den man üblicherweise mit -2π ergänzt und als **Gruppenlaufzeit** $\tau_g = -d\varphi / d(2\pi f)$ bezeichnet. In der Systemtheorie, üblicherweise. Es ist ja nicht schlimm, wenn man unübliche Bezeichnungen verwendet, Fehlinterpretationen gehen dann aber zulasten des Verursachers. Nochmals auf den Punkt gebracht: *Der ideale Kondensator erzeugt im Audiobereich keine Amplituden- und Laufzeitverzerrungen**. War's so gemeint? Gut. Sehen wir weiter.

Keine Amplitudenverzerrungen. An anderer Stelle noch deutlicher: *Der ideale Kondensator soll das Audiosignal gar nicht beeinflussen*. Warum braucht man dann überhaupt einen Kondensator? Offensichtlich gibt es Signale, die keine Audiosignale sind, und auf die stürzt sich der Kondensator? Richtig? Falsch! In einer Lautsprecher-Frequenzweiche soll der vor den Hochtonlautsprecher geschaltete Kondensator tief- und mittelfrequente Signale abschwächen, also in ihrer Amplitude verringern. Sind das auch Audiosignale? Natürlich! Lassen wir aber die Weiche beiseite, beim Koppelkondensator kann man schon so sagen: *Keine, bzw. nur eine geringe Beeinflussung des Audiosignals*. Der Koppelkondensator wirkt (zusammen mit den Widerständen) als Hochpassfilter, dämpft also die (sehr) tieffrequenten Anteile. Der Tiefton-Bereich interessiert den Kondensator-Guru in diesem Fall aber überhaupt nicht, gleich mehrfach werden die unerwünschten Effekte im Bereich über 1 kHz lokalisiert: *Ein Kondensator würde also hohe Frequenzen unbegrenzt durchlassen, wenn die Verluste nicht wären*. Darin liegt ein Körnchen Wahrheit: Der Scheinwiderstand eines Kondensators würde mit zunehmender Frequenz immer kleiner werden, wären da nicht die Verluste. Doch Halt, geht's wirklich um den **Scheinwiderstand**? Bei 1 kHz wird der Scheinwiderstand eines 22-nF-Kondensators (Polypropylen) durch die unerwünschten Verluste (10^{-4}) um 0,0000005% vergrößert. Kein Witz, Bauelemente Grundlagen! $\Rightarrow \sqrt{1 + \tan^2(\delta)}$. Und auch bei 10 kHz oder bei noch höheren Audiofrequenzen ist der Scheinwiderstand kein Thema. Dann also die **Phase**, bzw. deren spektrales Differential. Ideal wäre, so erfahren wir, wenn *am Kondensator Spannung und Strom exakt um 90° phasenverschoben wären*. Ja, das ist richtig, aber das kann nur der ideale Kondensator.

* Der Terminus *Verzerrungen* wird in der Systemtheorie auf zwei Arten gebraucht: Nichtlineare Verzerrungen (Klirrfaktor), und lineare Verzerrungen (Amplituden-, Phasen- und Laufzeitverzerrungen).

Der reale, verlustbehaftete Kondensator weist eine von 90° abweichende Phasenverschiebung auf. Ist das schlimm? Offensichtlich, denn dadurch ergeben sich *differenzielle Phasenfehler im Audiobereich*. Ist die Phasenverschiebung frequenzunabhängig, "kommen alle Frequenzen gleichzeitig an", um in der Terminologie des Kondensator-Gurus zu bleiben. Oder: erfahren verschiedenfrequente Signalanteile dieselbe Verzögerung. Ist die Phasenverschiebung aber frequenzabhängig, werden "hohe Frequenzen zeitverschoben". Oder besser: werden höherfrequente Signalanteile gegen niederfrequente Signalanteile zeitverschoben (oder laufzeitverschoben, oder eben phasenverschoben). Ein Impuls wird wegen der Phasenverschiebung u.U. auseinandergezogen, vulgo: "verschmiert". Wir erinnern uns: "Smeared Sound". Der absolute Phasenunterschied zwischen Strom und Spannung, der beim idealen Kondensator 90° beträgt, wird akzeptiert, der *differenzielle Phasenfehler*, den man mangels weiterer Erläuterung als Gruppenlaufzeit interpretieren muss, sorgt für Impulsverzerrungen. Das also ist es, was uns der Guru sagen wollte, aber sibyllinisch verklausulierte: **"Der Verlustfaktor eines Kondensators führt zu Gruppenlaufzeitverzerrungen, die (bei hohen Frequenzen) den Klang verschmieren"**. Um diesem Übel abzuweichen, muss, O-Ton Guru, der Verlustfaktor möglichst frequenzunabhängig sein, oder, anders ausgedrückt, muss die Gruppenlaufzeit möglichst frequenzunabhängig sein. Das klingt auf den ersten Blick vertraut, die Systemtheorie nennt ein derartiges System **linearphasig**, und attestiert ihm Verzerrungsfreiheit.

Doch damit sind wir beim Kern dieses grandiosen Missverständnisses gelandet: Die Gruppenlaufzeit ist eine Übertragungsgröße (Vierpolgröße), die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ist hingegen eine Zweipolgröße. Wenn man die falsche Phase differenziert, kommt was Falsches raus. Im Einzelnen: Ein **Vierpol** ist ein System mit vier Anschlusspolen, auch Zweitor genannt. Ein (zweipoliger) Eingang, ein (ebenfalls zweipoliger) Ausgang. Z.B. der Hochpass in Abb. 10.9.7. Dass Eingang und Ausgang in diesem Beispiel die Masse als gemeinsamen Pol haben, macht das System nicht zum Dreipol, es heißt trotzdem Vierpol. Zwischen dem Eingangssignal (Eingangsspannung) und dem Ausgangssignal (Ausgangsspannung) wird eine komplexe Übertragungsfunktion definiert, aus der der Phasenfrequenzgang und der Gruppenlaufzeitfrequenzgang abgeleitet werden können. Ein Kondensator ist demgegenüber ein **Zweipol**, weil er nur zwei Anschlusspole hat. Zwischen der Spannung und dem Strom wird die komplexe Impedanz definiert, aus der ein Phasenfrequenzgang abgeleitet werden kann. Daraus aber einen Gruppenlaufzeitfrequenzgang ableiten zu wollen, ist Unsinn. Nur in zwei Spezialfällen macht es Sinn, den Zweipol zum Vierpol zu erklären: Wenn man die Spannung als Eingangsgröße und den Strom als Ausgangsgröße definiert, oder umgekehrt. Man könnte nun einwenden, dass jeder Vierpol doch aus Zweipolen aufgebaut sei, und dass deshalb die Fehler dieser Zweipole auch die Fehler des Vierpols seien, das ist aber falsch. Im Rahmen dieser Betrachtungen kann nicht die Systemtheorie in aller Breite vorgestellt werden, hierzu muss auf die Spezialliteratur verwiesen werden [5, 6, 7]. Nur in Kürze: Bei dem o.a. Hochpass (wie auch beim RC-Tiefpass) wird die Eingangsspannung auf R und C aufgeteilt, sie liegt nicht zur Gänze am Kondensator.

