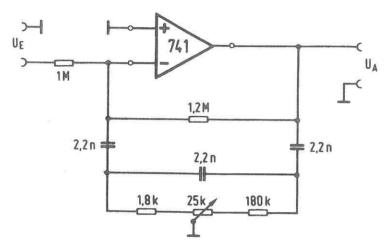


20-kHz-Bandpaß



Regelbarer Bandpaß 750 Hz...2500 Hz

4.5.6 R-C-Filter für Klangregelungen

A Einführung

Das Spektrum des in eine Regelung einbezogenen Frequenzgebietees zeigt die Abb. 4.5.6-1. Es umfaßt die vier Bereiche:

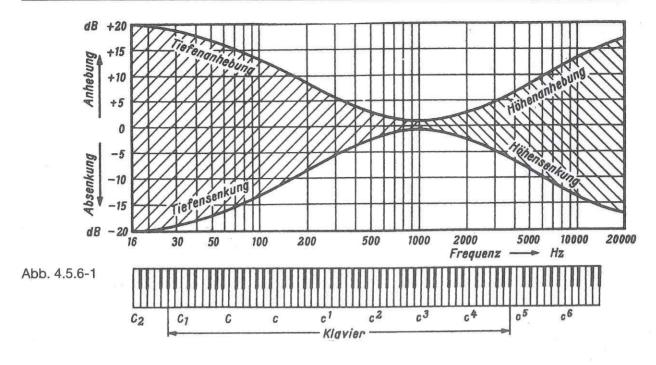
Tiefenanhebung - Tiefenabsenkung

sowie

Höhenanhebung - Höhenabsenkung.

Sollen diese Bereiche zahlenmäßig bewertet werden, so ist die folgende *Abb. 4.5.6-2* heranzuziehen. Der Regelbereich derartiger Klangeinsteller liegt bei ± 20 dB. Es soll hier darauf hingewiesen werden, daß praktische Schaltungen u. a. im Abschnitt 4.6.1 beschrieben werden.

Des weiteren lassen sich gewünschte NF-Frequenzbereich durch gezielt ausgelegte Filter getrennt verändern. In der Abb. 4.5.6-3 sind in einer Kurvendarstellung derartige Bereiche getrennt dargestellt.



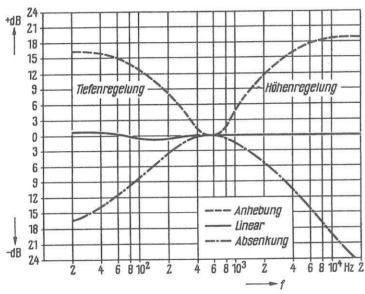
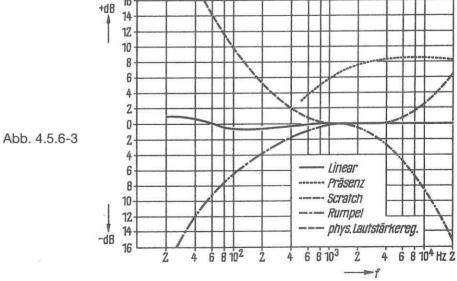


Abb. 4.5.6-2



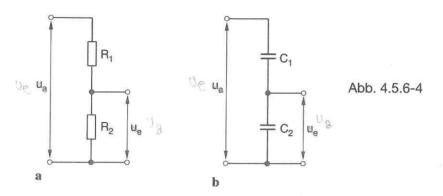
Prinzip

Diesen Regelungen liegt, außer bei Filtern, immer das Prinzip eines frequenzabhängigen Spannungsteilers zu Grunde.

In der Abb. 4.5.6-4a ist ein ohmscher Spannungsteiler gezeigt. Seine Grunddämpfung ist

$$d = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{u_a}{u_e} \ .$$

Die Abb. 4b zeigt den Spannungsverteiler mit einem kapazitiven Aufbau. Das Teilerverhältnis der Abb. a und b ist in weiten Bereichen frequenzunabhängig.



Soll eine frequenzabhängige Regelung aufgebaut werden, so werden R-C-Komponenten gemeinsam benutzt. Wird nach Abb. 4.5.6-2 wieder eine Anhebung oder Absenkung von 20 dB gefordert, so ist hierfür eine Spannungsänderung von – 10 – erforderlich. Die Grunddämpfung ist deshalb

$$d = 20 dB = \frac{1}{10} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$
.

