

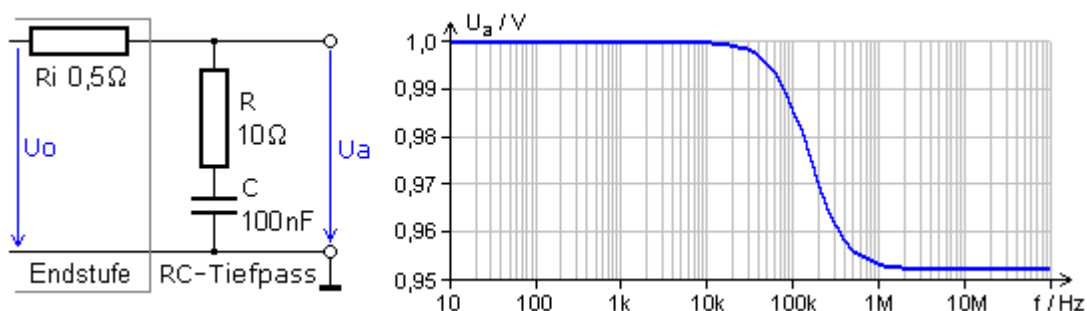
# Die Zobel- / Boucherot-Schaltung im Audibereich

 [elektroniktutor.de/analogtechnik/zobel.html](http://elektroniktutor.de/analogtechnik/zobel.html)

Viele Audioendverstärker haben intern parallel zum Lautsprecherausgang eine R-C-Reihenschaltung, wo der Kondensator an Masse liegt. Der für eine höhere Verlustleistung ausgelegte Widerstand hat Werte zwischen 10 ... 100  $\Omega$ . Der Wert des Folienkondensators beträgt um 10 ... 100 nF. Inzwischen gibt es diese Kombinationen, R-C-Snubber genannt, als eine vergossene Baueinheit mit teilweise eigenem Zahlencode. Teilweise ist noch eine kleine Induktivität als freitragende Luftspule in Reihe zum Ausgang geschaltet.

In meiner Ausbildungszeit zum Radio-Fernsehtechniker um 1980 wurde die R-C-Kombination als Zobelglied bezeichnet. Sie stellt für die Signalverstärkung eine Ausgangslast dar. Die Gegentaktendstufe arbeitet als Stromverstärker und bestimmt mit ihren Emitterwiderständen, deren Werte zwischen 0,33 ... 0,5  $\Omega$  betragen, den Quelleninnenwiderstand der Endstufe. Mit der als Zobelglied bezeichneten R-C-Kombination entsteht ein von der Frequenz abhängiger Spannungsteiler mit Tiefpasseigenschaften. Im Bereich hoher Frequenzen ist der Kondensator der R-C-Schaltung so niederohmig, dass die Ausgangsamplitude an den Lautsprecheranschlüssen nur vom ohmschen Widerstandsverhältnis bestimmt wird. Zwischen der Ausgangslast und dem Audioverstärker besteht Spannungsanpassung, da die Lastimpedanz im Vergleich zum Quelleninnenwiderstand wesentlich größer ist.

Um in einer Schaltungssimulation anschauliche Ergebnisse zur Frequenzanalyse zu erhalten, habe ich für den Innenwiderstand des Verstärkers mit 0,5  $\Omega$  ein für Endstufen recht hohen Wert und für die R-C-Kombination mit 10  $\Omega$  den kleinsten mir dort bekannten Widerstandswert gewählt. Bis zur Frequenz von 20 kHz ist im R-C-Glied  $X_C \gg R$  und die Ausgangsamplitude entspricht der von  $U_0$ . Ab 1 MHz ist  $X_C \approx 0 \Omega$  und die Ausgangsspannung wird im Verhältnis  $R / (R + R_i) = 0,952$  geteilt.



Die Bandbreite guter Audioendstufen mit Endverstärkern in integrierter Schaltungstechnik liegt bei 100 kHz. Mit Transistoren diskret aufgebaute Endstufen erreichen weitaus höhere Bandbreiten. Jeder Verstärker ist im Signalweg rückgekoppelt, oftmals auch in einer weiten Rückkopplung vom Ausgang auf den Eingang. Das interne R-C-Glied sorgt innerhalb der genutzten Bandbreite für stabile Phasenverhältnisse und schützt den Verstärker vor zu hohen Ausgangsfrequenzen.