Mit der einfachen Formel $d = \tan(\delta) = 2\pi f \cdot R_V \cdot C$ ergibt sich der Verlustfaktor d als Tangens des Verlustwinkels δ . Beim idealen Kondensator eilt die Sinusspannung dem Strom um exakt 90° nach, beim realen Kondensator ist diese Phasenverschiebung um δ kleiner als 90° . Für einen Verlustwinkel von $\delta = 0,01^\circ$ (Polypropylen bei 1 kHz) beträgt die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung folglich nicht 90° , sondern nur $89,99^\circ$. Ist nun, wie kurioserweise gefordert, der Verlustwinkel frequenzunabhängig, so ergibt die nach der Frequenz differenzierte Phasenverschiebung den konstanten Wert null (das Differential einer Konstante ist tatsächlich null). Das scheint den Idealfall darzustellen: Keine Impulsverschmierung.

Nun ist aber die Phasenverschiebung zwischen Kondensatorstrom und Kondensatorspannung eine Sache, und die Phasenverschiebung zwischen Koppelstufen-Eingang und -Ausgang eine andere. Eine ganz andere.

Die **Phasenverschiebung** φ , die in Abb. 10.9.7 zwischen der Generatorspannung und der Ausgangsspannung (an R_L) auftritt, kann man leicht berechnen:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{1}{(R_G + R_V + R_L) \cdot 2\pi f \cdot C}\right) \approx \frac{1}{(R_G + R_V + R_L) \cdot 2\pi f \cdot C} \quad [6, 7, 17, 18, 20].$$

Abb. 10.9.8 zeigt den Phasenfrequenzgang in doppellogarithmischer Darstellung – für einen vollkommen verlustfreien, idealen Kondensator! Tatsächlich hängt die Gruppenlaufzeit* von der Frequenz ab, es entstehen dispersive Impulsverzerrungen (Verschmierungen). Aber nochmals: Der hier berechnete Fall stellt den bestmöglichen dar, die Phasenverschiebung zwischen Kondensatorspannung und Kondensatorstrom ist hierbei für alle Frequenzen exakt 90° . Für einen realen Polyester-Kondensator würde man jedoch praktisch dieselben Bilder bekommen, die Unterschiede sind völlig unbedeutend, z.B. bei der Gruppenlaufzeit 0,004% (1 kHz). In derselben Größenordnung liegen die Unterschiede, wenn man einen Kondensator verwendet, dessen Verlustwinkel über der Frequenz konstant ist. Gegenüber 1000000Ω Lastwiderstand macht es eben keinen Unterschied, ob der ESR 7Ω oder 0Ω beträgt. Hingegen macht es einen Unterschied, wenn die Kapazität geändert wird, im Bild für eine 30%-ige Änderung dargestellt. Ob derartig große **Toleranzen** bei hochwertigen Kondensatoren überhaupt vorkommen können, und wenn, ob sie dann wesentlich sind, wird später diskutiert.

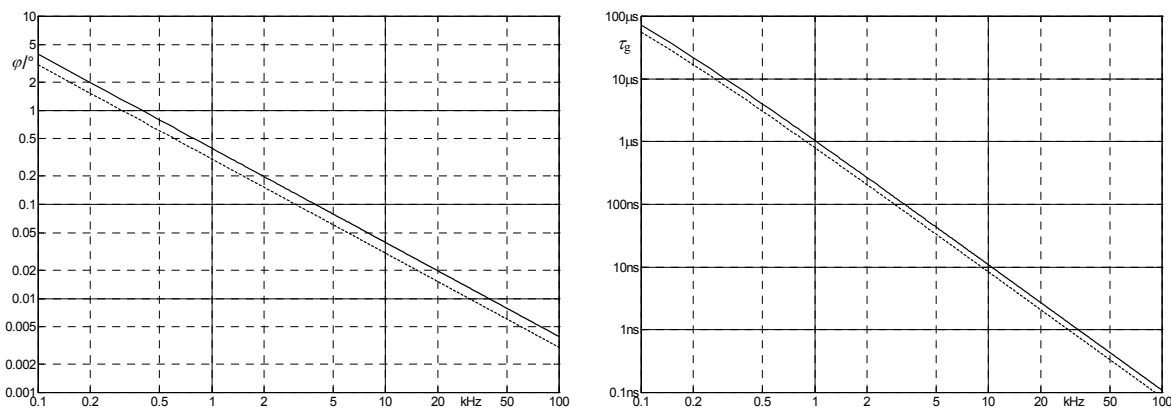


Abb. 10.9.8: Phasenfrequenzgang und Gruppenlaufzeitfrequenzgang der Koppelstufe nach Abb. 10.9.7. $R_G = 50\text{k}\Omega$, $R_V = 0$, $R_L = 1\text{M}\Omega$, $C = 22 \text{ nF}$. Die gestrichelte Kurve gilt für $C = 28,6 \text{ nF}$ (d.h. +30% Toleranz).

Zusammengefasst: Die Vermutung, der Verlustwinkel müsse möglichst frequenzunabhängig sein, ist falsch, da von einem total ungeeigneten Zweipol-Phasenwinkel abgeleitet. Bei der typischen Röhren-Koppelstufe erzeugen alle Kondensatortypen praktisch dieselben Gruppenlaufzeitverzerrungen ("Impulsverschmierungen"), auch die theoretisch konstruierten Idealkondensatoren. Diese Laufzeitverzerrungen sind aber so gering, dass sie weit unterhalb der Hörbarkeitsgrenze bleiben.

* Wenn die Gruppenlaufzeit aus dem Phasenfrequenzgang durch grafisches Differenzieren (Steigung) gebildet werden soll, muss die doppel-lineare Darstellung verwendet werden, nicht die doppel-logarithmische.

Die letzte Aussage muss noch erläutert werden. Lassen wir zuerst den Guru zu Wort kommen: *Der Wert des Tangens-Delta bei einer bestimmten Frequenz ist nicht immer aussagekräftig für den Klang, eher der Gesamtverlauf bis 100kHz. Steigt er stark an, werden nicht alle Frequenzen gleich behandelt, ändert er sich zwischen 1kHz und 100kHz weniger (wie z.B. bei Metallfolienkondensatoren üblich), so dürfte das Frequenzspektrum eines Impulsgemisches zeitgenauer übertragen werden. Ein flacher Tangens-Delta-Anstieg von 1 kHz bis 100kHz in Zusammenhang zu einem gleichzeitig stärker sinkenden ESR ist wünschenswert. Aus ähnlichen Gründen strebt man auch bei audiophilen Verstärkern Anstiegszeiten von unter 1µs an (ca. 1 MHz Bandbreite).* Falsch! Der Begriff "Anstiegszeit" ist in der Schaltungstechnik gebräuchlich, er definiert die Zeitdauer, in der die Sprungantwort von 10% auf 90% ansteigt. Die Anstiegszeit ist 2,2 mal so lang wie die Zeitkonstante, die wiederum reziprok zur Grenzfrequenz ist. Die Grenzfrequenz erhält man daraus zu $2,2 / (2\pi \cdot 1\mu\text{s}) = 350 \text{ kHz}$. Also nicht 1 MHz. Auch falls nicht Anstiegszeit, sondern Einschwingzeit gemeint sein sollte, ist die Bandbreitenangabe ebenfalls falsch: Mit 1 µs Einschwingzeit erhält man bei steilflankiger Bandbegrenzung eine Bandbreite von 500 kHz (beim Tiefpass erster Ordnung ist dieser Begriff eher ungebräuchlich). Aber egal, Anstiegszeiten unter 1 µs, weil: *Auch die Überlagerung von Raumhall zum Originalschall muss mikrosekundengenau übereinstimmen, damit das Ohr den exakten Ort im Raum ausmachen kann.*

