

# Passive Frequenzweichen

Ó by: KoMET 995

Frequenzweichen haben die Aufgabe, die verschiedenen Frequenzen, aus denen der von uns wahrgenommene Klang besteht, auf unterschiedliche, jeweils optimal passende Lautsprechertypen aufzuteilen. Passivweichen bestehen aus Bauteilen, die zwischen Verstärker und Lautsprecherchassis geschaltet werden. Sie haben folglich höhere Ströme und Spannungen zu verarbeiten als Aktivweichen. Das macht sie physisch größer und schwerer.

Es gibt prinzipiell drei verschiedenen Typen von Passivweichenbauteilen:

Kondensatoren, Drosseln und Widerstände.

Alle Bauteile wirken im Grunde als Widerstand für das elektrische (Musik-)Signal.

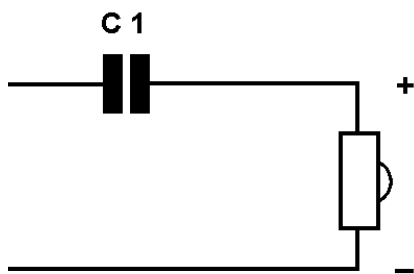
Widerstände ("R") wirken breitbandig. Ein idealer Widerstand dämpft das gesamte Frequenzband gleichmäßig ab.

Kondensatoren ("C") wirken dämpfend auf tiefe Frequenzen. Sie lassen folglich nur hohe Frequenzen durch (passieren). Daher nennt man einen Kondensator in Reihe zu einem Lautsprecher "Hochpaß".

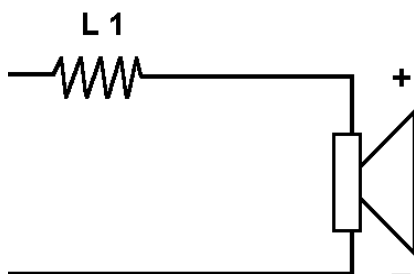
Drosselspulen ("L") wirken dämpfend auf hohe Frequenzen. Sie lassen folglich nur tiefe Frequenzen passieren. Das nennt man "Tiefpaß".

## Filter erster Ordnung:

Schaltet man so einen frequenzabhängigen Widerstand, also einen Kondensator oder eine Drosselspule in Reihe vor einen Lautsprecher, so ist das ein Hochpaß bzw. Tiefpaß erster Ordnung.



HP 1. Ordn. (für Hochtöner)



TP 1. Ordn. (für Tieftöner)

Hierbei werden die nicht benötigten Frequenzen mit 6 dB/Okt. weggefiltert, d.h., bei jeder Verdoppelung der Frequenz fehlen (beim TP) weitere 6 dB Schalldruck. Die folgenden Berechnungsformeln ergeben die Bauteilewerte für eine Frequenz, bei der der Schalldruck bereits um 3 dB ("F3") abgefallen ist. Sie gelten für die üblichen Filterkennungen nach Butterworth.

Berechnung:

$$\text{Hochpa\ss: } C1 = \frac{1\,000\,000}{2 \cdot \pi \cdot \text{Ftr} \cdot Z} \quad [\mu\text{F}]$$

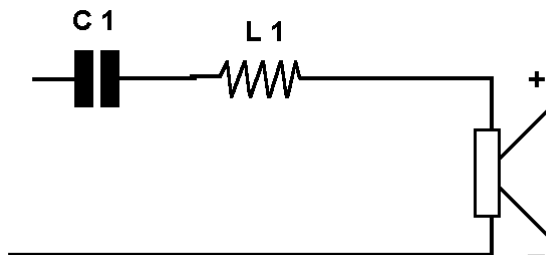
Z = Lautsprecherimpedanz

Ftr = Trennfrequenz

$\pi = 3,14$

$$\text{Tiefpa\ss: } L1 = \frac{Z \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot \text{Ftr}} \quad [\text{mH}]$$

Will man sowohl hohe als auch tiefe Frequenzen wegfiltern, z.B. f#ur einen Mittelt#oner, so schaltet man einen Hoch- und einen Tiefpa# hindereinander. Dann wird nur ein bestimmtes Frequenzband durchgelassen. Man nennt das einen "Bandpa#".



BP 1. Ordn. (f#ur Mittelt#oner)

## Schalldruckanpassung:

Will man die effektive Lautst#rke eines Lautsprecherchassis reduzieren, so bietet sich als einfachste Ma#nahme die Reihenschaltung eines Widerstands vor den Lautsprecher an. Dann erh#ht sich aber die Impedanz des Lautsprechers (normal 4 oder 8 Ohm) um den Wert des Widerstands. Diese Gesamtimpedanz ist bei der Bauteileberechnung f#ur das Filter zugrunde zu legen.

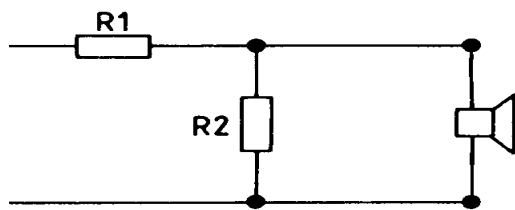
Nun kann man Widerst#nde auch parallel zum Lautsprecher anschlie#en. Dann reduziert sich aber die Gesamtimpedanz des Lautsprechersystems, die der Verst#rker "sieht". Die Formel zu Berechnung des Gesamtwiderstands zweier parallelgeschalteter Widerst#nde lautet:

$$R_{\text{ges}} = \frac{R_l \cdot R_p}{R_l + R_p}$$

mit  $R_l$  = Lautsprecherimpedanz und  
 $R_p$  = Widerstand des Parallelwiderstands.

Schaltet man einem Lautsprecher mit 4 Ohm Impedanz ("Z", auch "Nenn-Schein-Widerstand" genannt) einen Festwiderstand von 4 Ohm parallel, dann hat der Verst#rker eine Abschlu#impedanz von  $16/8 = 2$  Ohm zu verarbeiten. Da nun aber genau die H#lfte (weil  $R_l = R_p$ ) der Verst#rkerleistung #ber den Widerstand am Lautsprecher vorbeigeleitet wird, hat dieser dann quasi die doppelte Belastbarkeit. Der Widerstand kriegt dann aber genauso viel Leistung ab, wie der Lautsprecher, was er erst mal aushalten k#nnen mu#. Da ein idealer Verst#rker allerdings an 2 Ohm genau doppelt so viel Leistung abgibt, wie an 4 Ohm, hat man nichts gewonnen au#er in Hitze verwandelte Energie.

Will man den Pegel eines Lautsprechers richtig absenken, sollte man m#glichst mit Spannungsteilern arbeiten, also einer Kombination von Reihen- und Parallel-R, siehe folgendes Bild:



Spannungsteiler

$R_p$  berechnet sich, wie oben gezeigt.  $R_r$  bestimmt man so, daß (Reihenwiderstände addieren sich) sich abschließend wieder die ursprüngliche Lautsprecherimpedanz (meist 4 oder 8 Ohm) ergibt. Eine an einem realen 4 Ohm-Mitteltöner gemessene Kombination von R's zu Spannungsteilern mit R-Werten der Normreihe und den resultierenden Gesamtimpedanzen und Pegelabsenkungen zeigt die folgende Tabelle:

| Absenkung<br>- dB | Widerstände [Ohm]<br>Reihe | Widerstände [Ohm]<br>parallel | resultierende<br>Impedanz |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 0,5               | 0,47                       | 33                            | 4,04                      |
| 1,0               | 0,82                       | 15                            | 4,11                      |
| 1,5               | 1,0                        | 10                            | 3,86                      |
| 2,0               | 1,2                        | 10                            | 4,86                      |
| 3,0               | 1,2                        | 8,2                           | 3,89                      |
| 3,5               | 1,5                        | 8,2                           | 4,19                      |
| 4,0               | 1,5                        | 6,8                           | 4,02                      |
| 5,0               | 1,8                        | 6,8                           | 4,32                      |
| 6,0               | 2,2                        | 3,9                           | 4,18                      |
| 10,0              | 2,7                        | 2,2                           | 4,12                      |
| 14,0              | 3,3                        | 1,0                           | 4,1                       |

Tabelle:  
Spannungsteiler

Die tatsächlich sich ergebenden Impedanzen sind bei der Weichenberechnung in die Formeln einzusetzen.

Vor Hochtönern zeigen meine Erfahrungen allerdings, daß Spannungsteiler im Zusammenhang mit Hochpassfiltern mindestens 2ter Ordnung klanglich nicht unproblematisch sind. Daher verzichte ich in diesem Fall auf Parallelwiderstände und setze den Reihenwiderstand vor das Filter. Somit kann der Hochtöner ohne zusätzlichen „Brems“widerstand über das L ausschwingen und klingt sauberer. Außerdem hilft der folglich im Hochton höhere Impedanzwert dem Verstärker, dessen Innenwiderstand zu hohen Frequenzen meist ansteigt und er somit dort einen geringeren Dämpfungsfaktor bietet.

## Sicherung:

Eine Sonderform eines Widerstands stellen Sicherungen dar. Gernerell erhöht jeder Widerstand in Reihe vor einem Lautsprecher dessen Strombelastbarkeit. Je höher der Widerstandswert, desto sicherer. Aber leider auch: desto leiser. Hat man eine Frequenzweichenabstimmung gewählt, die keinen nenneswerten Reihenwiderstand vor'm Hochtöner vorsieht, ist es meist sinnvoll, diesen speziell abzusichern.

Denn gerade im Car-HiFi kommt es häufig vor, daß recht laut gehört wird und die meist relativ leistungsschwachen Verstärker, die für Hochtöner bzw. Satellitensysteme Verwendung finden, dann übersteuert werden, was sie (je billiger desto schlimmer) mit Clipping beantworten. Clipping heißt, der Verstärker ist nicht mehr in der Lage, das (sinusförmige) Musiksignal korrekt zu übertragen und kapt die Spitzen. Das führt zu einer erhöhten Belastung besonders des Hochtöners, der sich mit hart erscheinendem Klangbild beschwert. Und letztendlich abfackelt - es sei denn, man sichert ihn richtig ab.

Billig geht das mit Schmelzsicherungen, die vor die Hochpassweiche in Reihe eingeschleift werden. Werte für Hochtönsicherung: 0,25 (kleine 10 bis 14 mm Kalotten) bis 1 A (höher belastbare 28 mm Kalotten). Mittelträge bis flink. Nachteil der Schmelzsicherungen: Nach Defekt ist eine neue fällig.