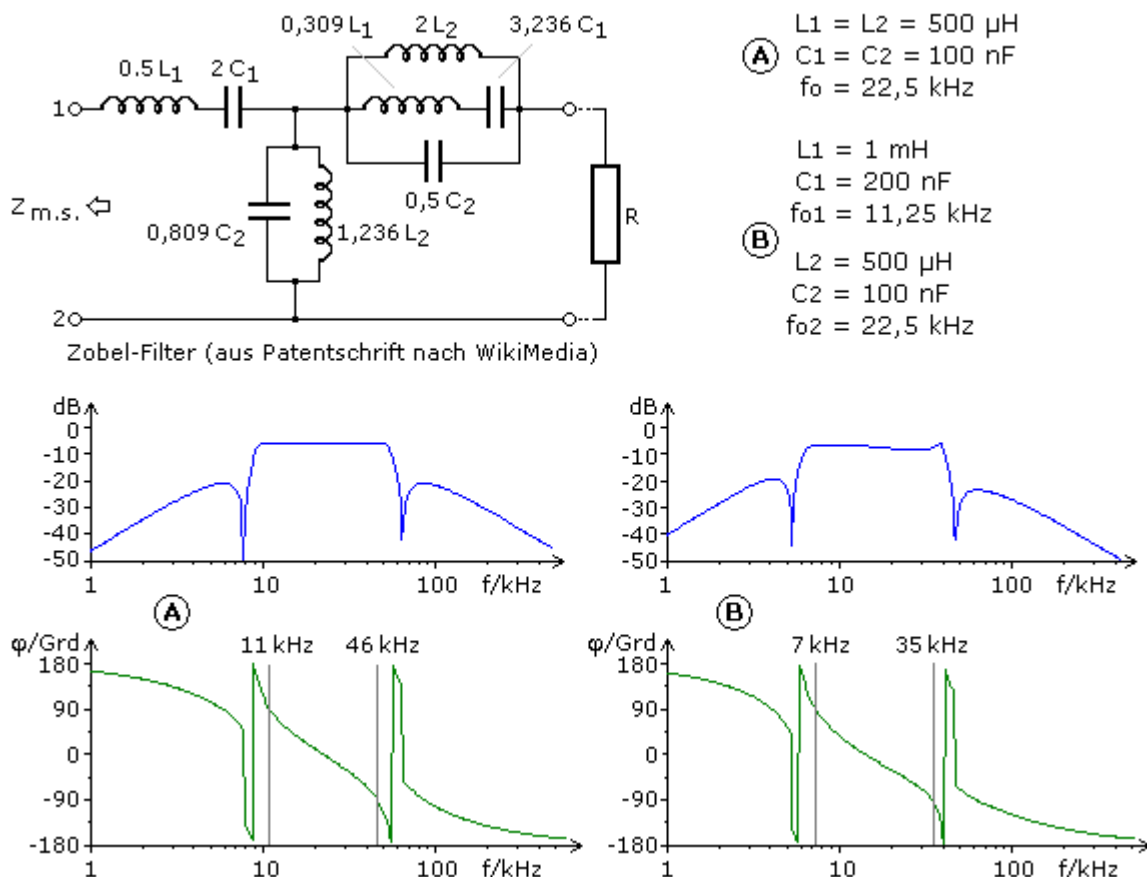
Interne parasitäre Kapazitäten bei aktiven Verstärkerelementen, an pn-Übergängen von Halbleitern und an Elektrodengruppen in Vakuumröhren, führen zur ungewollten Phasenverschiebung. Ebenso können unbeabsichtigt hochfrequente elektromagnetische Einstreuungen Mitkopplungen erzeugen. Oberhalb der Grenzfrequenz verschiebt sich die zum stabilen Betrieb notwendige Gegenkopplung mit zunehmender

Frequenz in die Richtung einer Mitkopplung. Ohne einen Tiefpassschutz können dann hohe Frequenzen über die bestehende Signalrückkopplung den Verstärker zum unkontrollierten Schwingen mit möglicher Selbstzerstörung anregen.