Daraus folgt je nach Richtung der Dämpfung (Anhebung – Senkung) der Wert von R_1 = $9 \cdot R_2$ resp. R_2 = $9 \cdot R_1$; ähnlich C_1 = $9 \cdot C_2$.

Wird die Betrachtung mit dem kapazitiven Spannungsteiler weiter betrachtet, so ist die Dämpfung:

$$d = \frac{R_{C2}}{R_{C1} + R_{C2}} = \frac{\frac{1}{\omega \cdot C_2}}{\frac{1}{\omega \cdot C_1} + \frac{1}{\omega \cdot C_2}}$$
 daraus wird

$$d = \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Daraus ergibt sich die bereits beschriebene Forderung für 20 dB von $C_2 = 9 \cdot C_1$ entsprechend einer Dämpfung von d = 10.

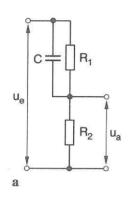
Höhenanhebung

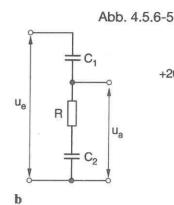
Mit einer vorher bestimmten Grunddämpfung kann nach $Abb.\ 4.5.6-5a...c$ folgendes festgestellt werden. Die Abb. 5 c zeigt den Frequenzverlauf, der bei der Frequenz f_o mit der Höhenanhebung beginnt. Diese Auswirkung kann einmal mit der Schaltung nach Abb. 5a oder mit der nach Abb. 5b erreicht werden. Für die Bemessung gilt nach Abb. 5c für den f_o (3 dB)-Punkt der Abb. 5a:

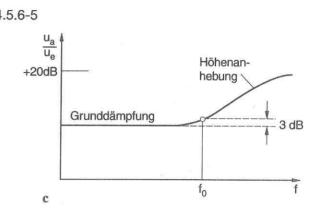
$$R_1 = R_c$$
 und somit $C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot R_1}$.

Wird nach Abb. 5b eine Höhenanhebung mit kapazitiver Grunddämpfung betrachtet, so ist der Widerstand für den f_o (3 dB)-Punkt:

$$R_1 = R_{C2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C_2}$$







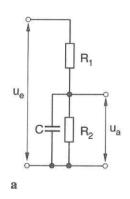
Höhenabsenkung

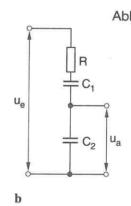
Hier ist in der Abb. 4.5.6-6a der Kondensator C auf den Widerstand R_2 zu beziehen. Es gilt für die Darstellung nach Abb. 6c mit f_0 für -3 dB dann bei einer ohmschen Grunddämpfung mit R_1 und R_2 :

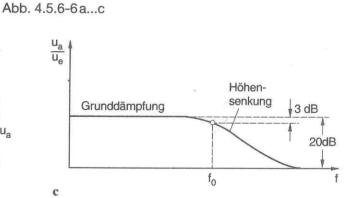
$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot R_2}.$$

Wird die Abb. 6b betrachtet, so ist bei der kapazitiven Grunddämpfung:

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C_1}.$$







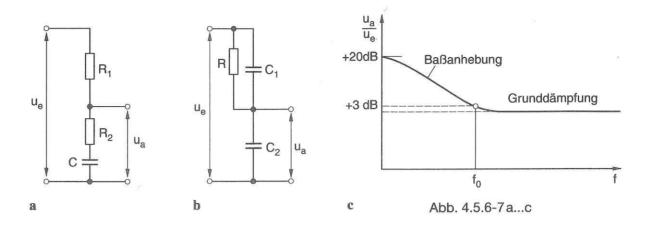
Baßanhebung

Die Durchlaßkurve zeigt die Abb. 4.5.6-7c. Wird die Anhebung für die ohmsche Grunddämpfung nach Abb. 7a betrachtet, so ist

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot R_2}.$$

Bei der kapazitiven Grunddämpfung nach Abb. 7c ist

$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot C_1}.$$



Baßabsenkung

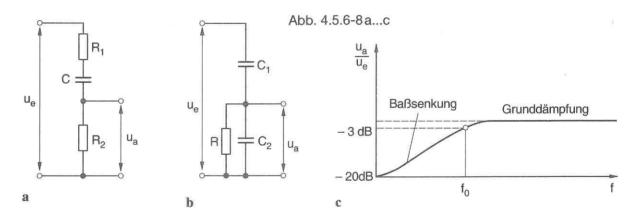
Die Baßabsenkung nach Abb. 4.5.6-8c kann wieder mit einer ohmschen – oder kapazitiven – Grunddämpfung erfolgen.

