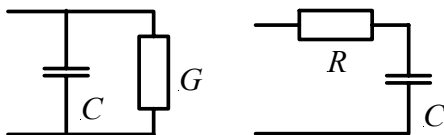


### 9.2 Ton-Kondensator (Tone-Cap)

Der Ton-Kondensator (Tone-Cap) liegt in Reihe zum Tone-Poti und ermöglicht eine Höhen-Bedämpfung. Häufig findet man Kapazitäts-Werte zwischen 20 – 50 nF, in seltenen Fällen auch 100 nF (alte Fender-Gitarren). Kondensatoren können durch ihren (in *Farad* angegebenen) Kapazitäts-Wert aber nur in erster Näherung beschrieben werden; ob zusätzliche Parameter erforderlich sind, hängt von den individuellen Genauigkeits-Anforderungen ab.

Ein Kondensator **speichert** getrennte (positive und negative) Ladungen. Zusätzlich wandelt er aber auch einen kleinen Teil der elektrischen Energie in **Wärme** um, und wirkt somit als Verlustwiderstand. In der Gesamtbilanz kann Energie zwar nicht "verloren" gehen, die erzeugte (winzige) Wärmeenergie steht aber nicht mehr als *elektrische* Energie zur Verfügung – daher der Begriff "Verlust". Es gibt mehrere **Ursachen** für diese Kondensator-Verluste: Isolationswiderstand des Dielektrikums, Zuleitungs- und Elektrodenwiderstände, Polarisationsverluste (Schwingungen der Dipole des Dielektrikums um ihre Ruhelage bewirken Erwärmung (10.8)).

Bei einfachen Modellen wird das Kondensator-Schaltbild um einen reellen Widerstand erweitert (**Abb. 9.8**). Eine Größe zur Kennzeichnung ist der **Verlustfaktor**  $d$ , dessen Arcustangens den **Verlustwinkel**  $\delta$  ergibt; dieser beschreibt die verlustbedingte Phasenverschiebung.