## Zobel-Schaltung

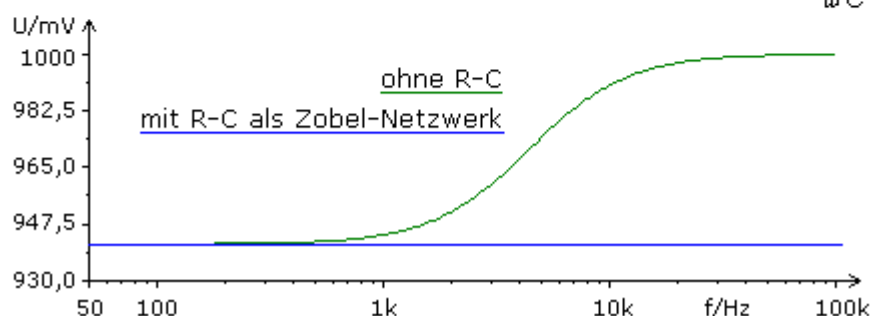
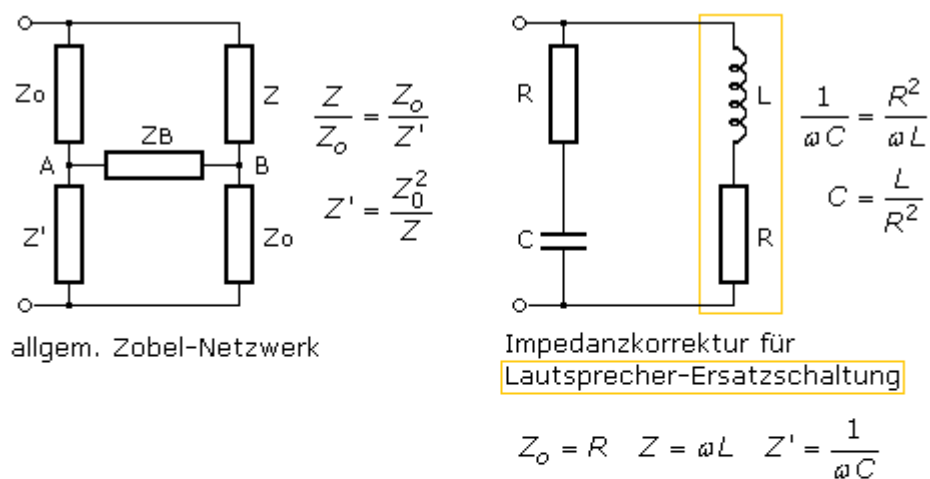
Wie schon erwähnt wurde zur Zeit meiner Ausbildung diese RC-Baugruppe als Zobel-Glied, seltener als Boucherot-Schaltung bezeichnet. Im Internet als Suchbegriff eingegeben ist neben den beiden Bezeichnungen noch der Resonanztrafo und das Snubber-Glied für identische und unterschiedliche Schaltungen mit komplexen Widerstandskombinationen zu finden. Alles sind Pass- und Filterschaltungen, kombiniert aufgebaut mit ohmschen Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten. Sowohl Otto Julius Zobel als auch Paul Boucherot haben sich mit komplexen Impedanzschaltungen und Filtern beschäftigt, allerdings mit unterschiedlichen Zielen.

Der Elektronik Ingenieur O. J. Zobel entwickelte Netzwerke zur Anpassung von Kabelverbindungen für Filter und Geräte in Telefonübertragungsnetzen. Die Übertragung der Nachrichten erfolgte nach dem Frequenzmultiplexverfahren. Die Filter waren bei konstanten Lastwiderständen auf die jeweiligen Trägerfrequenzen abgestimmt, so konnten die Nachrichten am Empfangsort sicher voneinander getrennt werden. Es handelt sich um kombinierte L-C-Schaltungen, die zum Hochpass, Tiefpass, Bandpass oder zur Bandsperre zusammengestellt werden können. In der englischsprachigen freien Wikipedia Enzyklopädie und dem Suchbegriff "Zobel network" findet man sehr ausführliche Beschreibungen zu diesen L-C-Filtern. Dargestellt ist auch ein Zobel Netzwerk zur Impedanzkorrektur für Lautsprecher mit dem Hinweis zur Boucherot-Schaltung. Als Zobel Netzwerk wird dabei die komplette Schaltung des R-C-Glieds parallel mit der R-L-Last als Ersatzschaltung für den Lautsprecher verstanden.



Das Bildarchiv der Wikimedia zeigt eine Filterschaltung aus der Patentschrift von Zobel. Die Grafik zeigt die von mir etwas angepasste Schaltung und die per Simulation erhaltenen Bodediagramme. Die Faktoren bewirken, dass die L-C-Reihen- als auch die L-C-Parallelschaltungen für sich gesehen gleiche Resonanzfrequenzen haben. Die prinzipielle Filtercharakteristik ist mit gleicher (Fall A) und unterschiedlicher Reihen- und Parallelresonanz (Fall B) gegeben. Da direkte Dimensionierungen fehlten, habe ich die Werte zur Simulation frei gewählt. Mit einem identischen Quelleninnenwiderstand und Lastwiderstand von 50 Ohm ergab sich für den Durchlassbereich eine optimale Charakteristik, um wie oben erwähnt bestimmte Frequenzbänder aus einem Multiplexsignal auszufiltern.