Da kann man nun tatsächlich ins Grübeln kommen, das ist nicht komplett falsch. Die interaurale Laufzeitschwelle (Lateralisationsunschärfe) kann unter Laborbedingungen schon mal zu 10 µs bestimmt werden, und sogar über noch kleinere Werte berichtet die Fachliteratur. Und wenn man denn unbedingt den Faktor 10 als Sicherheitsabstand einsetzen möchte, landet man tatsächlich bei 1 µs. Daraus aber zu schließen, dass nun eine Bandbreite von 350 oder 500 oder gar 1000 kHz erforderlich sei, ist Unsinn. Man kann doch einen reinen 1-kHz-Ton um 1 µs verschieben, ohne in den HF-Bereich gehen zu müssen. Die oben erwähnten 10 µs Laufzeitauflösung erzielt das Gehör (wenn überhaupt) im mittleren Frequenzbereich, also vielleicht bei 1 kHz oder 2 kHz. Bei 10 kHz wird diese Unterschiedsschwelle schon deutlich größer (100 µs als Richtwert, die Daten hängen sehr stark von den Versuchsbedingungen ab), und über 20 kHz hört sowieso keiner mehr etwas. Oder doch?

Aber das weiß ja nun jeder Audiophile, dass die reine **Sinusanregung** mit realen Schallen rein gar nichts zu tun hat, denn die enthalten ja jede Menge Impulse. Und so bringt es einer der Gurus dann tatsächlich fertig, auf seiner Webpage einerseits 1 MHz Bandbreite zu fordern, und gleichzeitig auf eine Diplomarbeit zu verweisen, die die obere Grenzfrequenz des Gehörs sehr zutreffend bei 19 kHz annimmt. Wie passt das zusammen? Da geht's ja nicht um 19 oder 20 oder doch besser 22 kHz, da wird locker mal ein Faktor 50 als Reserve eingebaut. In einem Satz gleichzeitig eine Meinung und die dazugehörige Gegenmeinung zu vertreten, das schafft sonst nur unsere Fußball-Lichtgestalt – deshalb entstand ja auch der Ausdruck: Eine Meinung verfranzeln.

Im Falle der Audiobandbreite geht das Verfranzeln so: *Jedes, aber wirklich jedes Signal ist eigentlich die Summe unendlich vieler Sinussignale.* Ja! An dem Baron Fourier kommt man halt nicht vorbei, im Prinzip stimmt diese Aussage, nur das mit dem "*ist eigentlich*" nehmen wir mal nicht so wörtlich. Denn: Hierbei handelt es sich um eine Modellbetrachtung, genauso gut könnte man jedes Signal in viele andere (nicht einmal zwangsläufig orthogonale) Funktionen entwickeln. Aber natürlich auch u.a. in sinusförmige Signale, das ist schon richtig. Und was für Signale gilt, gilt auch für Systeme – allerdings nur, wenn diese linear (und zeitinvariant) sind: Die Betrachtung zeitlicher Vorgänge ist der Betrachtung spektraler Vorgänge

äquivalent [6, 7, 17, 18, 20]. Wenn das Gehör Dauertöne moderaten Schallpegels, deren Frequenz über ca. 20 kHz liegt, nicht hört, kann es auch bei Impulsen die über ca. 20 kHz liegenden Spektralanteile nicht hören. Jetzt muss aber diese Erkenntnis so verfranzelt werden, dass man als Kondensatorhersteller auch Verkäufe erzielt. Und das geht so (unter derselben Webadresse): *Musik besteht nicht nur aus reinen Sinustönen, sondern aus einem sehr breiten Spektrum von unterschiedlichen Impulsen, die teilweise sehr weit außerhalb des Hörbereiches liegen und dennoch das Hörempfinden stark beeinflussen*[⊗]. Deshalb setzen wir für Audioverstärker einen Kondensator ein, der erst über 100 MHz schwächelt. Im Koppelzweig einer Vorstufe lässt dieser Kondensator erahnen, wie ein Stück Draht klingen würde. Nein, das wird kein Druckfehler sein, nicht 100 kHz, sondern 100 MHz. Steht doch ein paar Zeilen weiter: *Glimmer ist ein ideales Dielektrikum für Kondensatoren mit folgenden Eigenschaften: ... einsetzbar für hohe Frequenzen bis in den GHz-Bereich. Glimmerkondensatoren sind sehr beliebt in Filterschaltungen, wo sie aufgrund ihrer Eigenschaften eine beträchtliche Klangsteigerung bewirken können. Gigahertz! Himmel, nimmt das denn kein Ende? Kommt jetzt vielleicht auch noch der Terahertz-Bereich dran?? Dabei haben doch Schöne et al. schon 1979 gezeigt, dass die Wiedergabe des Ultraschallbereiches nichts, aber auch gar nichts bringt*^{*}. Doch das war eine Untersuchung des Instituts für Rundfunktechnik, und das wird in Audiophilenkreisen lieber nicht zur Kenntnis genommen. Jeder, der die Anforderungen wieder um einige MHz in die Höhe treibt, wird als Heilsbringer bejubelt, Skeptiker hingegen als "ungläubige Physiker" gebrandmarkt, um die "man einen großen Bogen machen sollte". "C'est la gare", kann man da nur kongenial antworten.

Nochmals das schon in Kap. 8 angeführte Beispiel: Ein 1,5 m langes Bett wird von den meisten (nordeuropäischen) Erwachsenen als zu kurz bewertet, 2,0 m sind hingegen komfortabel. Nun gibt es einige wenige, die sind größer (länger) als 2 m, und für diese Cubophilen sollte das Bett sicherheitshalber etwas länger sein. So ca. 10 km lang, wenn man den 100-MHz-Kondensator als Vergleich heranzieht. Hat eigentlich schon mal jemand daran gedacht, die anderen Sinne entsprechend zu "verwöhnen"? Da würde sich der Sehsinn anbieten: Die Frequenzbegrenzung auf den gemein hin "sichtbar" genannten Bereich (380 – 770 THz) ist doch sehr restriktiv, sollte man da dem Fernseher nicht auch eine entsprechend vergrößerte optische Bandbreite spendieren (Röntgenstrahlung)? Und natürlich auch zu tieferen Frequenzen hin, der Mikrowellenofen stünde als "optischer Subwoofer" schon bereit.