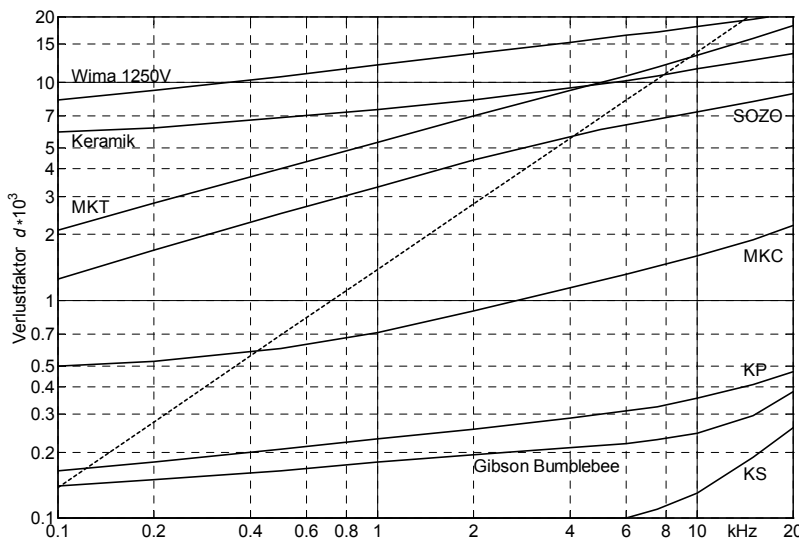


$$d = G/\omega C; \quad d = R \cdot \omega C$$

$$d = \tan \delta = \text{Verlustfaktor.}$$

**Abb. 9.8:** Einfache Kondensator-Ersatzschaltungen: NEB (links), HEB (rechts).

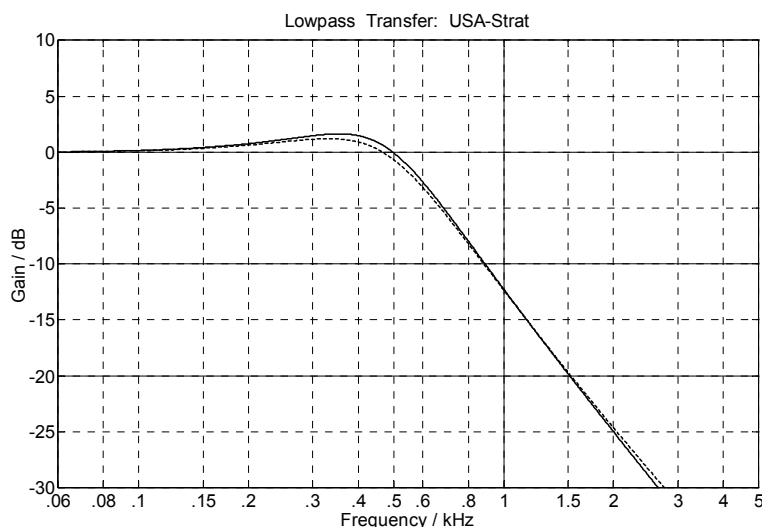
Die Literatur bezeichnet die GC-Parallelschaltung als Niederfrequenz-Ersatzschaltbild (NEB), und die RC-Reihenschaltung als Hochfrequenz-Ersatzschaltbild (HEB). Beim NEB verläuft  $d$  reziprok zur Frequenz, beim HEB proportional zur Frequenz. Wie Messungen zeigen, ist das NEB für den Audibereich völlig ungeeignet, denn der Verlustfaktor nimmt mit steigender Frequenz zu, und nicht ab (**Abb. 9.9**). Aber auch das HEB gibt die Frequenzabhängigkeit nur tendenziell richtig wieder; der quantitative Zusammenhang ist unbefriedigend.



**Abb. 9.9:** Verlustfaktor  $d(f)$ . Messwerte von verschiedenen 22-nF-Kondensatoren. Das Hochfrequenz-Ersatzschaltbild ergibt die gestrichelte Gerade (10  $\Omega$  in Reihe mit 22 nF).  
 MKC = Polycarbonat  
 MKT = Polyester  
 KP = Polypropylen  
 KS = Polystyrol = Styroflex

Abb. 9.9 zeigt, dass Kondensatoren sehr unterschiedliche elektrische Eigenschaften haben können – selbst wenn ihre Kapazität gleich ist. Hieraus darf aber noch nicht geschlossen werden, dass damit zwangsläufig der Klang der (elektrisch verstärkten) Gitarre variiert, denn außer dem Kondensator bestimmen noch weitere Komponenten die Gesamtverluste der elektrischen Schaltung. Bei "aufgedrehtem Ton-Regler" (Tone-Poti hat maximalen Widerstands-Wert) liegen typischerweise 250 oder 500 k $\Omega$  in Reihe zum Ton-Kondensator. Im Vergleich hierzu ist es völlig unerheblich, ob die Kondensatorverluste (HEB) nun 500  $\Omega$  oder nur 10  $\Omega$  oder noch weniger betragen. Selbst wenn man den Ton-Kondensator ganz radikal durch einen Kurzschluss ersetzt, ändert sich im relevanten Frequenzbereich das Übertragungsmaß um weniger als 0,01 dB. Das heißt allerdings nicht, dass **"bei aufgedrehtem Ton-Regler"** der Kondensator gar keine Funktion hat. Er hat schon: Er wirkt gegenüber dem Potentiometer-Widerstand in sehr guter Näherung wie ein Kurzschluss. Egal, ob seine Kapazität 20 oder 50 nF beträgt, und unabhängig davon, ob sein Verlustfaktor 0,1‰ oder 5‰ beträgt.