In der englisch sprachigen Wikipedia ist die allgemeine Basisschaltung des Zobel-Netzwerks eine aus Impedanzen aufgebaute abgegliche Brückenschaltung. Für das angegebene Widerstandsverhältnis sind an den Brückenpunkten A und B gleiche Potenziale messbar. Die Schaltung ist abgeglichen, da kein Strom durch die Brückenimpedanz fließt, kann der Widerstandswert als unendlich groß und das Bauteil als nicht vorhanden angenommen werden. Es bleibt die Parallelschaltung mit zwei in Serie geschalteten Impedanzen. Mit einer RC-Schaltung im linken Zweig und einer LR-Ersatzschaltung des Lautsprechers im rechten Zweig entsteht ein Netzwerk. Sind die Daten des Lautsprechers bekannt, kann für die abgegliche Brückenschaltung des Zobel-Netzwerks ein dazu passendes RC-Glied dimensioniert werden. Die Signalquelle 'sieht' das Netzwerk nur als konstante ohmsche Last.



Das Simulationsergebnis wird durch das Vertauschen der Reihenfolge der Bauteile im Lautsprecherzweig nicht beeinflusst. Das Amplituden-Frequenzdiagramm des Netzwerks ist im Frequenzbereich linear. Ohne R-C-Zweig entsteht durch die Induktivität der Lautsprecherspule ein Hochpass. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse einer kombinierten Spannungs- und Strommessung für das Zobel-Netzwerk und der nicht angepassten Ersatzschaltung des Lautsprechers an eine Signalquelle mit  $U = 10 \text{ V Sinus}$  und  $0,5 \Omega$  Innenwiderstand. Für den Lautsprecher wurden  $R = 8 \Omega$  und  $L = 300 \mu\text{H}$ , für die Kompensationsschaltung  $R = 8 \Omega$  und  $C = 4,7 \mu\text{F}$  gewählt.

### Zobel-Netzwerk als abgegliche Brücke

<b>f / kHz</b>	0,05	0,1	0,5	1	5	10	15	20
<b>U / V</b>	9,41							
<b>I / A</b>	1,177							
<b>R / <math>\Omega</math></b>	8,0							

### nicht angepasste Lautsprecher Ersatzschaltung

<b>f / kHz</b>	0,05	0,1	0,5	1	5	10	15	20
<b>U / V</b>	9,40	9,41	9,42	9,44	9,74	9,91	9,95	9,97
<b>I / A</b>	1,180	1,176	1,170	1,150	0,784	0,478	0,335	0,256
<b>R / <math>\Omega</math></b>	8,0	8,0	8,1	8,2	12,4	20,7	29,7	38,9

Der Ingenieur P. Boucherot beschäftigte sich ebenfalls mit komplexen LC-Filterschaltungen. Das Ziel war ein anderes, denn es sollte der Impedanzverlauf einer angeschlossenen Last so beeinflusst werden, dass der Laststrom von der Last unabhängig weitgehend konstant bleibt. Von der Quelle her gesehen ist der Impedanzverlauf der Last dann linearisiert angepasst. Zur Theorie der Boucherot-Schaltung ist im Archiv für Elektrotechnik 32. Band, Heft 6 von 1938 eine Veröffentlichung zu finden. Die Prinzipschaltung beruht auf zwei in Serie geschaltete komplexe Impedanzen, wobei eine mit einer parallel liegenden Impedanz belastet ist. Befindet sich ein LC-Serienschwingkreis in Resonanz, dann ist in einem weiten Bereich der Laststrom vom Lastwiderstand unabhängig und konstant. Das Verhalten ist in diesem Webprojekt bei den passiven Filtern für den Resonanztrafo beschrieben, der auch als Boucherot-Schaltung bezeichnet wird.

Die Boucherot-Zelle kann Blindleistung kompensieren und wird oft als Zobel-schaltung bezeichnet. Wie schon erwähnt, stabilisiert die R-C-Reihenschaltung die Arbeitsweise des Audioverstärkers und verhindert HF-Schwingungen. Da die Dimensionierung im Audioverstärker vorgegeben ist, wird bei angeschlossener Lautsprecherlast der Gesamtimpedanzverlauf in den meisten Fällen nur abgeflacht. Die Boucherot-Zelle kann den induktiven Blindwiderstand, die Reaktanz kompensieren, wenn die Schaltung speziell für den verwendeten Lautsprecher berechnet wird, sodass eine abgegliche Zobel-Brücke entsteht. Für diesen Fall ist die Brückenimpedanz so groß, dass sie in der Schaltung weggelassen werden kann. Das ist vorteilhaft, da kein Zugriff auf diese Schaltungspunkte besteht.