Elegant er geht's mit Kaltleitern (PTC). Spezielle Vertreter dieser Spezies sind die Poly-Switch-Sicherungen. Diese haben im kalten Zustand einen sehr geringen Widerstand, der mit Erhitzung durch höhere Ströme in einer stark progressiven Funktion zunimmt und somit den (Hoch)töner schützt. Fließt dann ein geringerer Strom, erkaltet unser PTC wieder und wird wieder leitend. Ganz von alleine. Praktisch, aber in der (einmaligen) Anschaffung erstmal teurer als eine Schmelzsicherung.

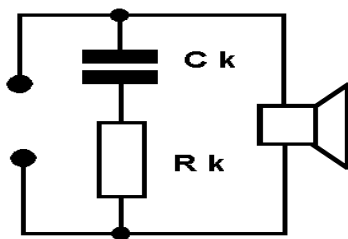
Eine dritte Sicherungsmöglichkeit ist ein (Auto)birnchen. So eines mit 5 bis 10 Watt tut's für Hochtöner. Der Glühfaden aus einer Wolfram-Wendel wird heiß, leuchtend und hochohmig, wenn der Stromfluß ansteigt. Die Anstiegsfunktion der Innenwiderstands ist aber flacher als beim Poly-Switch. Aber's glimmt so schön wie ein Röhrenverstärker, weshalb manche Leute auch dessen Klangvorteile auf die Birnchen-Sicherung assoziieren. Jedem Tierchen sein Pläsierchen! Sagte meine Oma schon früher.

Aber: jede Sicherung verschlechtert die Klangqualität. Deshalb bypasse ich sie gern mit einem kleinen Styroflex-Kondensator von max. 10 nF. Muß man nicht, kann man aber. Eigenversuch macht schlau.

## Impedanzkorrektur:

Nach diesem kurzen Einschub zurück zu den Parallelgliedern in unserer Frequenzweiche. Was passiert eigentlich, wenn man einen frequenzabhängigen Widerstand (L oder C) parallel zum Lautsprecher schaltet? Ein C läßt dort hohe Frequenzen am Lautsprecher vorbei. Vorteil: Der kriegt keine hohen Töne mehr ab, Nachteil: die Gesamtimpedanz bei hohen Frequenzen wird Null, der Verstärker wird also kurzgeschlossen!! Nimmt man statt des C ein L, schließt man ihn bei tiefen Frequenzen kurz - auch nicht besser.

Diesen Kurzschluß kann man aber verhindern, indem man dem C (oder L) ein R in seine Reihe schaltet. Damit kann dann die Gesamtimpedanz nie kleiner werden als die aus  $R_l$  und  $R_p$  resultierende. In der Praxis nutzt man diese Eigenschaft, um bauartbedingte Impedanzabweichungen von Lautsprecherchassis zu kompensieren. Denn bedingt durch die Eigeninduktivität der Lautsprecherschwingspule (spiralförmiger Wickel) steigt die Impedanz von Konus- und Kalottenlautsprechern zu hohen Frequenzen hin an. Diesen Anstieg kann man kompensieren, indem man ein R-C-Glied ("Zobel-Glied") parallel zur Schwingspule (also zum Lautsprecher) schaltet:



Zobel-Glied

Die Werte werden folgendermaßen berechnet:

mit  $R_k$  = Korrekturwiderstand  
und  $C_k$  = Korrekturkondensator

$R_k$  wählt man etwa so groß, wie  $R_e$  des Lautsprechers, bei  $Z = 4 \Omega$  also ca. 3,3.  $C_k$  errechnet sich dann mit der Formel:

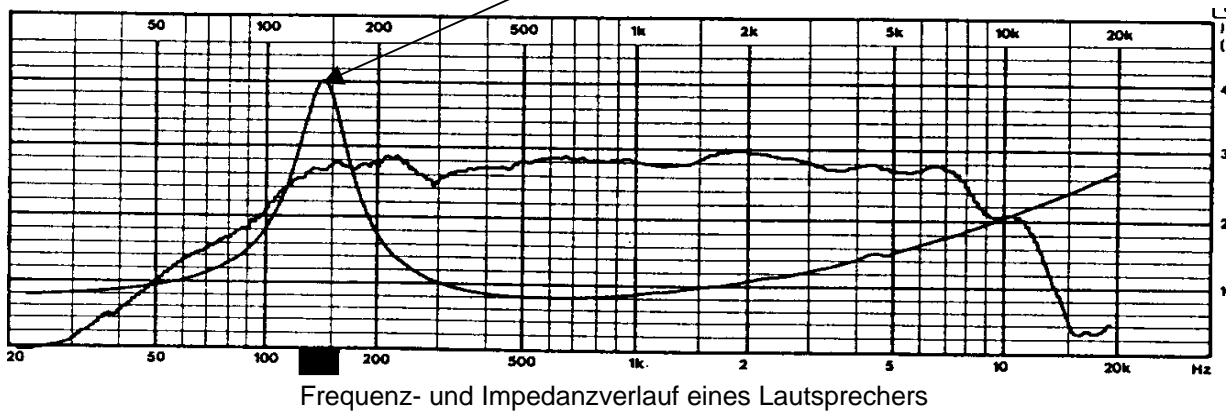
$$C_k = \frac{L_e \cdot 1000}{R_e^2} \quad [\mu F]$$

$L_e$  ist die Eigeninduktivität der Schwingspule unseres Töners.

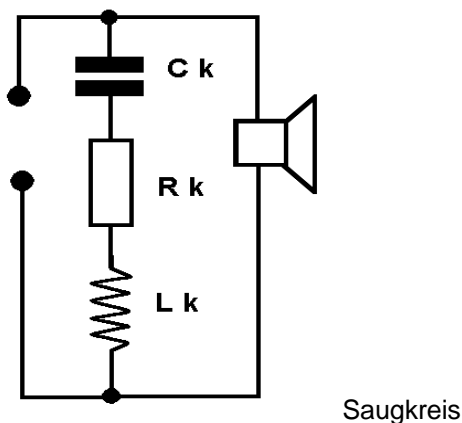
$R_e$  der elektrische Widerstand

Man sollte die Gesamtimpedanz des Lautsprechers mit R-C-Glied aber immer nachmessen!

Dynamische Lautsprecher ohne zusätzliche mechanische Dämpfung (durch beispielsweise Ferrofluid) haben bei ihrer Resonanzfrequenz einen mehr oder weniger steilen Impedanzbuckel. In diesem Bereich sind sie wegen ihrer sich in Resonanz befindlichen bewegten Teile mechanisch besonders empfindlich.



Eine Linearisierung dieses Bereichs geschieht durch ein dem Lautsprecher parallel geschaltetes R-C-L-Glied (Saugkreis):



Berechnung mit Hilfe der Thiele-Small-Parameter des Woofers:

$$R_k = \frac{Q_{es} \cdot R_e}{Q_{ms}} \quad [\text{Ohm}]$$

$$C_k = \frac{1\,000\,000}{R_e \cdot Q_{es} \cdot F_c \cdot 2 \cdot \pi} \quad [\mu\text{F}]$$

$$L_k = \frac{Q_{es} \cdot R_e \cdot 1000}{2 \cdot F_c} \quad [\text{mH}]$$

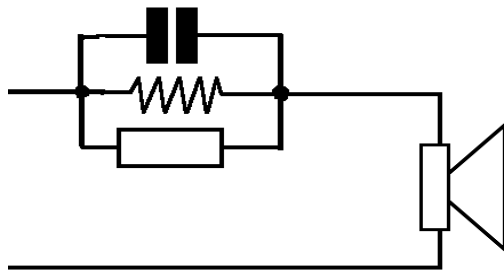
Auch hier empfiehlt sich unbedingt die abschließende Kontrolle durch eine Messung des Impedanzgangs!

Diese Maßnahme empfiehlt sich bei Hoch- und Mitteltönern, wenn sie über flache Filter erster Ordnung mit Eckfrequenzen unterhalb 3 x der Resonanzfrequenz (eingebaut) des Töners betrieben werden.

Da man nun über den gesamten Wirkungsbereich des Lautsprechers über eine konstante Impedanz verfügt, stimmen auch die berechneten Frequenzweichenbauteile, in deren Formeln die Impedanz bei der anvisierten Übergangsfrequenz eine wichtige Rolle spielt. Das L-C-R-Glied erhöht auch die Belastbarkeit

des Töners, da im kritischen Bereich ein Teil der elektrischen Energie am Lautsprecher vorbei geleitet wird. Allerdings wird auch die Dämpfung beeinflusst. Ein Saugkreis auf die Resonanz eines Tieftöners verbessert dessen Einschwingverhalten durch eine bessere Gesamtdämpfung (kleinere Q-Werte), vorausgesetzt, die benutzten Bauteile halten die hier fließenden Ströme ohne Beeinträchtigung aus. Ein so bedämpfter Baß klingt trockener, aber auch schlanker und oft "lebloser". Aber es ist eine mögliche Methode, zu "boomigen" Baß (wegen zu kleiner Gehäuse und/oder zu geringer mechanischer Bedämpfung mit Dämmstoff) nachträglich zu entschlacken. Vorzuziehen ist aber immer eine korrekte Gehäuseauslegung - ich möchte die L-C-R-Lösung nur als Reparaturmaßnahme bezeichnen. Manche Röhrenverstärker (SE, OTL) verlangen einen linearen Impedanzverlauf des angeschlossenen Lautsprechers. Dann sollte man die hier beschriebenen Maßnahmen anwenden.

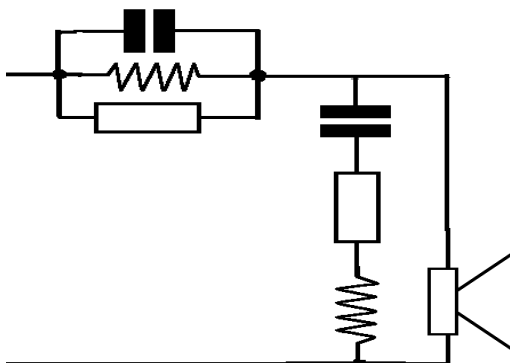
Nicht unerwähnt lassen möchte ich den ähnlich zu berechnenden Sperrkreis, der aus zueinander parallelen R-C-L in Reihe zum Lautsprecher besteht:



Sperrkreis

Damit versperrt man einem bestimmten Frequenzband das Weiterkommen. Man erzeugt eine Impedanzspitze und eine Frequenzsenke. Man setzt dieses Glied bei schmalbandiger Auslegung ein zum frequenzlinearisieren von (Membran-)Resonanzspitzen. Breitbandig und flach abgestimmt kann man es auch als Phasenschieber verwenden, da es, wie jedes Filterglied, in seinem Wirkungsbereich die Signallaufzeit beeinflusst. Ohne Meßgerät sollte man aber die Finger davon lassen, sonst erzielt man mehr Schaden als Nutzen.