Für die Schaltung der Abb. 4.5.6–8a gilt für den 3-dB-Punkt fo:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_1}.$$

Wird die Schaltung nach Abb. 8b benutzt, so ist:

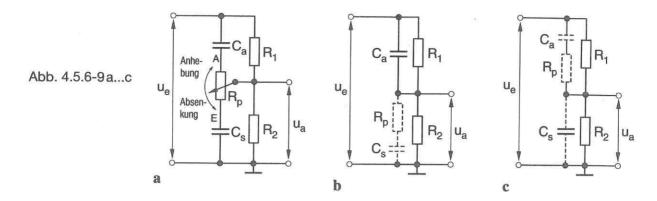
$$R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot C_2}.$$



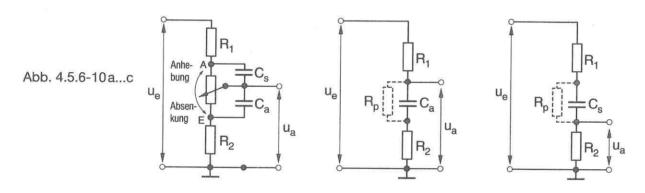
Regelschaltungen

Die vorherigen Schaltungen können in einfacher Form in Regelschaltungen überführt werden. Dabei gilt in allen Fällen, daß der steuernde Generator einen Innenwiderstand aufweisen muß, der $\leq 0,1$ des nachgeschalteten Netzwerkes sein muß. Weiterhin soll der Eingangswiderstand des nachfolgenden Verstärkers einen Eingangswiderstand aufweisen, der ≥ 10 des Netzwerkausgangswiderstandes ist.

Für eine Höhenregelung gilt die Schaltung Abb. 4.5.6-9 a...c. Die Abb. 9a zeigt die Grundschaltung. Die Abb. 9b stellt die Potentiometerstellung so dar, daß der Schleifer von R_p sich am Anfang A bei C_a befindet. Das ist gleichbedeutend mit einer Höhenanhebung. In der Abb. 9c ist das Potentiometer R_p so eingestellt, daß der Schleifer sich am Ende bei $E(C_a)$ befindet. Das bedeutet eine Höhenabsenkung.



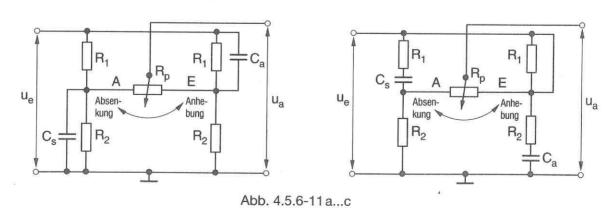
Für eine Baßregelung gilt die Schaltung $Abb.\ 4.5.6-10a...c$. Die Schaltung 10a zeigt wieder das Prinzip. In der Schaltung 10b soll der Regler bei A (R_1) stehen. Das ist gleichbedeutend mit einer Baßanhebung. Steht nach $Abb.\ 10c$ der Regler bei E (R_2), so tritt hier eine Baßsenkung ein. Die Filter nach $Abb.\ 9a$ und 10 müssen elektronisch getrennt angeordnet sein, um eine Beeinflussung auszuschließen.



Brückenschaltung

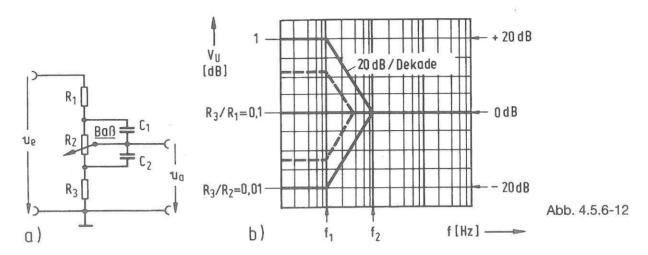
Bei einer Brückenschaltung nach Abb. 4.5.6-11 a...b.