### Snubber-Schaltung

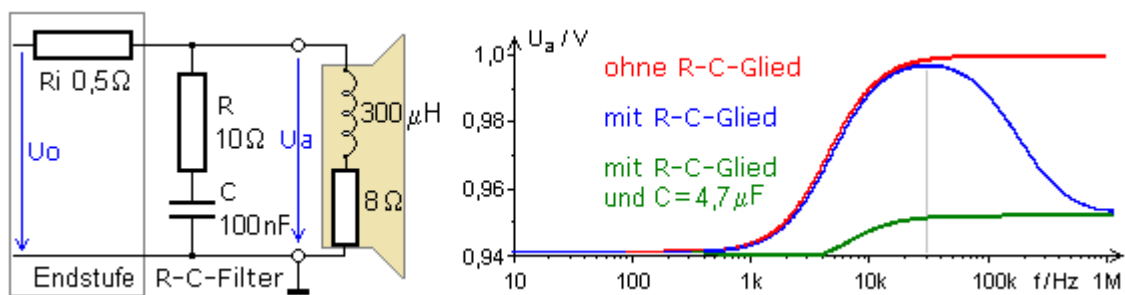
Der Begriff ist dem Englischen von "to snub" entlehnt und bedeutet übersetzt "abstumpfen, ignorieren". Mit diesem Ausdruck werden in der Elektrotechnik Dämpfungs- oder Löschgliedglieder bezeichnet, die Schwingungen und Überspannungen beim Abschalten induktiver Lasten verhindern sollen. Vielfach sind es RC-Reihenschaltungen, die es als dimensionierte, kombinierte und vergossene Bauteile mit zwei Anschlussdrähten gibt. Teilweise werden auch zu Induktivitäten parallel geschaltete Freilaufdioden als Snubber bezeichnet.

### Zobel- / Boucherot-Filter zur Linearisierung der Lautsprecherimpedanz

Ein Audioverstärker wird durch eine Lautsprecherbox oder einen dynamischen Lautsprecher belastet. Der Einfluss auf den Verstärker kann im Prinzip durch die Ersatzschaltung einer RL-Reihenschaltung beschrieben werden. Die durch das Audiosignal angeregte Schwingspule ist nicht nur Verbraucher, sondern gleichzeitig auch Generator, der mit seiner Spannung auf die Quelle zurückwirkt. Im Ausgangskreis fließt ein zusätzlicher Blindstrom, der die Belastung des Verstärkers durch die Lautsprecherinduktivität von der Frequenz abhängig macht.

Als spezielles Audiozubehör werden externe Filter angeboten, meist als Zobelglieder bezeichnet, die eine Kompensation der induktiven Blindströme bewirken sollen. Die Kennlinie der Lautsprecherimpedanz soll mit den nicht gerade preisgünstigen Filtern linearisiert werden und zum besseren Klangerlebnis führen. Elektrotechnisch und mathematisch nachweisbar kann die optimale Kompensation nicht für das gesamte Audiofrequenzband erfolgen.

Die Simulationsschaltung einer Endstufe mit einem Quelleninnenwiderstand von  $0,5\ \Omega$  mit serienmäßigem RC-(Zobel)-Glied wird mit einer Ersatzschaltung für den Lautsprecher belastet. Es ist die Serienschaltung von  $R = 8\ \Omega$  und der Induktivität der Lautsprecherspule in Anlehnung an ein Messprotokoll mit  $L = 300\ \mu\text{H}$  bei  $2\ \text{kHz}$ . Der Generatoreffekt der schwingenden Membran konnte in der Simulation nicht erfasst werden.



Das Diagramm zeigt drei Messkurven. Die rote Vergleichs- und Bezugscurve ist der Amplitudenfrequenzgang des Verstärkerausgangs, der ohne das RC-Tiefpassfilter nur mit der Ersatzschaltung des Lautsprechers belastet ist. Der blaue Kurvenzug ist das Ergebnis mit dem RC-Glied in der links angegebenen Dimensionierung. Die grüne Kurve ist das Ergebnis mit einem für die Lautsprecherinduktivität speziell dimensionierten Kompensationskondensators. Sein Wert berechnet sich zu  $4,7\ \mu\text{F}$ .

Eine Linearisierung der Lautsprecherimpedanz mit dem serienmäßigen RC-(Zobel)-Glied ist nicht zu erkennen. Die Ausgangsspannung nimmt aufgrund der zu höheren Frequenzen hin induktiv wirkenden Last zu. Es entsteht ein gedämpfter RLC-Parallelschwingkreis mit einer Resonanzfrequenz  $29\ \text{kHz}$ . Das RC-Tiefpassglied dämpft anschließend die Ausgangsamplitude, wie es schon beim unbelasteten Ausgang das ersten Diagramm dieser Seite zeigt. Mit dem speziell berechneten Kompensationskondensator kann eine recht gute Linearisierung des Impedanzverlaufs des Lautsprechers erreicht werden. Im grünen Kurvenzug nimmt die Ausgangsspannung bedingt durch den induktiven Blindwiderstand des Lautsprechers nur noch um vernachlässigbare  $1\%$  zu. Die optimale Linearisierung der Lautsprecherimpedanz über den gesamten Frequenzbereich zeigt sich nicht, da der ohmsche Widerstand nicht gleich dem ohmschen Widerstand der Lautsprecherspule entspricht. Die Schaltung ist kein abgeglichenes Zobel-Netzwerk.