Eine Sonderform ist die Kombination von Saug- und Sperrkreis:



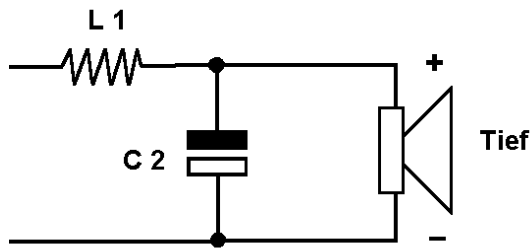
Saug- und Sperrkreis

Bei geschickter Auslegung mit Hilfe des Meßgeräts kann man damit Frequenzüberhöhungen impedanzneutral herausfiltern. Im günstigsten Fall erzeugt man nur geringe Phasenfehler. Nur für fortgeschrittene Anwender mit dem nötigen Meßequipment zu empfehlen!

## Filter zweiter Ordnung:

Zurück zu einfachen Parallelgliedern: man kann deren Vorteile auch anders nutzen, ohne unbedingt Nachteile in Kauf nehmen zu müssen. Man muß nur C und L richtig kombinieren. Will man ein C parallel zum Lautsprecher betreiben, ohne seine Wirkung durch Hinzufügen eines R zu verändern, muß man ein L

in Reihe vor den Komplex Lautsprecher/Kondensator schalten. Das L verhindert den Weitertransport hoher Frequenzen zum Lautsprecher und zum C. Daher gibt's dort dann auch keinen Kurzschluß mehr.



TP 2.Ordnung

Da nun aber sowohl das L in Reihe mit 6 dB/Okt als auch das parallele C mit 6 dB/Okt die Höhen vom Lautsprecher weghalten, bringt dieses Filter eine resultierende Flankensteilheit von 12 dB/Okt. Das richtige Verhältnis von L und C zueinander und zur Lautsprecherimpedanz vorausgesetzt. Die Berechnung erfolgt gemäß der Formel:

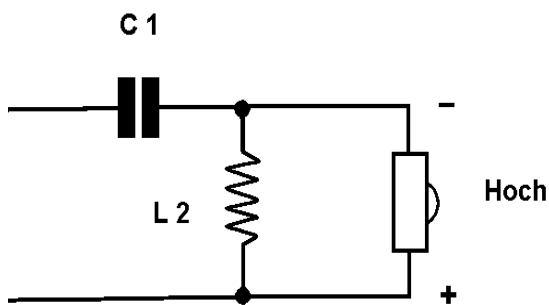
Berechnung TP 2.Ordnung:

$$L1 = \frac{Z \cdot 1414}{F_{tr} \cdot 2 \cdot \pi} \quad [\text{mH}]$$

nicht vergessen:  
 Z = Lautsprecherimpedanz (Ohm)  
 $\pi = 3,14$   
 Ftr = Trennfrequenz

$$C2 = \frac{707107}{2 \cdot \pi \cdot F_{tr} \cdot Z} \quad [\mu\text{F}]$$

Gleiches , nur halt als HP-Filter 2. Ordnung gilt für:



HP 2. Ord.

Berechnung HP 2. Ordnung:

$$C1 = \frac{353553}{F_{tr} \cdot Z \cdot \pi} \quad [\mu\text{F}]$$

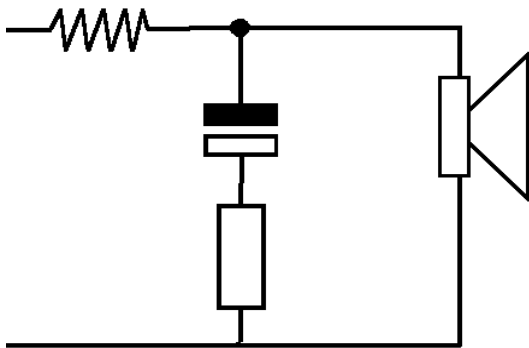
$$L2 = \frac{707 \cdot Z}{F_{tr} \cdot \pi} \quad [\text{mH}]$$

Verstimmt man nun L und C gegeneinander, kann man die Filterwirkung im Bereich der Trennfrequenz beeinflussen. Idealerweise sind beide Bauteile auf dieselbe Frequenz auszulegen. Das ergibt mit oben

gezeigten Formeln Filterkennungen nach Butterworth. Die besitzen eine Dämpfung, die im allgemeinen als universell passend angesehen wird und sind daher stark verbreitet. Setzt man aber für die Trennfrequenz bei der TP-Berechnung des L tiefere Werte in die Formel ein (oder höhere für's C), so wird der Filterverlauf im Übergangsbereich flacher. Dies ist der Fall bei Filtern nach Bessel. Vorteil: geringere Phasenfehler, besseres Einschwingverhalten dank höherer Dämpfung (kleineres Q), Nachteil: breitere Überlappung der Filter beider kombinierter Töner.

Das geht auch umgekehrt, also kleineres L und größeres C: dann erlaubt man einem gewissen Frequenzband gerade noch so, gewissermaßen im Fast-Kurzschluß, am Lautsprecher vorbeizuhuschen. Das ergibt einen steileren Filterverlauf a la Chebichev. Allerdings produziert man so dann partielle Impedanzsenken, die schwachbrüstigen Verstärkern Probleme bereiten können. Auch leiden Impuls- und Phasenverhalten. Nicht ganz problemlos in der Anwendung also, aber man kann hiermit problematische Membranresonanzen mancher Mitteltöner oft ganz gut kaschieren.

Hat man gutmütige Lautsprecherchassis ohne krasse Frequenzgangfehler, kann man günstiges "Bessel"-Verhalten mittels eines Tricks über einen recht weiten Frequenzbereich hin nutzen, den ich "verstimmtes R-C-Glied" nenne:



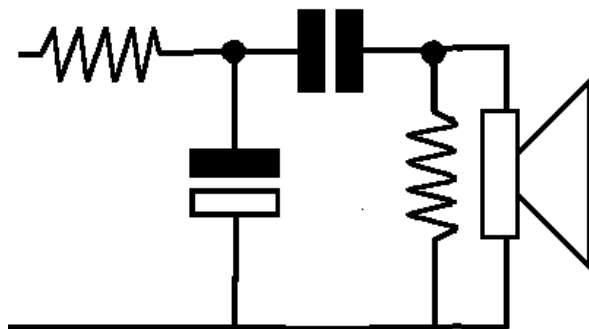
TP 1. Ord. mit R-C

Im Gegensatz zum echten RC-Glied, das die Aufgabe hat den Impedanzanstieg des Lautsprechers zu kompensieren, soll mit dieser Maßnahme der Frequenzgang eines Tiefmitteltöners in einem breiten Bereich gezielt verändert werden, die Vorteile des Filters erster Ordnung (Phase, Impuls) mit den Vorteilen des steileren Filters 2ter Ordnung kombinierend. Man kann auf die Art den "Stimm"-Bereich eines eher zu schlank klingenden Tiefmitteltöners auffüllen und trotzdem Membranresonanzen in dessen oberem Wirkungsbereich noch unterdrücken. Gegenüber dem richtigen R-C-Glied erhält hier nun das R kleinere und das C größere Werte. Berechnen nützt hier recht wenig, probieren und messen heißt die Devise. Man muß aber beachten, daß die Impedanz nicht zu tief absinkt.

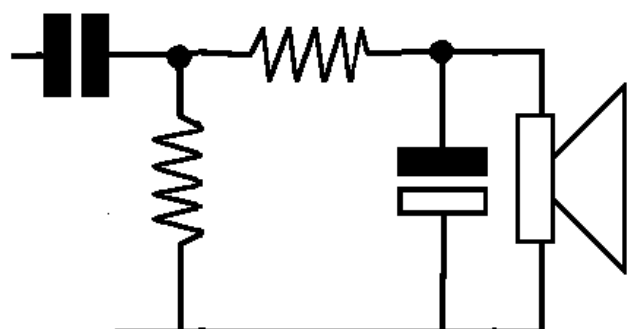
Wie wir nun wissen, erzielt man durch Kombination von HP und TP einen Bandpaß. Bei Filtern 2ter Ordnung geht das auf verschiedene Weisen, von denen ich eine (b) klar bevorzuge:

a) Hintereinanderschaltung:

oder:



TP vor HP

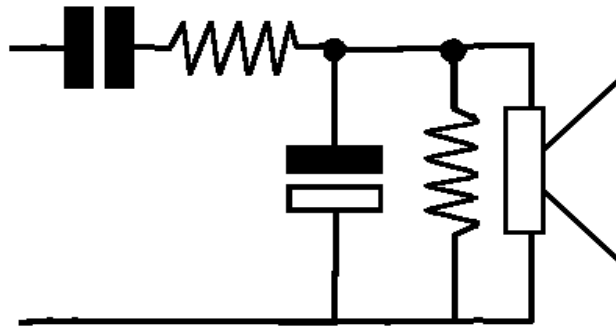


HP vor TP

Beides ist nicht ideal. Diese Anordnung sollte man nur beim "Staggern", also beim hintereinander montieren von räumlich getrennten Frequenzweichenbaugruppen verwenden. Dann halte ich die rechts gezeigte Lösung für besser (HP vor TP).



b) Längs-längs - quer-quer:



BP 2. Ordnung

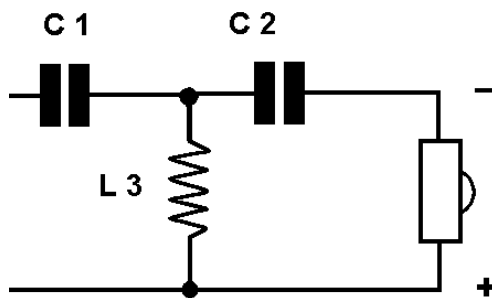
Die Berechnung der Bauteile erfolgt gemäß der oben schon gezeigten Formeln für HP- und TP-Filter 2ter Ordnung.