Zurück zum Audioverstärker: Der Bereich bis 20 kHz muss sauber übertragen werden, und weil kein Verstärker darüber abrupt Schluss machen kann, sind einige zusätzliche -zig kHz als "Auslaufstrecke" zweckmäßig. Wenn bei Hörversuchen andere Ergebnisse erarbeitet werden, darf dieses Postulat auf den Prüfstand. Falsch verstandene Phasengänge und Hörversuche mit befangenen Probanden sind allerdings nicht zielführend. Noch ein Wort zu den oben erwähnten 10 µs Laufzeitverzerrung: Interaural sind derartig kleine Delays möglicherweise hörbar. Da wäre es doch wünschenswert, wenn die Kapazitätstoleranz dieser Wonder-Caps nicht allzu groß wäre, weil: Die werden doch nicht alle nur ein Monoradio zuhause haben? Eigenartig, dass man dann bei einem der Hersteller Kapazitäts-Toleranzen von -20/+30% liest. Nun gut, handgeschöpft, jeder Kondensator ein Unikat. Vielleicht weiß der Hersteller aber auch, wie stark sich die Gruppenlaufzeiten von zwei Kopfhörersystemen oder von zwei Lautsprechern unterscheiden können? Vielleicht weiß er das ja alles, und sagt's nur nicht? Und schwurbelt und franzelt weiter, und sucht fieberhaft nach dem total idealen Kondensator, der DC sperrt und gleichzeitig durchlässt.

[⊗] Darum heißen sie ja auch außerhalb des Hörbereichs liegend.

^{*} P. Schöne et al.: Genügt eine Bandbreite von 15kHz... (Rundfunktechnische Mitteilungen, 1/1979).

Aus der Welt der Weltraumkondensatoren, der 1000 A aushaltenden 100-MHz-Boliden, zurück zum E-Gitarrenverstärker. Well, don't you panic, da gibt's weder das eine, noch das andere. Auch die 10 μs , die als interaurale Laufzeit eine Rolle spielen könnten, sind da kein Thema. Für alle Gitarristen, die keinen Stereoverstärker auf die Bühne stellen: Die diotisch* hörbare Gruppenlaufzeitgrenze liegt bei ungefähr 2 ms [3, 12]; etwas geringere Werte sind trainierbar, spielen für die Praxis aber keine Rolle. Also sicher kein "smeared Sound" beim Koppel-C mit seiner Gruppenlaufzeit von $\tau_g = 0,0001$ ms. In Lautsprecher-Frequenzweichen, da mag's ganz anders aussehen, da fließen die großen Ströme, zwar auch nicht gerade 1000 A und 100 MHz, aber immerhin spielt man da in der Energietechnik-Liga. Doch beim Koppel-Kondensator? Da ist's Nachrichtentechnik, da sind's Mikroampere.

Anerkennen wir einfach den wie auch immer gearteten Unterschied zwischen Energie- und Nachrichtentechnik, zwischen Forschung und Marketing, zwischen Krethi und Plethi. Die übrigens auf die Kreter zurückgehen, und nicht auf kreativ und was war gleich das andere? Nachdem nun (hoch?-) wissenschaftlich nachgewiesen wurde, dass Koppel-Kondensatoren aber rein gar nichts zum Sound beitragen können, müsste nun als Knalleffekt nur noch die Erklärung kommen, dass sie in der Praxis trotzdem die Höhen verändern – leicht erklärbar übrigens, kommt weiter hinten. Zunächst aber nochmals der Bezug zum Ersatzschaltbild, mit mehr Details. ... necesse est.

Der Koppelkondensator wird im Laboralltag durch nur zwei Größen beschrieben: Kapazität (z.B. 22 nF) und Spannungsfestigkeit (z.B. 400 V). Der dritte Parameter, der Verlustfaktor, hat nur dann eine Bedeutung, wenn der Kondensator mit Induktivitäten zusammenschaltet wird. Soweit die offizielle Meinung. Folgt man ihr, müssten kapazitätsgleiche Kondensatoren gleich klingen. Die Elektrotechnik lehrt allerdings auch, dass die Funktion eines Kondensators so unendlich kompliziert ist, dass erst rigoroses Vereinfachen eine analytische Beschreibung ermöglicht. Die aus einer idealen Kapazität und einem idealen Widerstand bestehende Ersatzschaltung ist so ziemlich die einfachste Näherung; aufwändigere Modelle berücksichtigen auch spezielle Polarisations-Effekte, und gelangen damit zu umfangreicheren Ersatzschaltbildern (Kap. 9.4). Bei mittleren und hohen Frequenzen sind Koppelkondensatoren jedoch so niederohmig, dass an ihnen nur wenig Wechselspannung abfällt. Von 30 V_{eff} Anoden-Wechselspannung fallen bei 1 kHz gerade mal 0,2 V_{eff} an einem 22nF-Hochpasskondensator ab (22nF/1M Ω), und deshalb sind dessen Abweichungen vom Ideal auch nicht so ganz wichtig. Zu tiefen Frequenzen hin nimmt die Kondensator-Wechselspannung allerdings zu: Halbe Frequenz, doppelte Kondensator-Wechselspannung, bis (beim o.a. Beispiel) bei 7 Hz die Grenzfrequenz erreicht wird. Doch die tiefen Frequenzen tauchen in den Berichten über den Klang eines Koppelkondensators nicht auf, die Höhen sind's, die verschmiert werden, die "matschig", "topfig", klingen, die erst nach 100 Stunden "aufmachen". Dabei kann man durchaus auch mal an die Tiefen denken, an die ganz tiefen:

Betrachten wir doch nochmals die hohe **Gleichspannung**, die am Koppelkondensator abfällt: Je nach Schaltung 150 – 300 V, in Sonderfällen auch noch mehr (Lebensgefahr!). Beträgt der Isolationswiderstand des Koppelkondensators z.B. 1 G Ω , fallen (bei 200 V Anodenspannung) am nachfolgenden 1-M Ω -Widerstand 200 mV ab; das ist für eine ECC 83 schon ziemlich viel (Abb. 10.1.14) und führt bereits zu hörbaren Effekten. Ob allerdings der Klang durch diese Offsetverschiebung besser oder schlechter wird, das kann nicht allgemein gesagt werden. Mit immer derselben Begründung: Es sind zu viele Parameter, die den Klang bestimmen. Ist auch nicht unbedingt erforderlich: Bei neuen, hochwertigen Kondensatoren ist der Isolationswiderstand viel höher als im Beispiel angenommen, bei jahrzehntealten Kondensatoren aber

* diotische Wiedergabe: Auf beiden Ohren dasselbe Signal. (Mono, zweiohrig abgehört).