Bei **"zugedrehtem Ton-Regler"** (Tone-Poti hat minimalen Widerstands-Wert) werden die Verluste hauptsächlich vom Tonabnehmer und vom parallel liegenden Volume-Poti bestimmt. Bei der Stratocaster bildet die Tonabnehmer-Induktivität mit dem Ton-Kondensator (und der Kabel-Kapazität) eine leichte Resonanzüberhöhung bei 350 Hz (**Abb. 9.10**). Nur in diesem Frequenzbereich wirken sich Kondensator-Verluste aus. In Abb. 9.10 ist das Übertragungsmaß dargestellt, das sich mit einem verlustfreien und einem extrem verlustbehafteten Kondensator ergibt. Verlustfrei bedeutet  $d = 0$ , verlustbehaftet bedeutet für dieses Beispiel  $d = 60\%$ . Ein derart "schlechter" Kondensator wird normalerweise nicht in Gitarren eingelötet. Würde man sich für einen der "schlechten" Kondensatoren aus Abb. 9.9 entscheiden, also beispielsweise  $d = 10\%$  wählen, so wären die Pegelunterschiede zum verlustfreien Kondensator mit  $\Delta L < 0,1$  dB unhörbar. Also gilt auch beim "zugedrehten Ton-Regler": Die Verlustfaktoren handelsüblicher Kondensatoren haben **keinerlei hörbare Auswirkungen auf den Klang**. Diese Aussage gilt nicht nur für die Stratocaster, sondern auch für andere Gitarren. Ja, sogar die Ton-Kondensatoren einer **Les Paul** unterliegen denselben physikalischen Gesetzen – unabhängig davon, wie teuer sie am Vintage-Markt gehandelt werden. Dem Restwiderstand des Tone-Potis sollte auch nur kurze Beachtung geschenkt werden: Ein zugedrehtes Potentiometer kann natürlich keinen idealen Kurzschluss erzeugen, aber selbst die mit Billigpotentiometern erreichbaren Restwiderstände ( $< 100 \Omega$ ) sind allemal ausreichend und führen ebenfalls zu keinen hörbaren Unterschieden.

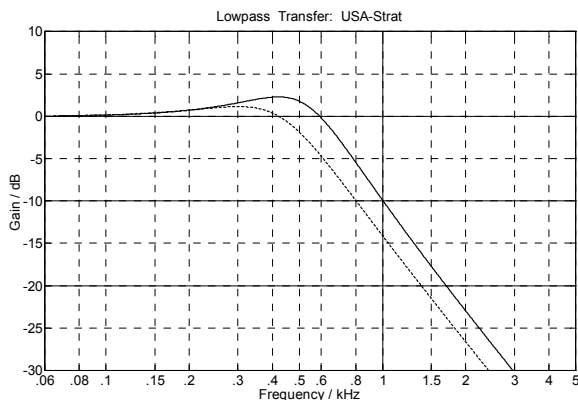


**Abb. 9.10:** Übertragungsmaß der Stratocaster, zugedrehter Ton-Regler, zwei verschiedene Kondensatoren (— = verlustfrei).

Wenn Kondensatorverluste keine hörbaren Auswirkungen auf den Klang haben – woher kommen dann all die Berichte von Gitarristen, deren Gitarre nach dem Kondensatorauswechseln plötzlich "ganz anderes" klingt? Sortiert man die Fälle aus, in denen der Gitarrist (bzw. Guru) auch gleich die Saiten erneuert (weil sowieso gerade alles zerlegt war), so verbleiben immer noch genügend Fälle, die Beachtung verdienen. Gibt es neben dem Verlustfaktor vielleicht noch andere (u.U. unentdeckte) Parameter zur Beschreibung der elektrischen Wirkung eines Kondensators? Oder ist diese Frage auch schon zu restriktiv? Kann ein Kondensator auch nicht-elektrische Wirkungen erzeugen? Im Prinzip schon: Aus mechanischer Sicht stellt er eine Masse dar, die an Federn (Drähten) hängt. Und mitschwingen kann. Macht Mut zu weitergehenden Überlegungen: Klingt die John-Lennon-Casino nur authentisch, wenn man den Potiknopf verschlampt? Tönt's nur dann original nach E.C., wenn an der Kopfplatte eine Zigarette eingezwickelt ist? Und ändert sich der Klang, weil ja die Masse der mitschwingenden Zigarette im Lauf der Zeit in Rauch aufgeht?? Dann gäbe es auch noch Mikrofonie und Triboelektrik (Kap. 9.4), aber beides soll hier nicht analysiert werden.