## Das RC-Zobel-Glied zur Verbesserung der Klangeigenschaft einer Lautsprecherleitung

---

Jede elektrische Leitung hat neben dem ohmschen Drahtwiderstand noch induktive und kapazitive Eigenschaften. Sie werden als Belagswiderstände bezeichnet und mit ihnen wird der Wellenwiderstand oder Leitungsimpedanz bestimmt. Dieser Wert kann nicht mit dem Ohmmeter ermittelt werden. Der Wellenwiderstand zeigt sich im Tiefpasscharakter, den jede elektrische Leitung hat, der aber erst im sehr hohen Frequenzbereich an Einfluss gewinnt.

In diversen Internetforen ist zu lesen, dass die Induktivität der Lautsprecherzuleitung den Klang negativ beeinflusst. Ihre zu große Induktivität soll den Bass verlangsamen und ausdünnen und die Höhen zu leise darstellen, wodurch die Dynamik abnimmt. Hin und wieder wird auch der Skineffekt für einen schlechteren Klang verantwortlich gemacht. Speziell konfektionierte und somit besonders teure Lautsprecherleitungen sollen dem entgegen wirken. Es wird versprochen, dass der Einsatz einer edel gestalteten Zobel- oder Boucherot-Schaltung, die als ebenfalls teures separates Filter angeboten wird, Abhilfe schaffen kann. Mit dem Filter soll das Musikspektrum einen höheren Kontrast haben sowie lebendiger und räumlicher klingen. Die sprachlichen Zischlaute, das sind immer hohe Frequenzgemische, sollen gemildert werden.

Werbelaastigen Verkaufsaussagen vertraue ich grundsätzlich erst mal nicht. Es ist richtig, dass der induktive Blindwiderstand einer Leitung Signale höherer Frequenzen dämpft. Jede elektrische Leitung hat Tiefpasscharakter und somit eine obere Grenzfrequenz. Je höher die zu übertragene Signalfrequenz ist, desto mehr kann auch der Skineffekt negativ wirksam werden. Der diesbezüglich verantwortliche Frequenzbereich liegt im HF-Band weit oberhalb des Audiospektrums.

Ein Beispiel zur Erklärung:

Ein Lautsprechersystem mit der Impedanz  $4\ \Omega$  wird an einen Verstärker angeschlossen. Die Zuleitung soll für Signale um 20 kHz einen 'schädlichen' oder parasitären induktiven Widerstand von nur  $0,5\ \Omega$  haben. Für die Induktivität der Leitung errechnen sich  $L = 4\ \mu\text{H}$ . Mit diesem Wert errechnet sich für tiefe Frequenzen ein induktiver Widerstand nahe null. Den Bass ausdünnen, bedeutet entweder einige Frequenzbereiche oder den gesamten Bassbereich zu dämpfen. Diese Aussage lässt sich mithilfe einer 'schädlichen' Leitungsinduktivität nicht erklären. Der induktive Belagswiderstand  $X_L$  der Leitung, der in Serie zum Signalweg liegt, ist im tiefen Frequenzband bei Bassfrequenzen nicht wirksam.

Den Bass verlangsamen bedeutet, dass dieser Frequenzbereich auf der Leitung verzögert wird und eine negative Phasenverschiebung im Vergleich zu den anderen Frequenzen erfährt. Das kann nicht sein, denn ein Tiefpass hat im Durchlassbereich eine konstante Phasen- und Gruppenlaufzeit. Die Induktivität der Leitung ist viel zu klein, um wirksam zu sein. Ihr kapazitiver Widerstand für tiefe Frequenzen wird vom parallel liegenden viel geringeren Blindwert des im Verstärker vorhandenen RC-Tiefpass (Zobel-Glieds) bestimmt. Im Hörbereich führen diese Eigenschaften der Leitung zu keiner wirksam störenden Phasenverschiebung. Eine Milderung der Zischlaute erfolgt durch das Herausfiltern hoher Frequenzanteile. Genau das bewirkt der Leitungstiefpass, aber im Audiofrequenzbereich bestimmt der im Verstärker internen RC-Ausgangstiefpass die obere Grenzfrequenz.