Nie sollte man den errechneten Werten blind, also ohne Nachmessung des echten Frequenzgangs, glauben. Reale Lautsprecher führen meist ein Eigenleben, das zu anderen als idealen Frequenzgängen führt. Und schon stimmt das sorgsam errechnete Filter nicht mehr. Es gibt heutzutage allerdings Computerprogramme, die die Filterwerte in Relation zu zuvor gemessenen realen Frequenzgängen des konkreten Lautsprechers berechnen und dem tatsächlichen Ergebnis so schon in der Computersimulation recht nahe kommen. Nur konnte mir bis heute noch keiner erklären, warum solchermaßen errechnete Lautsprecherkombis irgendwie steril klingen. Folglich vergessen Sie nie das abschließende Feintuning per Ohr!

## Filter höherer Ordnung:

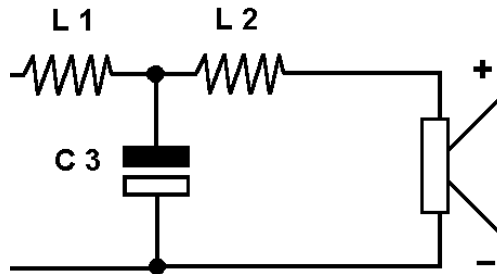
Für manche Anwendungen, z.B. Hochtöner, empfehlen sich manchmal steilerflankige Filter. Damit kann man im HP einen Töner zu tieferen Frequenzen hin noch nutzen, ohne ihn durch Betreiben in der Nähe seiner Resonanz mechanisch zu überlasten. Da kleinere Töner ein günstigeres Antriebs/Masse-Verhältnis besitzen, kommt dies der Feindynamik in der Musikwiedergabe zugute. Kostet aber Bauteile und damit Geld. Tiefpässe höherer Ordnung machen Sinn bei Tief- oder Mitteltönern, die zu Membranresonanzen neigen, die meist am oberen Ende der Übertragungsskala des betreffenden Töners liegen und durch die steilere Beschaltung besser weggefiltert werden können. Falls dann aber die Weiche teurer wird als der Töner, hat man wohl am falschen Ende gespart!

Hochpaß 3ter Ordnung (18 dB/Okt.):



HP 3. Ordnung

Tiefpaß 3ter Ordnung (18 dB/Okt.):



TP 3. Ordnung

Berechnung:

HP:

$$C1 = \frac{333\ 333}{Z \cdot F_{tr} \cdot \pi} \quad [\mu F]$$

$$C2 = 3 \cdot C1 \quad [\mu F]$$

$$L3 = \frac{375 \cdot Z}{F_{tr} \cdot \pi} \quad [mH]$$

TP:

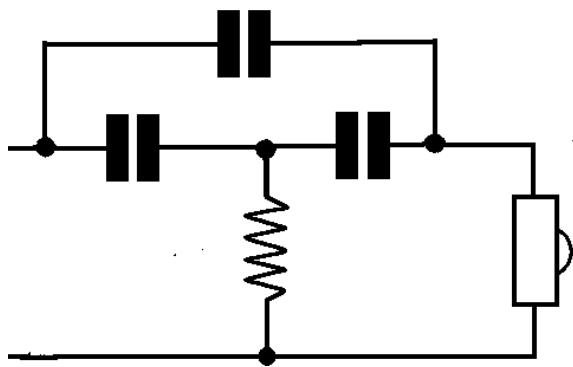
$$L1 = \frac{750 \cdot Z}{F_{tr} \cdot \pi} \quad [mH]$$

$$L2 = \frac{L1}{3} \quad [mH]$$

$$C3 = \frac{666\ 666}{Z \cdot F_{tr} \cdot \pi} \quad [\mu F]$$

Bandpässe dritter Ordnung werden komplett hintereinander angeordnet, HP vor TP.

Auch für einen HP 3ter Ord. gibt's eine Trickschaltung, die nicht ganz unproblematisch ist, da sie zu unschönen Resonanzschwingungen führen kann. Allerdings kann man Hochtöner auf diese Art noch steiler und fülliger beschalten. Ich nenne diese Schaltung "18 dB-Turbo":



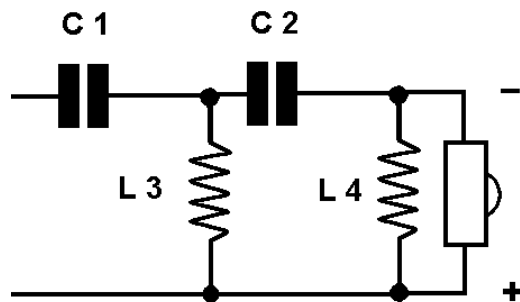
HP: "18 dB - Turbo"

Sinngemäß geht das auch beim TP; dann endet's aber wirklich in einer Materialschlacht!

Der zusätzliche Kondensator sollte aber deutlich kleiner sein als C1. Auch hier gilt: Finger weg ohne Meßgerät!

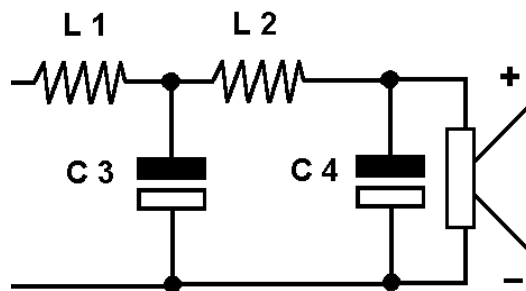
Bitte glauben Sie mir eines: Alle passiven Schaltungen, die den Pegel eines Töners lauter machen (Turbo) als derselbe Frequenzbereich "nackt" (ohne Filter) gemessen war, machen dies aufgrund von erzeugten elektrischen Resonanzen. Das erhöht den Klirrgrad und verschlechtert den Klang.

Hochpaß 4ter Ordnung (24 dB/Okt.):



HP 4. Ordnung

Tiefpaß 4ter Ordnung (24 dB/Okt):



TP 4. Ordnung

Berechnung:

HP:

$$C1 = \frac{327\,011}{Z \cdot F_{tr} \cdot \pi} \quad [\mu F]$$

$$C2 = \frac{462\,000}{Z \cdot F_{tr} \cdot \pi} \quad [\mu F]$$

$$L3 = \frac{316 \cdot Z}{F_{tr} \cdot \pi} \quad [mH]$$

$$L4 = \frac{1307 \cdot Z}{F_{tr} \cdot \pi} \quad [mH]$$

TP:

$$L1 = \frac{765 \cdot Z}{F_{tr} \cdot \pi} \quad [mH]$$

$$L2 = \frac{541 \cdot Z}{F_{tr} \cdot \pi} \quad [mH]$$

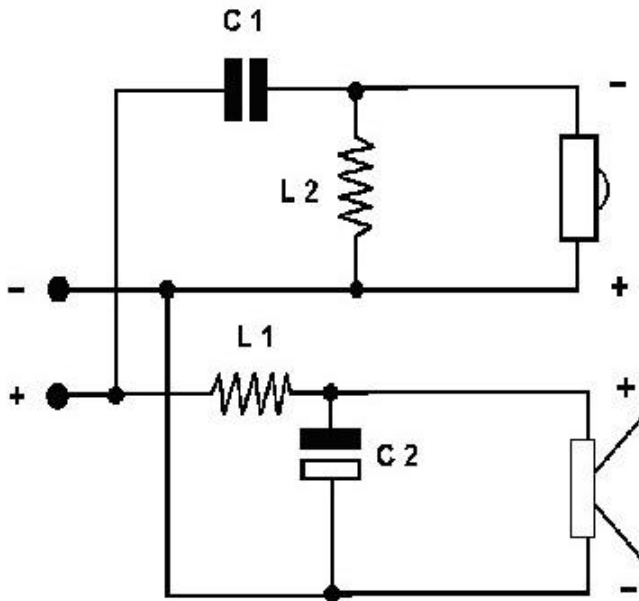
$$C3 = \frac{790\,014}{Z \cdot F_{tr} \cdot \pi} \quad [\mu F]$$

$$C4 = \frac{191512}{Z \cdot F_{tr} \cdot \pi} \quad [\mu F]$$

Auch hier gilt für den Bandpaß: HP vor TP. Auch die gezeigte Turbo-Variante ist baubar. Aber außer dem Verkäufer für Frequenzweichenbauteile freut sich sonst keiner über solche Filter.

## Kombination von Filtern zu Komplettweichen:

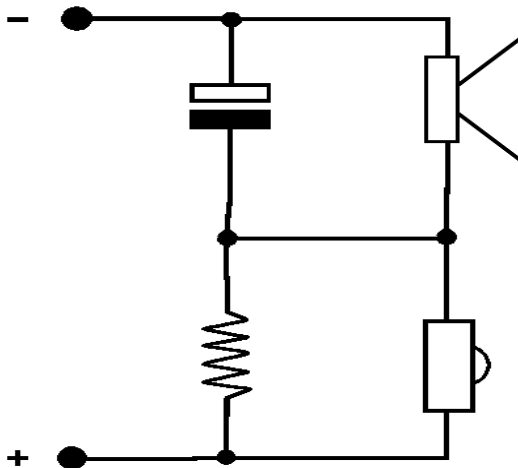
Bei der Kombination von Hoch- und Tiefpässen muß man nicht immer Filter gleicher Ordnung zusammenschalten. Bei guten 2-Wege-Weichen ist aber die Kombination eines Tiefpasses und eines Hochpasses jeweils zweiter Ordnung recht verbreitet. Das sieht so aus:



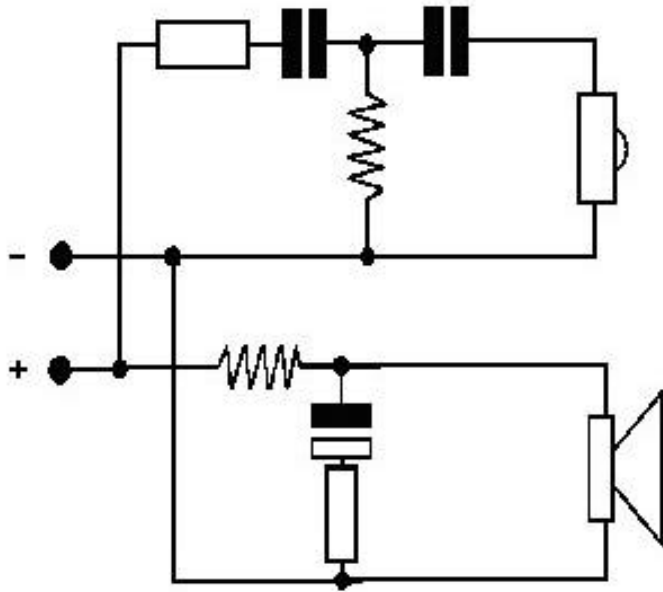
2-Weg-Weiche 2./2. Ordnung

Nach allgemeiner Lehrbuchmeinung sollte dabei der Hochtöner verpolt angeschlossen werden. Bei den „unnormalen“ Einbaubedingungen z. B. im Auto kann das aber genauso gut auch anders sein. Probieren geht über studieren. Was richtig ist, erkläre ich weiter unten.