Zurück zu den elektrischen Parametern: Die Modellierung eines Kondensators durch ein RC-Netzwerk ist nur erlaubt, wenn man lineares Verhalten unterstellt. Sobald aber Spannung an den Kondensator-Elektroden anliegt, entstehen Anziehungskräfte, die den Elektrodenabstand verkleinern – und die Kapazität vergrößern. Die Systemgröße Kapazität wird signalabhängig, und dies deutet auf nichtlineares Systemverhalten hin. **Klirrfaktormessungen** zeigten aber, dass derartige nichtlineare Prozesse unbedeutend sind: Bei  $2 V_{\text{eff}}$  lag der gemessene Klirrfaktor unter 0,01% (Folienkondensator) bzw. unter 0,1% (Keramikkondensator). Somit kann auch dieser Parameter als Ursache hörbarer Unterschiede sicher ausgeschlossen werden.

Was bleibt? Die Kapazität natürlich! Bei all den Überlegungen über Kondensator-Eigenschaften darf nicht unberücksichtigt bleiben, dass die **Kapazität** fertigungsbedingten Streuungen unterliegt. Schon im Neuzustand kann die Kapazität eines 50-nF-Kondensators nur z.B. 40 nF betragen. Mitte des letzten Jahrhunderts waren Kapazitäts-Toleranzen von  $\pm 20\%$  nicht ungewöhnlich, und auch heute sind  $\pm 1\%$  zwar am Markt erhältlich, aber keinesfalls Standard. In **Abb. 9.11** sind die Auswirkungen von  $\pm 20\%$  Kapazitäts-Toleranz für die Stratocaster dargestellt – derartige große Pegelunterschiede sind zweifellos hörbar. Es ist folglich vorstellbar, dass ein Gitarrist den in seine Gitarre eingelöteten Billig-Kondensator gegen einen 50 Euro teuren "Replica-Cap" tauscht, und tatsächlich eine Klangänderung wahrnimmt. Die mit einem nur 18 Cent teuren MKP-Kondensator aber auch erreichbar gewesen wäre. Selbstverständlich geht von einem "Original-Bumblebee" eine ganz andere Aura (aka Mojo) aus, und jeder Gitarrist sollte nach seiner Facon glücklich werden. Der Zubehörmarkt lebt auch von jenen, die in ihre 100-Euro-Gitarre vier Centralab-Potis (à 100 Euro) und zwei Replica-Caps (à 50 Euro) einbauen – man unterscheidet sich damit wohltuend vom Gros der Unerleuchteten.



**Abb. 9.11:** Übertragungsmaß der Stratocaster, zugedrehter Ton-Regler, zwei verschiedene Kondensatoren: 60 nF bzw. 40 nF.

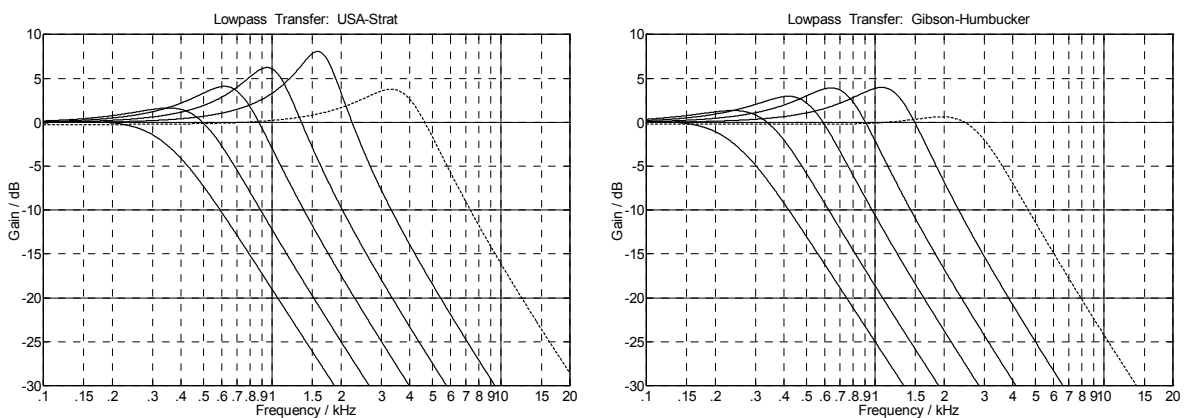
Ursprünglich wurden 100-nF-Kondensatoren eingesetzt, ab 1970 dann 50 nF; 1983 erfolgte eine weitere Verringerung auf 22 nF. Je kleiner die Kapazität, desto höherfrequent und stärker ausgeprägt ist die Resonanz.