u.U. viel niedriger. In Datenblättern findet man bei Polypropylen-Kondensatoren Isolationswiderstände, die größer als 20000 G Ω sind, MKT-Kondensatoren sind mit 1000 G Ω spezifiziert (jeweils für 22 nF). Diese Werte gelten allerdings für Zimmertemperatur; in einem Röhrenverstärker können auch leicht 70°C erreicht werden, und dabei verringert sich der Isolationswiderstand auf 1/5. Beim MKT-Kondensator kommt man hiermit aber immer noch auf 200 G Ω , und das bedeutet für das o.a. Beispiel eine Offsetverschiebung um 1 mV, ein Wert, dem beim besten Willen keine klangverändernde Bedeutung zugewiesen werden kann. Messungen an unterschiedlichen, zumeist älteren (aber ungebrauchten) 0,1- μ F-Kondensatoren ergaben Werte zwischen 5 und 100 G Ω – das ist nun schon deutlich schlechter, und könnte bezüglich hörbarer Auswirkungen als grenzwertig eingestuft werden. Ganz schlecht waren die aus einem alten VOX AC30 (1965) ausgelöteten 0,15- μ F-Kondensatoren: Der eine hatte noch 2 G Ω , der andere aber nur mehr 100 M Ω Isolationswiderstand. Die Kapazitätswerte waren zwar noch innerhalb der 20%-Toleranz, aber der Leckstrom verschob den Arbeitspunkt so weit, dass eigentlich von einem Totalausfall gesprochen werden müsste. Ob nun der hiervon produzierte Sound als gut oder schlecht, als kaputt oder vintage beurteilt wird, und die Kondensatoren *deshalb* als Schrott oder Ikonen eingestuft werden, das ist wieder der subjektiven Sphäre zuzuordnen.

Neben den rein elektrischen Parametern könnten – sehr grundsätzlich betrachtet – auch **elektromechanische Parameter** eine Rolle spielen. Der Koppelkondensator wird ja über einen hochohmigen Widerstand aufgeladen. Ändert sich die Kapazität als Funktion der Zeit, wirkt der Kondensator als Wechselspannungsquelle – auch ohne Gitarre. Das ist dasselbe Prinzip wie beim Kondensatormikrofon [3]: Der hochohmige Widerstand (z.B. 1 M Ω) verhindert ein schnelles Umladen, bei (näherungsweise) konstanter Ladung entspricht die relative Ladungsänderung der relativen Spannungsänderung. Konkret: Wenn sich die Kapazität um 1‰ ändert, dann entsteht eine Wechselspannung von $U_{DC}/1000$. Wird der Kondensator z.B. auf 200 V aufgeladen ist, wären das 200 mV. Ob sich die Kapazität tatsächlich um 1‰ ändern kann, ist eine andere Frage. In einem Combo (Verstärker und Lautsprecher im selben Gehäuse) entstehen große Schalldrücke, die 100 Pa erreichen oder sogar überschreiten können. Die dabei auf den Kondensatormantel einwirkende Kraft verändert die Kapazität – in der Regel aber nicht gleich um 1‰. Eine einfache Überlegung hilft, die Größenordnungen abzuschätzen: Wenn man einen festen Gegenstand in Wasser taucht, wirkt auf ihn ein Wasserdruck ein, der um so größer wird, je tiefer man taucht. Dieser Druck quetscht sogar stählerne U-Boote zusammen, wenn sie sich zu tief hinunterwagen, und ein Kondensator ist ja viel fragiler als ein U-Boot. Je höher der Druck, desto mehr werden die Kondensatorelektroden aneinandergedrückt. Welcher Tauchtiefe entsprechen nun die o.a. 100 Pa? Welches Speziallabor müsste man hier wohl beauftragen? 100 Pa sind 100 N pro Quadratmeter, das entspricht dem Druck in 1 cm Wassertiefe! Also kein Speziallabor, das geht in der Badewanne. Obwohl: 200 V und Badewanne, nein, besser nicht. Deshalb, liebe Fachmagazinredakteure, so ihr denn den Rat eines Wissenschaftlers überhaupt annehmt: Nicht nachmachen! Lebensgefährlich! Nur rein modellmäßig: Der in einem Combo erzeugte Schalldruck ist in etwa so groß wie der in 1 cm Tiefe herrschende Wasserdruck. Das dürfte einen Folienkondensator nicht wesentlich deformieren. In einer orientierenden **Messung** wurden einige auf 200 V aufgeladene, fabrikneue 22-nF-Kondensatoren auf ihre Mikrofonie untersucht: Bei Beschallung mit 130 dB Schallpegel blieb die erzeugte Wechselspannung unter 0,03 mV. Nimmt man zum Vergleich 30 V als Anoden-Wechselspannung, wäre diese Mikrofonie-Spannung ein Millionstel davon – sicher vollkommen unbedeutend. Bei der Vielzahl der verbauten Kondensatortypen kann man natürlich nicht generell ausschließen, dass einige mit wesentlich stärkerer Mikrofonie dabei sind, die Wahrscheinlichkeit hierfür muss aber als äußerst gering angesehen werden.

Was bleibt noch, was ist dran an Meldungen wie: "Folienkondensatoren klingen etwas anders als Polypropylen?" Das eröffnet ähnliche Dimensionen wie die Aussage: "Nachts ist es kälter als draußen." Kondensatoren lassen sich, sehr grundsätzlich, in Folien-, Elektrolyt-, Sinter- und Luftkondensatoren unterteilen, als Dielektrikum kommt beim Folienkondensator u.a. Polystyrol, Polyester oder Polycarbonat zum Einsatz, oder eben **Polypropylen**. Der typische Polypropylen-Kondensator ist ein Folienkondensator, der in der Bauform KP aus zwei aufeinanderliegenden Folien (Metall und Polypropylen) besteht, in der Bauform MKP aus einer metallisierten Polypropylen-Folie. "Wenn Sie zwei Fingernägel auf 1mm Abstand bringen, haben Sie eine Kapazität von 1 pF." Der unvergessene H. H. Meinke. Damit der Zwischenraum besser isoliert und formstabil bleibt, kommt eine dünne Folie hinein, z.B. eine Polypropylenfolie. Dadurch erhöht sich die Kapazität um die relative Permittivität (relative Dielektrizitäts-Konstante), die bei Polypropylen ungefähr $\epsilon_r = 2,2$ beträgt, bei Polyester hingegen 3,3. Beide Kunststoffe gehören zu den **Dielektrika**, sind also Isolierstoffe. Dass sie isolieren bedeutet aber nicht, dass in ihrem Innern keine Ladungsträger vorliegen würden – diese sind nur nicht so leicht von ihrem Ort zu verschieben. Strom ist ja nichts anderes als bewegte Ladung: $I = dQ / dt$; keine Ladungsbewegung, kein Strom. Im Kupferdraht lassen sich die Elektronen sehr leicht (aber überraschend langsam, dafür in ungeheurer Zahl) bewegen, im Dielektrikum sind fast keine *frei beweglichen* Ladungsträger vorhanden. Trotzdem gibt es Ladungen: Positive Atomkerne, negative Elektronen, positive Kationen, und negative Anionen. Legt man eine elektrische Spannung an die Kondensatorelektroden, wirken Kräfte auf die Ladungsträger und versuchen sie zu verschieben und zu verbiegen; dies wird **Polarisation** genannt. Da unterschiedliche Ladungsträgerarten vorhanden sind, gibt es auch unterschiedliche Polarisationsmechanismen. Sie sind die Ursache der **Kondensator-Verluste**.