Es gibt hierzu eine Trickschaltung, mit der sich Bauteile einsparen lassen, die aber nur dann funktioniert, wenn nach Berechnung und Versuchen  $L1 = L2$  und  $C1 = C2$  sein sollen, man nennt dies „Serienweiche“:



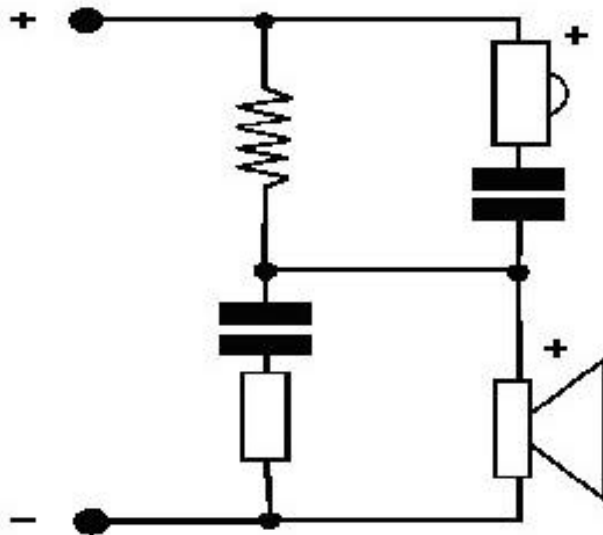
Für höher belastbare Systeme sind aber Hochpässe 3. Ordnung geeigneter, besonders dann, wenn man den Hochtöner nicht mittels Widerständen im Pegel reduzieren muß. Auch passen im Auto oft Tiefpässe 1. Ordnung mit verstimmtem R-C-Glied, weil man so eine Kompensation mancher Frequenzgangfehler durch ungünstige Montage der Lautsprecher ausgleichen kann. Das sieht dann so aus:



2-Weg-Weiche 1./3. Ordn. mit R-C-Korrektur und HT-Vorwiderstand

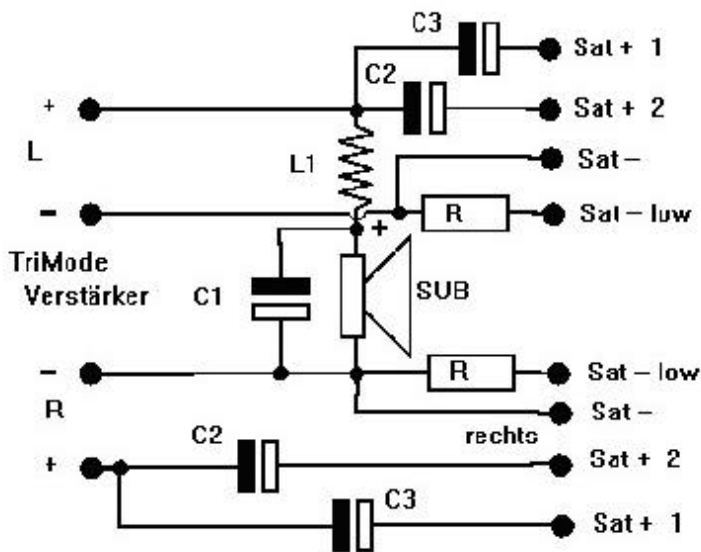
So ähnlich sieht die Schaltung im CAP 17.2 aus, die von der AutoHifi imTest Herbst 2002 besonders gelobt wurde. Allerdings sind da noch 6 Anpassungen drin.

Auch hierfür gibt's eine Trickschaltung, die manchmal funktionieren kann:



Achtung bei vermeindlich genialen Trickschaltungen: Sie funktionieren oft nur mit genau dafür passend optimierten Lautsprechern und sind obendrein oft noch patentiert. Also nun für den privaten Anwender!

Eine Besonderheit der Weichenkombination stellen die sogenannten „**Tri-Mode**“, „**MoSt**“ oder „**Mixed Mono**“ genannten Schaltungen dar. Die erlauben mit geeigneten Stereo-Verstärkern den gleichzeitigen Betrieb zweier Satellitenlautsprecher und eines Subwoofers. Nur im CarHifi vorzufinden. Das folgende Beispiel verwendet einen TP 2. Ordn. und ein Paar HP 1. Ord. mit Lautstärkeanpassung und Anpassung der Übernahmefrequenz. Es geht auch noch komplizierter:



Diese Schaltung erlaubt 3 verschiedene Hochpaßfrequenzen und 2 Lautstärkevarianten für die Satelliten, z.B. unterschiedlich für vordere und hintere.

Mit L1 ca. 5,6 bis 8,2 und C1 ca 220 und 330  $\mu\text{F}$  für einen 4-Ohm Subwoofer und Werten von 220 $\mu\text{F}$  für C2, 100 - 150 $\mu\text{F}$  für C3 und 1,5 bis 2,7 Ohm für R kommt man für's erste schonmal hin. C3 paßt dann für Satelliten mit 10 oder 13 cm Durchmesser, C2 für 17er oder tieflaufende 13er, C2 und C3 zusammen für sehr langhubige 17er oder 20er Tiefmitteltöner im Satellitensystem. Will man beispielsweise ein CAP 165.2 vorn und ein CAP 100 für hinten ansteuern, so schließt man das 165.2 an C2 und Sat-(-) und das 100 an C3 und Sat-(- low) an. Schon klingt die Komplettanlage homogen. Und das mit nur einem einzigen Stereoverstärker, der aber besonders stromstabil sein sollte.

Grundsätzlich gilt: Investieren Sie lieber in gut(mütig)e Lautsprecherchassis und halten Sie die Frequenzweiche so simpel wie möglich. Denn jedes Filterbauteil verursacht Fehler. Und die perfekte Kompensation von Fehlern unterschiedlicher Vorzeichen ist in der Praxis kaum möglich. Allerdings kann man versuchen, solche Bauteilefehler durch die richtige Auswahl der Bauteilequalität klein zu halten:

## Kondensatoren:

Bei Passivweichen verwendet man zwei grundsätzlich verschiedene Bauformen: Elektrolyt-Kondensatoren (Elkos) und Folienkondensatoren.

### Elkos:

Für unsere Zwecke geeignet sind die ungepolten Tonfrequenzelkos, zu erkennen daran, daß keine Polaritätskennzeichnung aufgedruckt ist (+ oder - Zeichen). Es gibt Ausführungen mit rauhen und mit glatten Anoden und mit verschiedenen Spannungsfestigkeiten, meist 23 oder 35 V, manchmal auch bis 50 V. Ist der Wert "100 V" aufgedruckt, bezieht der sich auf die reine Gleichspannung (DC) und ist 35 V AC gleichzusetzen. Die bei Elkos übliche Kapazitätstoleranz ist +/- 20%, manchmal auch +/- 10%. Geeignete LCR-Meßgeräte gibt's schon ab 200.- DM zu kaufen (Monacor). Ich empfehle, immer die Bauteile auszumessen. Man sollte an gleicher Position bei beiden Stereo-Kanälen immer im Werteband von besser als 5% bleiben. Meine Weichen messe ich auf Werte genauer als 2% ein.

Elkos haben die Eigenschaft, in heißer Umgebung im Laufe der Jahre auszutrocknen, sie verringern dann ihre Kapazitätswerte. Daher sollten sie nur an unkritischer Position verwendet werden. Außerdem sind Elkos in ihrer Signalverarbeitung vergleichsweise langsam. Sowohl der Ladungsaufbau wird verzögert als auch

die Ladungsabgabe. Genannt Hysterese. Daher geben sie noch einige Millisekunden lang Spannung ab, wenn an Ihrem Eingang schon gar kein Signal mehr anliegt. Gerade bei höheren Frequenzen führt das zu einer unpräzisen und verwaschenen Impulswiedergabe. Folglich sollte man im HP vor'm Hochtöner auf Elkos verzichten, es sei denn, man "bypass" sie mit kleinen Folien-C's. Dazu später mehr. Aber Elkos sind halt billig.

Der Klangunterschied zwischen Ausführungen mit rauher Anode (kompakt) und glatter Anode (größer) ist geringer als zwischen verschiedenen Fabrikaten. Gute Hersteller sorgen mit präziser Wickeltechnik und Endenkontaktierung für relativ geringe Eigeninduktivität und Innenwiderstand ("ESR"). Von den deutschen Herstellern habe ich mit Roederstein (ROE), Wego, Mundorf und Intertechnik (IT)-Elkos gute Erfahrungen gemacht. Von den vergleichsweise billigen Elkos gefallen mir Tesla am besten. Aber auch im fernen Osten (Sunder) und Amerika gibt's gute Typen. Und besonders auch in England. Generell besser als Elkos sind aber immer Folien-C's, wenn sie auch größer und teurer ausfallen.

**Ein Tip:** Lötet man die Parallel-C's eines Filters direkt auf das Anschlußterminal des betreffenden Töners, kann das C sehr viel besser seinen Aufgaben gerecht werden, als wenn es mit dem Umweg über ein langes Zuleitungskabel wirken muß, das selbst ein Reihen-L, ein Reihen-R und ein Parallel-C darstellt. Je näher die Bauteile am Lautsprecher, desto präziser können sie sein Ein- und Ausschwingverhalten kontrollieren!