Die Entscheidung für oder gegen einen speziellen Ton-Kondensator hängt immer von subjektiven Präferenzen ab. Es soll Jazz-Gitarristen geben, die sich ratlos fragen, wozu bei der ES-335 ein Steg-Tonabnehmer eingebaut wurde<sup>§</sup>. Warum soll es dann nicht auch Stratocaster-Besitzer geben, die den 22-nF-Kondensator gegen einen 100-nF-Kondensator austauschen? Entweder, weil dieser Leos Originalschaltung am nächsten kommt, oder, weil die Strat sonst so schrill klingt. Je größer die Kapazität, desto dumpfer der Klang bei zugehobenem Tone-Poti (**Abb. 9.12**). Andererseits gibt es nachrüstbare Drehschalter, die das Zuschalten *kleinerer* Kapazitäten ermöglichen (z.B. 1 – 10 nF). Jeder möge wählen, was ihm gefällt. Mit nichtphysikalischer Motivation (*same as Jeff Beck has*), oder paraphysisikalisch begründet (♪ΨΣ☼☉), eher pragmatisch (*war schon drin, passt*), oder streng gläubig (*wurde in der März-Ausgabe von "Guitar, Picks and Licks" empfohlen*). Wer den Sollwert exakt reproduzieren möchte, aber kein Messgerät hat, kauft für 0,58 Euro einen einprozentigen MKP-Kondensator (alle Preise anno 2005). Wer "risikofreudig" ist, kauft eine Handvoll fünfprozentiger MKP-Kondensatoren (à 0,18 Euro), und testet, ob da schon Unterschiede hörbar werden. Von den in der nachfolgenden Tabelle aufgelisteten Dielektrika sind Polypropylen und Polycarbonat besonders geeignet, aber auch MP, KT, MKT, NDK können ohne hörbare Verschlechterung eingesetzt werden. Voraussetzung ist natürlich immer, dass der Kondensator keinen Defekt aufweist. Ein Styroflex-Kondensator, dem der Lötcolben zu nahe gekommen ist, kann viel schlechter sein als ein unversehrter MKT-Kondensator.

Bezeichnung	Kurzform	$d$ in %	Bemerkung
Glimmer	Mica	>0,1	Schwer erhältlich, groß, für Gitarre unzuweckmäßig.
Polystyrol = Styroflex	KS, MKS	0,1	Sehr hochwertig.
Polypropylen	KP, MKP	0,3	Sehr gut geeignet
Polycarbonat	KC, MKC	1	Sehr gut geeignet, sehr guter Temperaturkoeffizient.
Papier	MP	4 – 8	Gut geeignet
Polyester	KT, MKT	5 – 10	Gut geeignet
Keramik Klasse 1	NDK	< 1,5	Gut geeignet
Keramik Klasse 2	HDK	< 30	Für Gitarre unzuweckmäßig
Keramik Klasse 3	–	< 60	Für Gitarre unzuweckmäßig

**Tabelle:** Verlustfaktoren üblicher Dielektrika ( $f = 1$  kHz).

In **Abb. 9.12** ist die Wirkung des Ton-Kondensators bei zugehobenem Tone-Potentiometer dargestellt. Kabelkapazität = 500pF, Röhrenverstärker mit 1 M $\Omega$  Eingangswiderstand. Die gestrichelte Kurve erhält man bei aufgedrehtem Tone-Potentiometer.



**Abb. 9.12:** Auswirkung unterschiedlicher Ton-Kondensatoren: 100nF, 50nF, 22nF, 10nF, 3.3nF; Tone CW (---).

<sup>§</sup> Tipp: "P.A.F." draufschreiben, und für 10.000 \$ als "Vorserien-Prototyp" verkaufen. Auch in Japan anbieten!