Da alle Stoffe aus Atomkernen und -hüllen "aufgebaut sind" (Bohrsches Atommodell), findet in jedem Stoff beim Anlegen einer elektrischen Spannung die **Elektronenpolarisation** statt: Die elektrische Feldstärke verschiebt die Elektronenhülle gegen den Kern. Sehr schnell, und auch noch im THz-Bereich wirksam. In polaren Stoffen (wie z.B. Polyester) drehen sich unter der Einwirkung des externen elektrischen Feldes die permanenten Molekuldipole, dies ist die **Orientierungspolarisation**. In Stoffen, die Ionen enthalten, kommt es unter elektrischer Feldeinwirkung zu einer gegenläufigen Verschiebung von Anionen und Kationen, das ist die **Ionenpolarisation**. Schließlich kann es in sehr inhomogenen Werkstoffen an isolierenden Korngrenzen zur Ansammlung freier Ladungsträger kommen: **Raumladungs-Polarisation**. Alle diese Polarisierungseffekte beziehen ihre Antriebsenergie aus dem elektrischen Feld, und da keiner dieser Prozesse reversibel ist, wird ein Teil der elektrischen Energie unumkehrbar in Wärme umgewandelt. Diese Wärmeenergie steht der elektrischen Schaltung nicht mehr zur Verfügung – deshalb dielektrische "**Verluste**". **Abb. 10.9.9** zeigt typische Werte.

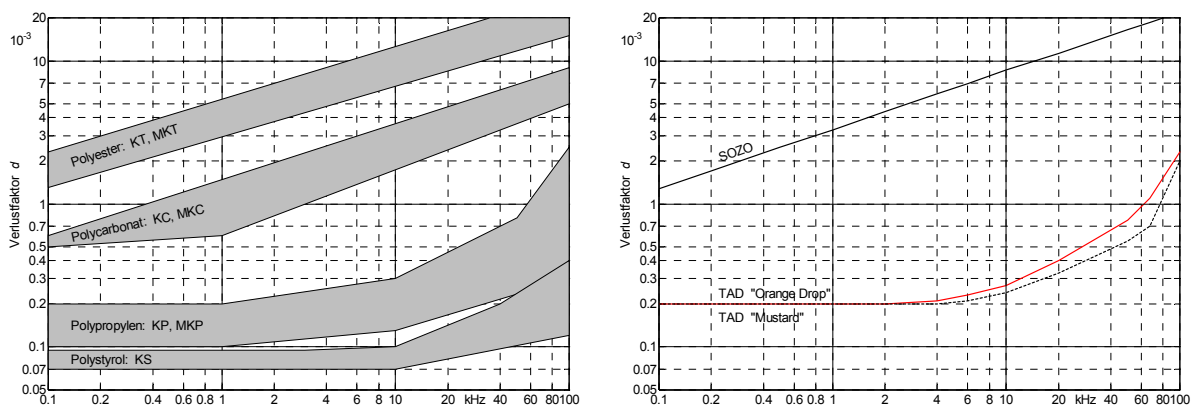


Abb. 10.9.9: Verlustfaktoren typischer Koppelkondensatoren. Datenbuchangaben (links), Messungen (rechts).

In Anlehnung an makroskopische Effekte könnte man sagen: Die mikroskopischen Polarisationsbewegungen erzeugen Reibungsverluste, die im Kondensatorersatzschaltbild als Widerstand bzw. Widerstände nachgebildet werden. Schon zu Beginn dieses Kapitels wurde darauf verwiesen, dass dielektrische Werkstoffeigenschaften 'nur' durch ε und ρ beschrieben werden. Allerdings: Diese Materialparameter sind frequenz- und temperaturabhängig (um die wichtigsten Einflussgrößen zu nennen), und im allgemeinen Fall richtungsabhängige Tensoren. Auch bei vereinfachter Betrachtung ergibt der Schluss vom infinitesimal kleinen Würfel zum realen Kondensator-Volumen nicht nur *einen* Widerstand und *einen* Kondensator, nein, man erhält ein kompliziertes Netzwerk von eigentlich unendlich vielen Bauteilen. Das man aber in guter Näherung in eine impedanzäquivalente (bzw. impedanzähnliche) Ersatzschaltung umrechnen kann. Diese **Ersatzschaltung** hat gegenüber dem aus den beiden frequenzabhängigen Bauteilen $R(f)$ und $C(f)$ bestehenden Kondensator-Modell den großen Vorteil, dass sie auch zur Beschreibung von Zeitvorgängen verwendet werden kann, was bei frequenzabhängigen Bauteilwerten ja nicht so einfach wäre.

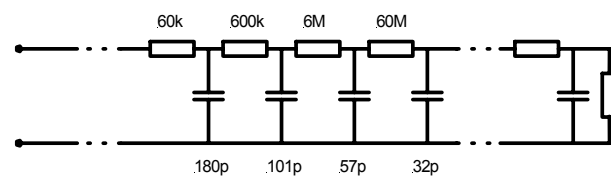
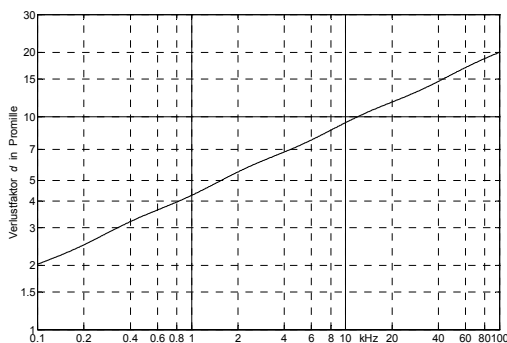


Abb. 10.9.10: Impedanz-Ersatzschaltung für einen 22nF Polyester-Kondensator (Kettenbruch-Entwicklung).

In **Abb. 10.9.10** ist so eine Ersatzschaltung dargestellt. Sie ist nicht die einzig mögliche, da gibt es – je nach gewünschter Genauigkeit – unzählige Varianten. Man erkennt im Diagramm die leicht wellige Approximation, die auf Kosten des Bauteilaufwandes beliebig verbessert werden kann. Die gewählte Kettenbruch-Entwicklung enthält Längswiderstände, deren Wert von links nach rechts jeweils um den Faktor 10 zunimmt, und Querkondensatoren, deren Wert von links nach rechts um jeweils den Faktor 1,78 abnimmt. (Möchte man die Approximationswelligkeit verkleinern, müssen diese beiden Faktoren verkleinert werden). Nach rechts setzt sich die "Leiter" so lange fort, bis man bei Widerstandswerten ankommt, die dem Isolationswiderstand entsprechen (untere Grenzfrequenz), die Fortsetzung nach links bestimmt den hochfrequenten Verlauf des Verlustfaktors. Für den im Bild dargestellten Frequenzbereich muss die Leiter nach rechts gar nicht verlängert werden, wenn man die angegebenen Bauteilwerte verwendet. Nach links verlängert man bis $60 \Omega / 1 \text{ nF}$, und setzt noch einen Querkondensator (20 nF) sowie einen Längswiderstand ($0,17 \Omega$) davor. Man kann sich vorstellen, wie für einen Isolationswiderstand von z.B. $1 \text{ T}\Omega$ die Leiter noch ein Stück nach rechts zu verlängern ist, man sieht aber auch, wie klein (im Vergleich zu 22 nF) die hinzukommenden Kapazitäten werden. Bei einem extrem hochohmig abgeschlossenen Kondensator mag diese Erweiterung erforderlich sein, bei typischen Röhrenschaltungen ($1 \text{ M}\Omega$) ist eine Ersatzschaltung, deren größter Widerstandswert $60 \text{ M}\Omega$ beträgt, ein guter Kompromiss.