### Folienkondensatoren:

Es gibt viele unterschiedliche Folientypen, die sich hauptsächlich in der Art des als Dielektrikum verwendeten Kunststoffes unterscheiden. MKT, MKC, MKP, Mylar, Styroflex, Glimmer und Sonderbauarten mit exotischen Materialien wie Zinkfolie, Teflon oder Danfor. Dies, die Bauform (axial/radial/Wickelart) und die Sorgfalt der Endenkontaktierung sorgen für Klangunterschiede, hier meist durch die Art des Ein- und Ausschwingverhaltens. C's mit höherer Spannungsfestigkeit haben bei gleichen Kapazitätswerten kleinere Verlustfaktoren, sie können Ladungswechsel schneller verarbeiten. Zusammen mit dem Schwingverhalten des angesteuerten Töners ergeben sich resultierende "Schnelligkeiten". Diese müssen in Lautsprecherkombinationen zueinander passen. So ist es in 2-Weg-Kombinationen bei Verwendung schneller Metallkalotten und vergleichsweise langsamer "free-air"-Tiefmitteltöner oft gar nicht so gut, den Hochton durch extrem schnelle C's besonders quick werden zu lassen, das kann dann oft schon unharmonisch klingen. Sehr gute eher langsame C's sind die MKT 1813 von Roederstein.

Styroflexe (Polystyrol) und Glimmer (Mica)-C's stammen aus der HF-(Hochfrequenz)technik und sind extrem schnell und verzerrungsarm. Es gibt sie aber nur in sehr kleinen Werten zu kaufen. Schon deshalb kann man sie nur als Bypass verwenden. MKP's, gerade solche mit hoher Spannungsfestigkeit von 250 V oder höher, sind meist recht schnell. Das kann eine tolle Hochtonauflösung bringen, aber auch zu spitzem Klang führen, wenn man sie mit Kalottenhochtönern kombiniert, die zu harschen Verzerrungen neigen, wie das bei manchen Metallkalotten der Fall ist. Aber auch Verarbeitungsmängel bei langsameren C's können solche Harschheiten verursachen.

Auch bei Folien-C's ist der Herstellereinfluß oft deutlicher als der des verwendeten Materials. Meines Erachtens empfehlenswert: ERO (Roederstein), SCR (Solen), Wima (nur der MKP 4 und MKS 4). Von den teuren Exoten sind neben Mundorf Supreme, Hovland und Wondercap die Multicaps von MIT die besten, besonders die teuersten mit Polystyren-Dielektrikum. Sie besitzen einen interessanten Innenaufbau: bis zu 10 einzelne Wickel sind coaxial angeordnet und einzeln parallelgeschaltet. Damit reduziert MIT die Eigeninduktivität beträchtlich und damit den Innenwiderstand, der sonst zu sehr hohen Frequenzen hin ansteigen würde. Da jeder Wickel intern einzeln per Handarbeit verlötet werden muß, kosten diese Multicaps einen Haufen Geld. Aber wir können etwas daraus lernen:

Wir wissen ja bereits: Induktivitäten verringern sich durch parallelschalten, Kapazitäten addieren sich.  $Z_{ges} = Z_1 \times Z_2 / Z_1 + Z_2$ . Folglich kann man einen Kapazitätswert von beispielsweise 4,7 µF mittels eines oder auch mehrerer Einzelkondensatoren aufbauen. Da die Anzahl der Wickel im C mit größer werdender Kapazität zunimmt, haben kleine Einzelwerte immer auch geringere Eigeninduktivitäten. Statt aber nun den 4,7er aus 10 Stück 0,47µF aufzubauen, kann man das auch anders machen:

Man "bypass" einen Basiskondensator mit einem besseren von ca. 8 - 18 % der Basiskapazität. Bei großen Gesamtwerten kann man das mit einem dritten von wiederum 8 - 18 % des ersten Bypass-C's nochmal machen. damit kompensiert man den Anstieg der Eigeninduktivität jedes Kondensators zu höheren



Frequenzen hin zu einer halbwegs linearen Konstanten. Das ist besser als eine extrem geringe aber über die Frequenz dann doch steigende Induktivität eines sehr guten einzelnen Kondensators.

Der 4,7  $\mu\text{F}$ -C müßte folglich aus den folgenden Einzelwerten (aus der Normreihe) als Paket parallelgeschalteter C's aufgebaut werden:  $3,9 + 0,68 + 0,1 + 0,015 = 4,7 \mu\text{F}$ .  
Der 0,015  $\mu\text{F} = 15 \text{ nF}$  sollte dann schon ein Styroflex sein.

Ein Tip für Multibastler: Das funktioniert auch im Großen: bei Netzteilen von Audiogeräten.

Bei Anwendung im HP unserer Passivweiche bringt das klanglich trotz großer Schnelligkeit und feiner Auflösung eine angenehme, nie lästige Klang"reinheit", falls der Hochtöner das überhaupt noch überbringen kann. Allerdings verschweigt solch eine puristische Hochtonauflösung keinerlei Fehler vorgeschalteter Komponenten, wie zischelnde Kabel, hartes Verstärkerclipping oder verzerrte Aufnahmen.

Vergessen Sie nie die Verhältnismäßigkeit: es bringt grundsätzlich mehr Nach- als Vorteile, Formel 1 High-Performance Rennreifen auf einen Trabbi zu schrauben - die Kiste wird schon in der ersten Kurve umkippen. Der Elch läßt grüßen....

## Drosselspulen

Auch hier gibt es Qualitätsunterschiede und auch teure Exoten.

Da Reihenspulen im Tiefpaß Verwendung finden, also auch vor Subwoofern, müssen sie meist hohe Stromstärken aushalten können ohne zu schmelzen oder zu sättigen.

Für die Erwärmung ist der Innenwiderstand (meßbar mit einem guten 4 1/2-stelligen Multimeter) maßgebend. Ein Spulendraht von 1,4 mm Durchmesser hat einen Querschnitt von 1,53 mm<sup>2</sup>. Wenn Sie mal darauf achten, was so an Lautsprecherkabeln verbaut wird, sehen Sie leicht, daß es sinnlos ist, 6 mm<sup>2</sup>-Kabel zum Subwoofer zu verlegen, wenn man in der Weiche einen Engpaß von 1,5 mm<sup>2</sup> legt. Oft sind die Kupferdrähte handelsüblicher Baßdrosseln noch viel dünner. Da ich Kabelquerschnitte von 1,5 mm<sup>2</sup> bei Kabellängen bis 2,5 m allerdings durchaus für dick genug erachte, sind Spulen mit 1,4er Drahtdurchmesser m. E. gerade richtig. Aber...:

Der Innenwiderstand der Reihendrossel vor'm Subwoofer addiert sich zum Innenwiderstand des Verstärkers, verringert also den wirksamen Dämpfungsfaktor am Lautsprecher, mit dem der Verstärker den Woofer kontrollieren soll. Dünne Spulendrähte schaden also nicht nur, indem sie sich erhitzen und so vielleicht durchbrennen, sondern auch, indem sie selbst den tollsten Verstärker abwürgen, nämlich dessen elektrische Dämpfungsfähigkeit reduzieren.

Als Faustregel für den maximalen Innenwiderstand einer Drosselspule zur Verwendung vor einem Woofer gilt ein Wert von 10 % der Lautsprecherimpedanz, bei 4 Ohm also 0,4 Ohm in der Spule. Sogleich wird einem die besondere Problematik von Subwoofersystemen mit 2 oder gar 1 Ohm Gesamtimpedanz klar.

Es gibt zwei Wege, den Innenwiderstand einer Spule niedrig zu halten: dicke Drähte und/oder induktivitätsverstärkende Ferrite oder Eisen. Spulen ohne magnetisierbaren Kern nennt man Luftspulen. Die haben keine magnetisch bedingte Maximalleistungsgrenze und lassen den Woofer am trockensten klingen. Da ihre Induktivität nur durch die Anzahl ihrer Windungen bestimmt wird, braucht man lange Wickel mit folglich hohem Gesamtwiderstand. Um diesen in für unsere Zwecke taugliche Ohm-Bereiche zu drücken, braucht's sehr dicke Drähte von 2 mm und mehr. Daher braucht man reichlich Kupfer. Das macht schwer und teuer.

Billiger geht's mit Kernspulen. Dieser Kern ist magnetisierbar und steigert die elektrische Effizienz der Spule. Dadurch erhöht sich die Induktivität. Folglich braucht man für große Induktivitäten weniger Windungen und spart Drahtlänge. Das wiederum reduziert den Innenwiderstand. Je nach Kerntyp sogar drastisch. Folglich kann man dünneren Draht verwenden und erhält trotzdem noch realistische Widerstandswerte. Das spart Bauraum, Kupfer und letztlich Geld. Da Ei des Kolumbus sind Kernspulen trotzdem nicht.

Der Pferdefuß heißt Sättigung und daraus resultierende Verzerrung. Sättigung bedeutet, daß oberhalb bestimmter Stromstärken der Kern nicht mehr in der Lage ist, höher magnetisiert zu werden und damit seine Fähigkeit einbüßt, seine induktivitätsverstärkende Wirkung auszuüben. In diesen (dynamisch kurzen)

Momenten zu hoher Ströme verringert sich die Induktivität der Spule (kurzzeitig) und die ganze kunstvolle Weichenabstimmung ist im Eimer. Die TP-Frequenz schiebt sich dann nach oben und die Charakteristik geht in Richtung Chebichef mit reichlich Unterdämpfung und Überschwingen – sprich: Verzerrungen.

Die Kernmaterialien reagieren unterschiedlich auf Überströme. Ferrite haben einen sehr schmalen Grenzbereich. Sie gehen bei steigendem Strom recht plötzlich in die Sättigung. Eisenmaterialien haben einen gutmütigeren (breiten) Grenzbereich, sowohl als Eisenpulver-Sinterkern als auch als Schichtkern aus (Trafo)blechen. Als Auslegungsgrenze für Kernspulen gelten allgemein 1 bis 5 % Verzerrungen. Ferrite zeigen recht niedrige Grundverzerrungen, besonders Stab- und Pilzkern, gehen dann ab ihrer Grenze aber schlagartig auf hohe Werte. Hören kann man das manchmal bei hohen Pegeln als ein Geräusch, das ähnlich "knackt", wie ein anschlagender Schwingspulenträger des Woofers. Eisenmaterial zeigt etwas höhere Grundverzerrungen, geht aber sanft in die Begrenzung. Daher hört man die Leistungsgrenze nicht deutlich. Viele Leute, die eher recht laut hören wollen, ziehen dieses Kernmaterial daher vor. Die hohen Grundverzerrungen sind aber hörbar in einem tendenziell eher weichen Klang ähnlich einer Gehäuseabstimmung des Woofers auf höhere Q-Werte.