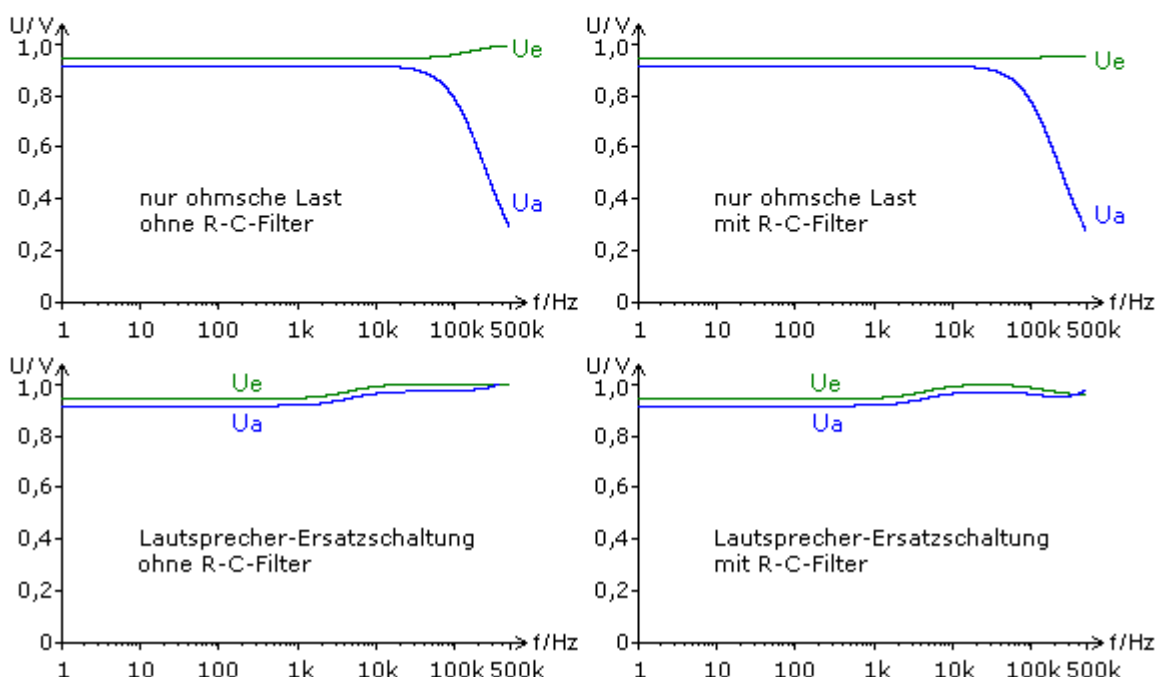
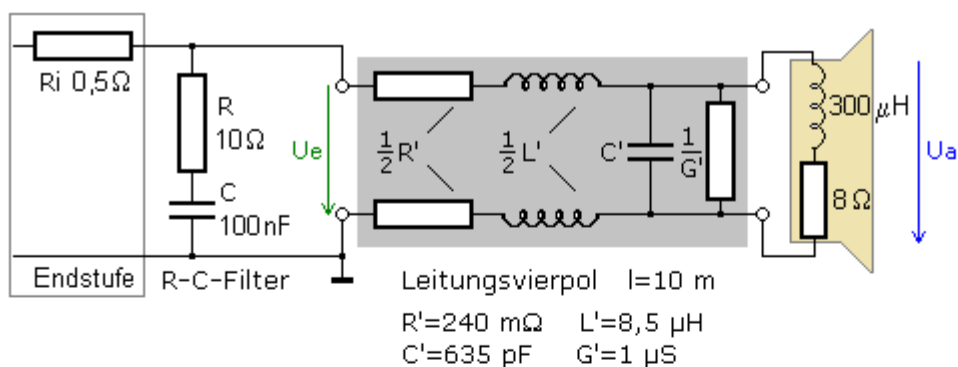
Im Verstärker sind die Werte für R und C des Tiefpassfilters festgelegt. Das Filter wirkt im hohen Frequenzbereich und schützt den Verstärker vor phasenbedingten Mitkopplungen. Ein Nutzen zusätzlicher Zobelfilter am Eingang der Lautsprecherboxen zur Verbesserung der Leitungseigenschaften

ist nicht nachweisbar. Auch steht ihr Anschaffungspreis in keinem Verhältnis zum Wert der darin verwendeten Bauteile. Subjektiv empfundene Hörerlebnisse lassen sich technisch wissenschaftlich weder beweisen noch widerlegen.