Einfach ist dieses Ersatzschaltbild auch nicht gerade, aber mit der heute üblichen Rechner-Unterstützung können hiermit leicht "Impulsverschmierungen" (Gruppenlaufzeitverzerrungen) ermittelt werden. Da sich, wie oben ausführlich erläutert, beim Wechsel auf ein anderes Dielektrikum (z.B. Polypropylen) für die typische Röhren-Kopplung aber keine hörbaren Unterschiede ergeben, wird auf eine weitere diesbezügliche Ausführung verzichtet.

Nun zu der Frage, ob es nicht doch einen Grund geben könnte, dass in Fachzeitschriften immer wieder von kondensatorbedingten **Klangänderungen** berichtet wird. Natürlich denkt man sofort an die schon erwähnten $-20/+30\%$ Kapazitätstoleranzen der Super-Kondensatoren, aber zum einen gibt es ja auch enger spezifizierte Bauteile (die 60 € teureren Glimmer-Kondensatoren haben z.B. *nur* maximal 10% Toleranz ☺), zum anderen wird meistens über Änderungen im Bereich *hoher* Frequenzen berichtet. Unterstellen wir ruhig, dass sich dieses Urteil einmal nicht auf den oberen MHz-Bereich bezieht, sondern auf den oberen Hörfrequenzbereich, was könnte eine technisch begründbare Ursache sein? Die Größe der Kondensatoren! Nicht die Kapazität, die Baugröße. Einen Koppelkondensator kann man in axialer Bauform in der Größe $\varnothing 6 \times 14$, oder $\varnothing 22 \times 35$ bekommen (jeweils mm). Size matters? Unter Umständen schon! Da dieser Kondensator für höhere Audiofrequenzen im Vergleich zu seinen angrenzenden Widerständen niederohmig ist, liegt an seiner zylindrischen Außenelektrode die Anoden-Wechselspannung, und zwar unabhängig von seiner Polung. Zwischen dieser mehrere Quadratzentimeter großen Elektrodenfläche und allen leitenden Verstärkerkomponenten entstehen Streukapazitäten (auch weniger zweckmäßig 'Schaltkapazitäten' genannt). Wenn nun, was in vielen Gitarrenverstärkern die Regel ist, der zum Steuergitter dieser Röhre führende Draht ungeschirmt verlegt wurde, ergibt sich zwischen dem Koppelkondensator (Anode) und dem Gitter eine kleine Kapazität. Nicht viel, vielleicht 1 pF oder 2 pF. Zwar ist jeder Verstärker anders aufgebaut, aber mit großer Wahrscheinlichkeit kann gesagt werden, dass sich diese Kapazität *vergrößern* wird, wenn ein größervolumiger Kondensator eingebaut wird. Nur 2 pF, das klingt nach nicht viel. Hierbei ist aber der **Miller-Effekt** zu berücksichtigen, der an einer ECC83 bei zusätzlichen 2 pF Gitter-Anoden-Kapazität die Gitter-Eingangskapazität um 100 pF (oder noch mehr) vergrößert. Die Röhre selbst hat, laut Datenblatt, $C_{ga} = 1,6$ pF, das ergibt, je nach Spannungsverstärkung, $C_E = 80$ pF. Und weil der Schaltungsaufbau ja nicht völlig kapazitätsfrei sein kann, nehmen wir als Beispiel $C_E = 120$ pF an. Dieser Wert würde nun durch den Koppelkondensator auf 220 pF vergrößert werden. Zusammen mit 100 k Ω Quellwiderstand entsteht hierdurch ein

Tiefpass mit 7,2 kHz Grenzfrequenz.

Diese Zahl vergleiche man mit den in der Kondensatorwerbung angeführten Megahertzen, und überlege, wie groß hierbei die Blindwerte sein könnten. Natürlich muss das ja nicht bei jedem Verstärker so sein, da gibt es unzählige Varianten: Fender- und VOX-Verstärker, deren Inneres schon von anderen Autoren zu Recht als "Kabelverhau" bezeichnet wurde, Boutiqueverstärker mit exakt rechtwinkelig-gebogenen Schalldrähten, Fiberboards, Turretboards, PC- und PTP-Boards, Quellwiderstände von nur 50 k Ω , aber auch von über 250 k Ω , und noch viel mehr Ab- und Besonderheiten. Ja, und nicht zu vergessen: Streukapazitäten. Wenn also der Guru mit erhitztem Kolben unter andächtigem Schweigen seiner Jüngerschaft einen handgewickelten Kondensator einlötet und zum Hörtest ruft, dann könnte sich tatsächlich der Klang geändert haben. Weil die Drähte ein bisschen verbogen wurden, weil der Anodenkondensator 1cm näher an die Gitterleitung gerückt ist, weil der performende Gitarrist jetzt des horrenden Preises wegen sanfter in die Saiten langt, oder weil nun plötzlich der Verlustfaktor bei 100 MHz reduziert wurde. Ja, und auch das muss erwähnt werden: Es gibt noch mehr Möglichkeiten. There are more things in heaven and earth. More knowledge, and more BS. Und das steht hier nicht für Bachelor of Science. Denn Wissenschaft ist in diesem Circulus vitiosus nicht immer erwünscht, insbesondere nicht die Wissenschaft vom elektrischen Strom. Da lehnt der Zeitschriften-Autor seine vermeintlichen Gegner (*'studierte Physiker'*) generell ab, und rät, *'um Wissenschaftler einen großen Bogen zu machen'*. Jene revanchieren sich postwendend und sprechen allen Nichttechnikern (bzw. Nicht-Naturwissenschaftlern ☺) generell die Fähigkeit zum wissenschaftlichen Arbeiten ab.