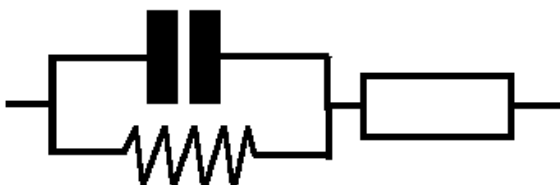
Es besteht folglich die Möglichkeit, den Gesamtklang des Systems Lautsprecher/Tiefpaßfilter gezielt geschmacklich abzustimmen. Mittels: - Gehäuseabstimmung, -Dämmstoff, -Verstärker-Dämpfungsfaktor, -Drosselwiderstand, -Weichen-Charakteristik, -Kernmaterial und Typ des Parallelkondensators.

Nach meiner Erfahrung empfehlenswerte Ferrite für den Subwooferbereich sind die 56er Rollenkerne, wie der Ferrobar von IT oder der GR 56 von BLM. Bei nicht allzu hoher Verstärkerleistung (unter 150 W) auch der HQ 56. Ganz neu ist auch ein 70er Glockenkern aus HQ-Material, der vielversprechende Meßwerte zeigt. Große Trafokerne und die dickdrahtigen Modelle mit Sintereisen-Stiftkern (Corobar) funktionieren auch sehr gut. Vonm mit Ringkern arbeitenden Torobar bin ich weniger überzeugt. Aber vor Subwoofern sollten Drahtdurchmesser unter 1,3 mm tunlichst vermieden werden. Für kompromißlos eingestellte Freaks gibt's allerdings keine Alternative zu sehr großen Luftspulen. Der K 150 von BLM ist hier das Maß der Dinge.

Vor Tiefmitteltönern, also bei Induktivitäten unter 1,5 mH, kann man schon mit recht kompakten Spulen arbeiten. Die fließenden Ströme sind geringer, die Induktivitäten kleiner und dadurch die Sättigungsgrenze sehr hoch. Neben allen Typen von Luftspulen, auch traumhaft auflösende Exoten mit Litze (SCR, IT) oder Flachdrahtfolie (CFAC, Mundorf) kann ich hier die Pilzkern und Rollenkerne aus HQ-Ferrit und auch den EK 40, einen Eisenpulver-Glockenkern von BLM, wärmstens empfehlen. Für reine Mitteltonanwendungen sind Luftspulen vorzuziehen, die bei den dann erforderlichen kleinen Induktivitätswerten ausreichend klein bauen.

Parallel zu Mitteltönern und Tweepetern reichen meist kompakte Spulentypen aus. Kernspulen im Parallelzweig sorgen, ähnlich wie Elkos, für einen eher weichen Klang durch ihre Hysterese im Ladungsauf- und -abbau. Aber auch Luftspulen sind nicht ganz frei von Dreckeffekten:

Da Spulen alle aus eng aufeinander gewickelten (Lack-)Drahtspiralen bestehen, entstehen durch die enge Nachbarschaft Kapazitäten entlang des Drahts. Das elektrische Ersatzschaltbild einer Spule sieht im Prinzip genauso aus wie das eines Kondensators:



Kapazität, Induktivität und Widerstand.

Nur, daß nun nicht die Kapazität, sondern die Induktivität überwiegt. Da also ein (ganz kleiner) Kondensator quasi als Bypaß über der Spule liegt, fließen auch hinter einem Tiefpaß noch (ganz kleine) Ströme höherer Frequenzen quasi ungefiltert weiter. Nun weiß jeder seit dem Physik-Unterricht, daß die Kapazität zweier benachbarter Drähte mit zunehmendem Abstand voneinander abnimmt. Schlecht (hand-)gewickelte Spulen haben also einen geringeren C-Anteil als perfekte Maschinenerzeugnisse. Noch besser reduzieren kann man Kapazitäten, indem man sie zueinander in Reihe schaltet. Während aufgereichte L's sich addieren, verringert sich die Gesamtkapazität durch Reihung so:

$$C_{\text{ges}} = \frac{C1 \cdot C2}{C1 + C2}$$

Folglich macht es durchaus Sinn, große Induktivitäten aus zwei reihengeschalteten Einzelspulen aufzubauen. Statt einer K 150-Luftspule von 5,6 mH kann man dann auch zwei 56er Ferrobarspulen a 2,8 mH verwenden. Da die Sättigungsgrenze mit kleineren Induktivitäten sich zu größeren Strömen hin verschiebt, hat man hierdurch eine der Luftspule nahekommende Verzerrungsfreiheit erreicht und trotzdem Geld und Platz gespart. Und außerdem noch die Parasitärkapazität verringert.

Und nochwas passiert durch lockere Spulenwickel: Schließen Sie mal statt des Mitteltöners einen 8 Ohm Hochlastwiderstand an und spielen Sie Musik. Mit dem Ohr dicht an der Filterspule hören Sie diese. Vielleicht nicht gerade in bester Klangqualität. Aber durch die um die Drahtwickel pulsierenden Magnetfelder bewegen sich die Drähte zueinander. Was nicht nur den Ton erzeugt, sondern rückwärts auch wieder Spannungen in die Wickel induziert (Generatorprinzip). Und die Spule diese Störspannungen weiter transportiert zum Lautsprecher. Dieser gibt dann, doof wie er ist, die Musik und die Störungen wieder. Da diese dem Musiksignal ähnlich sind, aber zeitlich leicht phasenverschoben, äußert sich das in unpräziser, verwaschener Wiedergabe mit instabiler räumlicher Abbildung. Perfekte Abhilfe: vakuumgetränkte Spulen. Billigere Abhilfe: mit Klarlack tränken.

Bei der Montage Ihrer Weiche sollten Sie unbedingt beachten, daß die Spulen dem Autoblech oder anderen magnetisierbaren Metallen (auch Magneten!) nicht näher kommen als ca. 6 cm. Sonst sind störende Wechselwirkungen garantiert. Wenn Sie Spulen festschrauben, nehmen Sie Messing- Alu- oder Kunststoffschrauben. Beim Verkleben von Drosselspulen auf der Platine oder dem Montagebrett mit Silikonkautschuk (Heißkleber platzt bei niedrigen Temperaturen) sparen Sie nicht mit Klebstoff. Bei den ständigen Vibrationen im Auto neigen besonders die schweren Spulen dazu, sich loszuschütteln. Lassen Sie genügend Abstand zwischen benachbarten Spulen. Besonders streufeldarm sind Glockenkernspulen. Die dürfen sich schon mal 1 - 2 cm auf den Pelz rücken. Andere, besonders Luft- und generell alle magnetfeldintensiven Baßspulen sollten schon 6 bis 10 cm Abstand zum Nachbarn wahren, besonders, wenn dieser sich im Paß zu einem anderen Töner befindet. Sollten sich engere Montagen nicht vermeiden lassen, dann ordnen Sie die Spulen im Winkel von 90° zueinander an.

## Widerstände

In passiven Frequenzweichen verwendet man wegen der hohen fließenden Leistungen Hochlastwiderstände. Die gibt's in Belastbarkeitswerten von 4, 5, 10, 17 und 20 Watt zu kaufen. Sie bestehen aus aufgewickeltem Widerstandsdraht um einen Keramikkörper und sind mit Keramik oder Lack nach außen isoliert. Seit einigen Jahren gibt's auch 4 Watt Metalloxydwiderstände (MOX). Die besitzen eine deutlich geringere Eigeninduktivität und sind bei Anwendung vor'm Hochtöner vorzuziehen. Es gibt auch eine Wickelmethode (bifilar), die die Eigeninduktivität kompensiert. Ich kenne aber keinen Anbieter solcher R's für unsere Zwecke. Recht neu, irre gut und sauteuer sind PHB-Widerstände, mit Manganin als Widerstandsfolie. Die sind vollkommen induktionsfrei und brauchen einen Kühlkörper. Siehe Conrad-Katalog.

Falls man die im Widerstand fließenden Ströme nicht kalkulieren kann ( $U = R \times I$ ,  $P = U \times I$ ), dann fährt man gut, sich an die folgende Empfehlung zu halten: beim Hochtöner 4 - 5 Watt, beim Mitteltöner 5 - 20 Watt, beim Tieftöner 17 - 20 Watt. Mitteltöner, die tief (ab ca 200 - 300 Hz) eingesetzt werden, sollten eher die größeren Werte spendiert bekommen. Die Belastbarkeit verdoppelt sich durch Parallelschaltung gleicher Werte, die Induktivität und der Widerstand reduzieren sich nach der bekannten Formel:

$$R_{\text{ges}} = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2}$$

Ich möchte hier noch einen kleinen, aber wirkungsvollen **Trick** verraten, der durch Reihenwiderstand "ermatteten" Klang wieder auffrischt: bypassen Sie den R durch ein sehr kleines C. Einen 5-Watt-Widerstand vor'm Hochtöner beispielsweise durch einen 4,7 bis 10 nF Styroflex. Probieren Sie's ruhig mal aus!

## Vorgehensweise bei der Weichenabstimmung

Nachdem Sie nun die Berechnungsformeln kennen, über die Klangeigenschaften von Filtern und Bauteilen und weitere Tricks Bescheid wissen, möchte ich Ihnen meine Methode erläutern, wie ich an die Abstimmung von passiven Weichen herangehe. Das mag sicherlich auch anders gehen - aber so hat sich's bei mir bewährt.

Ich gehöre noch zu den Methusalams, die hierbei ohne Computersimulation arbeiten, gebe aber zu, daß sich geübte "Hacker" mit Hilfe des PCs manche Messung ersparen können. Ob sie dabei allerdings noch soviel lernen können und ein Gespür für die Weiche kriegen, das sei einmal dahingestellt.