## Der Einfluss des RC-Zobel-Glieds auf eine Lautsprecherleitung

Die Belagswerte einer zweiadrigen Verlängerungsleitung, die im Normalfall auch zum Anschluss von Lautsprecherboxen benutzt wird, wurden experimentell bestimmt zu:  $R' = 23,68 \text{ m}\Omega/\text{m}$ ;  $C' = 63,2 \text{ pF}/\text{m}$ ;  $L' = 842,1 \text{ nH}/\text{m}$ ; und  $G' > 100 \text{ nS}/\text{m}$ . Mit diesen Daten wurde im Simulationsprogramm der Einfluss des RC-(Zobel)-Glieds auf einen 10 m langen Leitungsabschnitt untersucht.

Der ohmsche Schleifenwiderstand der 10 m langen Leitung beträgt aufgerundet  $240 \text{ m}\Omega$ . Er stimmt mit dem Wert überein, den man aus der Leiterlänge dem Leiterquerschnitt und der Leitfähigkeit von Kupfer errechnen kann. Der durchschnittliche Kapazitätswert beträgt  $630 \text{ pF}$  und der durchschnittliche Induktivitätswert  $8,42 \text{ }\mu\text{H}$ . Die Simulation erfolgte wie in der Schaltung dargestellt, für die 10 m lange Leitung zwischen dem Verstärkerausgang und dem Lautsprecher. Es wurden vier Simulationen durchgeführt: mit einem ohmschen Wirkwiderstand von  $8 \text{ }\Omega$  und mit der RL-Ersatzschaltung des Lautsprechers als Leitungsabschluss, sowie mit und ohne Einfluss des RC-(Zobel)-Tiefpassglieds. Dargestellt ist der Amplituden-Frequenzgang am Eingang und Ausgang der Leitung.



Bei rein ohmscher Belastung ist ein Einfluss des RC-(Zobel-)Glieds auf die Anschlussleitung nicht erkennbar. Der geringe Anstieg der Eingangsspannung oberhalb 100 kHz erreicht mit 1 V sein Maximum. Die Ausgangsspannung zeigt den zu erwartenden Tiefpasscharakter der Leitung. Für die unteren Diagramme bei Belastung durch den Lautsprecher ist kein Tiefpassverhalten mehr erkennbar. Ab 1 kHz ist ein Spannungsanstieg zu erkennen, der durch das RC-Filter oberhalb 10 kHz begrenzt wird. Oberhalb von 1 MHz nimmt die Ausgangsspannung stark zu, da die Induktivität des Lautsprechers mit der Belagskapazität der Leitung einen Parallelschwingkreis bildet. Die Simulation ergab eine Resonanzfrequenz um 2,2 MHz. Eine Rückwirkung auf den Eingang der Leitung wird von der Belagsinduktivität der Leitung, die mit dem Quelleninnenwiderstand einen Tiefpass bildet und dem RC-Filter verhindert.

Im gesamten Audiofrequenzbereich zeigt die Simulation, dass weder diese für den Lautsprecheranschluss extrem lange Leitung alleine noch mit dem Lautsprecher zusammen einen negativen Einfluss auf die zu übertragene Audiofrequenzen hat. Die Grenzfrequenz liegt für den Leitungstiefpass bei 100 kHz und bei kürzerer Leitungslänge noch höher. Die angepriesenen Eigenschaften des Zobelglieds lassen sich messtechnisch nicht nachweisen. Das im Audioverstärker intern vorhandene RC-Filter sorgt durch angepasste Signalrückkopplung für die stabilen Eigenschaften im Arbeitsfrequenzbereich. Das Erweitern mit einem außen parallel geschalteten Zobel-Filter (RC-Serienkombinationen) ist nicht zu empfehlen. Es verringert den ohmschen Widerstand und vergrößert die Kapazität, wodurch hohe Frequenzbereiche des Ausgangssignals stärker als zuvor gedämpft werden.

## Ausblick

---

Auf die Signalquelle bezogen verhält sich ein elektrodynamischer Lautsprecher als Lastwiderstand und aktiver Signalgenerator. Die sehr niedrige Quellenimpedanz (Ausgangswiderstand) dämpft die vom Lautsprecher an den Verstärker zurückgegebenen Signale. Die Anschlussleitungen zwischen Verstärker und Lautsprecher sollten daher ebenfalls einen sehr kleinen ohmschen Widerstand haben, damit die Signalbeeinflussung auf der Leitung vernachlässigbar bleibt. Ein zusätzliches RC-Glied hilft dabei nicht. Unbestritten bleibt die gezielte Anpassung mit der Filterschaltung auf jeden einzelnen Lautsprecher. Dazu müssen die Spuleninduktivität und der Gleichstromwiderstand bekannt sein. Den individuellen Hörgenuss kann jeder für sich mit durch 'trial-and-error' dimensionierten Zusatzfiltern versuchen zu optimieren. Leichter ist da die Nutzung der meistens vorhandenen Höhen- und Tiefensteller oder Band-Equalizer.