Wissenschaft erfordert Reproduzierbarkeit, Audiophilie lebt von Reproduktion, das ist etwas anderes. Wenn ein Kunstliebhaber ein millionenteures Gemälde nicht nur als Wertanlage kauft, sondern weil es ihm gefällt, wer forscht hier nach technischer Begründung? Welchen Ästhet interessiert, ob das Gauguinsche Grün um 0,221 nm grüner ist als das Dalische Grün? In der Audiotechnik scheint das anders zu sein, da argumentiert der Stratspieler mit dem besonders hohen (bzw. besonders niedrigen) Gewicht der Erle/Esche, und der Plexibesitzer mit der besonderen Gruppenlaufzeitverzerrung der Yellow Mustards. Da wechselt der 330B-Fan seine Polypropylenkondensatoren gegen Ölpapier-Kondensatoren aus, weil, wie alle Erleuchteten wissen, Polypropylen ein Kunststoff ist, vulgo Plastik, und deshalb erzeugen diese Kondensatoren auch diesen fürchterlichen *Plastiksound* (Werbung). Ob ein öliger Sound denn besser sei, frage man lieber nicht, der 300B-Fan hat nämlich ganz andere Sorgen: Diese esoterischen Ölgötzen gibt's nämlich mit Alufolie, oder mit Kupferfolie. Kupfer leitet besser als Aluminium, und deshalb, sagt die Werbung, muss der Cu-Klang besser sein. Dass ein handgewickelter Alufolienkondensator pro Stück 12 € kostet, wird in diesen Kreisen eher dem Lowcost-Segment zugeordnet, das passt nicht so richtig zum gematchedten* Triodenpaar (um 250 €). Also doch lieber Kupferfolie, weil: Da ist die Leitfähigkeit um 60% besser. Und der Preis um 100% höher, das reicht als Einstiegsset. Zum nächsten Geburtstag belohnt man sich dann aber doch mit dem real Stuff, mit den **Silberfolien**-Kondensatoren, weil: Silber hat halt doch die noch bessere Leitfähigkeit, sagt die Werbung, und wer, wenn nicht die Webpage des Herstellers, will das besser wissen. Also Silber. Und sagen nicht auch die Erinnerungsreste an den verhassten Lateinunterricht, dass Argentarius irgendwas mit Sühneopfer, nein, mit Geldgeschäft zu tun hatte? Passt schon: Großes Geldgeschäft, weil: Man hat ja nicht nur *einen* Koppelkondensator in so einem Radio, pardon, Amplifier, da sind ja zwei, drei. Pro Kanal! Also das kleine Kästchen vor "bestellen" anklicken, und "6" eintragen. Und tapfer bleiben, wenn darunter dann 1011,00 € auftaucht, is ja zum Geburtstag, in den Warenkorb, fertig. Nein, sicherheitshalber gleich für den übernächsten Geburtstag *Wiedervorlage* eintragen, da sollte nämlich spätestens nachgekauft werden, weil: Bei Ag-Caps weist der Hersteller ausdrücklich auf die Mindestlebensdauer hin: 2 Jahre. Ist doch nicht schwierig: Kaufen, einlöten, Einspielzeit abwarten, anhören, nachkaufen, einlöten, Einspielzeit abwarten, usw. Und sollte man jemals zweifeln: Tabellenbuch Elektrotechnik: Tatsächlich, die Leitfähigkeit von Silber ist um 6% besser als die von Kupfer. *Und ist's auch Hörsinn, so hat es doch Methode*, oder wie war das noch bei Shakespeare?

Dass die Kapazitätstoleranz dieser Ölgötzen mit +30% angegeben wird, ja gut, das ist halt so, dafür sind sie handgewickelt. Würden Sie Ihren kleinen Thorben von einer *Maschine* wickeln lassen? Eben! *"Qualität hat seinen Preis (sic)"*. Dass das Gehör die in der Werbung zitierte μ s-Auflösung wenn überhaupt, dann interaural, also "zwischen den Kanälen" erbringt, das sollte man nicht so eng sehen. Wie schreibt der Audiophile im Chat-Room: *Diese Toleranz wird sich vor einem Hochtöner doch nicht so gravierend auswirken?* Nein, keine Sorge, Hochtöner sind gemeinhin als sehr tolerant gegenüber Minderheiten bekannt. Und falls doch Unsicherheit besteht: Bestimmt gibt's für 2022,00 € irgendwo eine selektierte Version mit verringerter Toleranz. Nein, bitte nicht an 1%-ige Filterkondensatoren denken! Gaaanz billig, kann nicht klingen! Wenn nur das Besondere gut genug ist: **Selected Ag-Caps**. Alle 2 Jahre, oder alle 10.000 km – whatever comes first.

Was ist eigentlich die Synthese von idiographisch[♣] und diotisch[♣]? Audiophil??

* Schreibweise umstritten, auch: gematschten, gematchden, gematchten.

♣ idiographisch = das Besondere beschreibend; diotisch = zweiohrig hören.

Kondensator-Dielektrika

Glimmer (Muskovit-Glimmer)

Bis 125°C (max. 155°C). Permittivitätszahl $\epsilon_r = 5,5 \dots 7$.

Daneben: Phlogopitglimmer, Mikanit, Mikalex, Mikafolie, Samikanit (mit anderen Daten).

Vorwiegend Elektronen- und Ionenpolarisation. Verluste frequenzunabhängig (\approx GHz).

Geringste zeitliche Inkonzanz der Kapazität, geringster Temperaturkoeffizient.

Polystyrol (KS, Styroflex)

Thermoplastischer Kunststoff, vorwiegend Elektronenpolarisation.

Seit 1936 bis 60°C, ab 1953 bis 70°C (max. 85°C). Permittivitätszahl $\epsilon_r = 2,5$.

Sehr hoher Isolationswiderstand, sehr geringe Verluste.

Polypropylen (KP)

Thermoplastischer Kunststoff, vorwiegend Elektronenpolarisation.

Verfügbar nach 1960; bis 85°C. Permittivitätszahl $\epsilon_r = 2,3$.

Sehr hoher Isolationswiderstand, sehr geringe Verluste.

Polycarbonat (KC)

Thermoplastischer Kunststoff, vorwiegend Elektronen- und Orientierungspolarisation.

Verfügbar seit 1961; bis 100°C, max. 125°C. Permittivitätszahl $\epsilon_r = 2,8 \dots 3$.

Sehr hoher Isolationswiderstand, geringe Verluste.

Polyethylenterephthalat (KT, Polyester)

Thermoplastischer Kunststoff, vorwiegend Elektronen- und Orientierungspolarisation.

Verfügbar seit 1957; bis 100°C, max. 125°C. Permittivitätszahl $\epsilon_r = 3,3$.

Hoher Isolationswiderstand, kleine Verluste.

Papier, imprägniert (P, MP)

Sulfatcellulose, vorwiegend Elektronen- und Orientierungspolarisation.

Eigenschaften stark von Dichte, Verunreinigungen und Wassergehalt abhängig.

U.U. nur mäßiger Isolationswiderstand, geringe Verluste. Max. 100°C.

Kondensatoröl (Naphthenöl u.a.).

Vorwiegend Elektronenpolarisation. Aber: Oxidationsprodukte (Säuren) sind polar.

Permittivitätszahl $\epsilon_r = 2,2$. Kupfer beschleunigt die Oxidation des Öls.

U.U. nur sehr begrenzte Lebensdauer.

Al₂O₃, Ta₂O₅

In Elektrolyt-Kondensatoren; als Koppelkondensatoren nicht verwendet.

Keramiken, z.B. TiO₂

In Keramik-Kondensatoren; als Koppelkondensatoren selten verwendet.