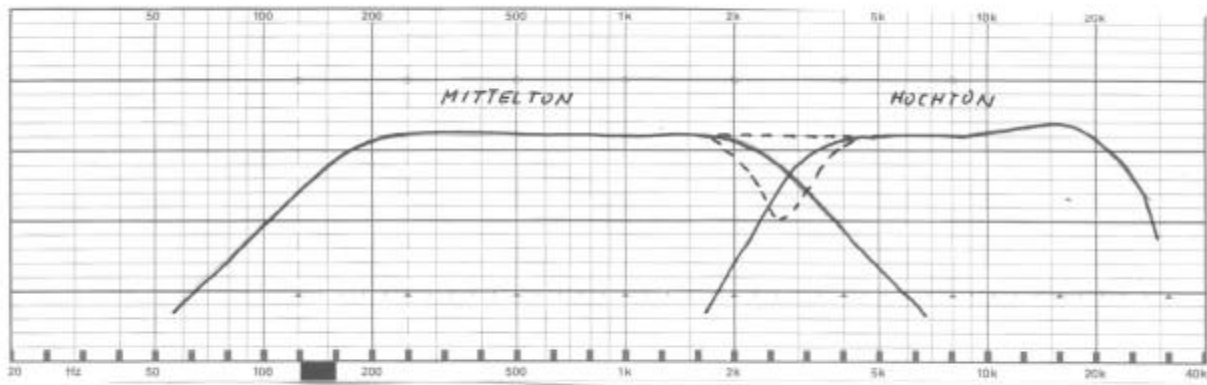
Benötigte Hilfsmittel: Frequenz- und Impedanzgang-Meßgerät, gute Abhöranlage, gute Vergleichsboxen, ausgeschlafene Ohren, viele Meßstrippen, Krokodilklemmen und Frequenzweichenbauteile.

Ich arbeite mit meinem bewährten Neutrik Pegelschreiber. Aber es gibt gute PC-gestützte Meßprogramme und geeignete Terzbandanalyser (Audioscope), die genauso gut weiterhelfen. Zunächst messe ich für jedes der vorgesehenen Lautsprecherchassis einer Kombination die "nackten" Frequenzgänge (ohne Filter) mit 30 und 7 cm Mikrofonabstand und den Impedanzgang. Die Lautsprecher sind dazu bereits in die vorgesehenen Gehäuse eingebaut und in die Schallwand eingefräst. Diese Fräsung macht besonders bei Hochtönern mit runden Montageplatten allerhand aus, messen Sie selbst mal den Vergleich! Misst man solch einen Tweeter ohne Schallwand, misst man Mist. Die Impedanzspitze zeigt mir die Resonanzfrequenz  $F_s$ , der ich mit meiner angepeilten HP-Filterfrequenz tunlichst vom Leibe bleibe (außer beim Baß). Man sollte das anvisierte  $F_3$  mindestens eine Oktav höher legen als die Resonanzfrequenz, also auf oder über die doppelte  $F_s$  des Töners. Falls nicht, muss man die Impedanz mittleres LCR-Glied linearisieren. Der Frequenzgang im Nahfeld (7 cm) zeigt mir den unverfälschten Frequenzverlauf des Töners ohne Fehler durch den Meßraum. Auf 30 cm habe ich mich festgelegt um eine Schalldruckreferenz ohne allzu schlimme Raumresonanzen zu bekommen, von der ich auf den Lautsprecherwirkungsgrad schließen kann. Wer einen schalltoten Meßraum besitzt, kann gerne auch den genormten Abstand von 1 Meter benutzen. Diese 30 cm sind außerdem nach meiner Erfahrung der kürzest sinnvolle Abstand (zu beiden Chassis), wenn man 2 benachbarte Töner zueinander abstimmen will.

Sodann probiere ich für die verschiedenen Töner nacheinander, mit welchen Filtern sie sich am besten vertragen. Die Frequenz eines jeden Chassis sollte im vorgesehenen Bereich weitgehend linear verlaufen, die Resonanz des Töners (außer Baß) um wenigstens 12 dB unterdrückt sein und der Übergang vom Anstieg (HP) oder Abfall (TP) zum Linearbereich möglichst sanft (Bessel) verlaufen. Wer kann, sollte sich nun schon mal die Zerfallsspektren seiner Töner incl. Weiche anschauen (können FFT-Meßprogramme). Geübte Ohren hören aber beim Durchsweepen schon, ob sich der Töner wohlfühlt. Auf diese Art lerne ich meine Töner und ihre Reaktionen auf verschiedene Beschaltungen kennen. Machen Sie sich unbedingt Notizen; eine gute Dokumentation erspart Ihnen später das "Ach, wie war das eigentlich??" Auch sehe ich jetzt genau, wie laut jedes Chassis mit Filter spielt und kann mir nun meine Spannungsteiler zurecht messen.

Nun erst fange ich an, Töner zu kombinieren. Bei 2-Wege-Kombis ist's klar, welche. Bei 3-Wege-Kombis fange ich mit MT zu HT an, wobei der MT schon mal einen vorher als etwa passend herausgemessenen HP erhält. Denn der beeinflusst die Signallaufzeit des Mitteltöners auch noch in dessen oberem Frequenzbereich. Ich beschalte beide (TP des MT und HP des HT) mit meinen vorher einzeln als möglicherweise passend herausgemessenen Filtern und schaue mir die beiden Frequenzgänge mit positiver Polung und verpolt (MT +, HT -) an. Die im Überschneidungsbereich lautere Kurve ist dann vermutlich die bessere zur weiteren Glättung des Frequenzganges mittels feiner Variation der einzelnen Bauteilwerte. Von meinen Einzelmessungen vorher weiß ich ja, ab wann mein Töner die Werte nicht mehr mag. Falls nicht (s.o.), muß ich halt nochmal einzeln nachmessen. Wichtig ist, daß die Mikrofon-Position im Verlauf der Optimierung der beiden Töner zueinander nie verändert wird. Probieren Sie's, dann wissen Sie, warum.

Sie dürfen zufrieden sein, wenn's nachher so aussieht:



### Zusammenspiel von Mittel- und Hochtöner

d.h., die richtige Polung bringt geraden Frequenzgang, die falsche einen möglichst großen Zwickel nach unten ohne Überschneidung zur richtigen Kurve. Dann stimmt auch die Phase und Sie bekommen eine natürliche Raumtiefe des musikalischen Geschehens.

Eine Messung in gleichem Mikro-Abstand wie zuvor, aber um 45° seitlich außer Achse zeigt mir, ob ich den MT habe zu weit hochlaufen lassen, wo er schon zu stark richtet. Falls ja, dann messe ich nun in diesem Frequenzbereich eine Schalldruckabsenkung.

Bin ich nun mit MT und HT zufrieden, gehe ich mit dem Mikro vor/zwischen TT und MT und optimiere diese zueinander auf die gleiche Weise. Dabei ersetze ich den Hochtöner durch einen Festwiderstand gleicher Impedanz. Damit "sieht" die Hochtöner-Weiche einen Abschlußwiderstand, ohne daß mir der HT hineinpiepst. Im Übergangsbereich zwischen Baß und Mitteltöner werden Sie mehr als zuvor mit störenden Raumresonanzen zu kämpfen haben, die ihre Frequenzgangmessung verbiegen wollen. Vergleichen Sie die nackten Kurven im 30 cm Abstand zur Nahfeldmessung, dann sehen Sie, wo der Meßraum hineinspinnt. Das können Sie sich dann einfach wegdenken. Manche FFT-Meßsysteme arbeiten mit sehr kurzen Zeitfenstern (Burstmessung) um solche Effekte zu minimieren.

Passen Sie bei der Anpassung des Baß-Tiefpasses auf, daß Ihnen die Gesamtimpedanz im Grundtonbereich nicht allzuweit in den Keller sinkt. Sonst kriegt Ihr Verstärker nachher vielleicht Probleme. Der Impedanzgang Ihrer fertigen Kombi gibt Ihnen auch Aufschluß über spätere Klangeigenschaften. Es dürfen keine allzu eckigen Knicke entstehen und die Impedanz sollte (besonders beim Übergang MT/HT) nicht zu hoch hinan steigen, da sonst der Verstärkerklang (Röhren) beeinträchtigt werden könnte. Es gibt Leute, die solche Überhöhungen mit Saugkreisen parallel zum Gesamtlautsprecher-Eingang glätten. Der Unerfahrene sollte aber von solchen Maßnahmen tunlichst die Finger lassen. Sonst klingt's matt oder es geht was kaputt.

Wenn Sie schließlich alle Wege Ihrer Weiche abgestimmt haben (merken Sie, was das für'n Aufwand ist?), messen Sie in mindestens 1 Meter Abstand nochmal alles zusammen (Frequenz und Impedanz), auch mit umgepoltem Mitteltöner, und hören sich das Ganze mal mono an. Am anderen Kanal schließen Sie einen bekannt guten Lautsprecher an und vergleichen mittels Balance-Regler die beiden miteinander (der Vorverstärker steht auf Mono, damit Sie nicht Äpfel mit Birnen vergleichen). Klingt's gleich gut? Glück gehabt! Meist folgen nun die Korrekturen, die am meisten (Hör-)erfahrung voraussetzen. Man muß aufgrund des Gehörten versuchen festzustellen, welcher Frequenzbereich noch Fehler zeigt. Und aufgrund der bei den Messungen gemachten Notizen (s.o.) gezielt nachbessern. Das kostet die meiste Zeit. Aber nicht verzagen! Ab dem 20sten Lautsprecher geht's dann schon bedeutend schneller. Anfänger sollten sich eh' erstmal auf 2-Wege-Konzepte beschränken, sonst geben sie frustriert auf.

Aber wenn man unverzagt wochenlang weitermacht, lernt man was und hat schließlich die Gewißheit, einen ganz individuell nach dem eigenen Geschmack optimierten Lautsprecher geschaffen zu haben, ein echtes Unikat. Wenn es dann sogar noch weitere Leute gibt, denen das Ergebnis gefällt, wiegt der nun

aufkeimende Stolz die ganze Schufferei auf und man kann am nächsten (komplizierteren) Projekt zeigen, was man gelernt hat. Mit etwas Glück und Talent kann man dann vielleicht durch Fremdaufträge seine Erfahrungen auch mal zu ein paar Mark machen. Wie ich. Aber glauben Sie mir, es gibt leichtere Methoden sein Geld zu verdienen. Allerdings, was kümmert das den „wahren Künstler“ schon!?

#

Ich hoffe, Sie konnten durch diesen kleinen Ausflug in die Passivweichentechnik ein paar neue Erkenntnisse sammeln und das Lesen war nicht allzu anstrengend. Technische Zusammenhänge sind halt ein ziemlich trockener Stoff. Sollten Sie Fragen und/oder Anregungen haben oder auch über andere Themengebiete der HiFi-Technik etwas wissen wollen, so schreiben Sie mir per e-mail, Post oder per Fax; ich freue mich über Ihre Rückmeldung und werde versuchen, sie zufriedenstellend zu beantworten.

In diesem Sinne: Viel Erfolg beim Basteln und viel Spaß beim Genuß der Ergebnisse wünscht:

Klaus Methner

Ó by: KoMET Engineering