Die Abb. 11 a dient der Höhenregelung und die der Abb. 11 b der Tiefenregelung. Die dafür zugehörigen Basisschaltungen entsprechen denen der einfachen, vorher besprochenen Filterschaltungen. Das Potentiometer R_p ist in seinem Wert so zu wählen, daß eine Beeinflussung der Brückenzweige nicht merkbar ist. Also muß R_p hochohmig sein.



B Baßregelung

Die häufig benutzte Schaltung für die Baßregelung ist in der Abb. 4.5.6-12a gezeigt, der Frequenzgang in Abb. 4.5.6-12b.



Passive Klangregelschaltungen weisen immer eine Einfügungsdämpfung auf. Dieser Wert entspricht etwa der Pegeldifferenz zwischen der linearen Kurve und dem maximalen Wert der Anhebung. Die erreichbare Flankensteilheit liegt bei 20 dB/Dekade entsprechend 6 dB/Oktave. Für das Potentiometer R_2 wird ein log-Typ benutzt, der bei ca. 130° Drehwinkel (Mittenstellung) im unteren Teil (A–S) etwa $0,1\cdot R_2$ erreicht. Die in Abb. 4.5.6-12b eingezeichnete Frequenz f_2 gilt nur für die beiden Endstellungen des Potentiometers. Zwischenwerte von R_2 verschieben den Wert von f_2 in Richtung f_1 (gestrichelte Kurve). Mit der Bedingung $R_2 \gg R_1 \gg R_3$ – etwa je Faktor 10 – ist:

$$C_1 = \frac{0,16}{f_2 \cdot R_1} \text{ und } C_2 = \frac{0,16}{f_2 \cdot R_3} \text{ sowie } f_1 = \frac{0,16}{R_1 \cdot C_2} = \frac{0,16}{R_2 \cdot C_1}.$$

Der Regelfaktor wird ermittelt aus:

$$k = \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{f_1}{f_2}$$
. Die Dämpfung bis f_2 ist dann $a = 20 \cdot log k$.

Beispiel:

Dämpfung a = 20 dB \triangleq 0,1 = k; f₂ = 350 Hz; R₂ = 200 kΩ.

Aus
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{f_1}{f_2} = 0,1$$
 folgt mit $R_2 = 200$ k Ω :

$$R_1 = 200 \text{ k}\Omega \cdot 0.1 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 20 \text{ k}\Omega \cdot 0, 1 = 2 \text{ K}$$

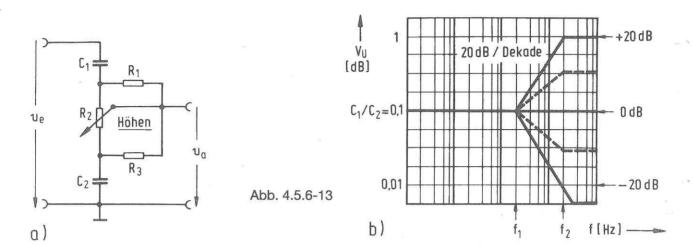
$$C_1 = \frac{0.16}{350 \text{ Hz} \cdot 20 \text{ k}} = 22 \text{ nF}; \ C_2 = 10 \cdot C_1 = 0.22 \text{ } \mu\text{F}; \ f_1 = 0.1 \cdot f_2 = 35 \text{ Hz}.$$

C Höhenregelung

Mit der Abb. 4.5.6-13a und dem Frequenzverlauf in 2b gelten die vorher erfolgten Angaben unter B.

Mit
$$R_2 \gg R_1 \gg R_3$$
 ist $k = \frac{R_3}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{f_1}{f_2} = \frac{R_1}{R_2}$.

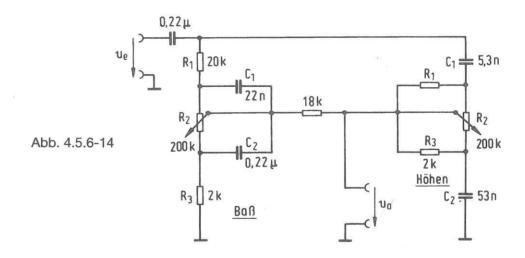
Dann ist
$$C_1 = \frac{0.16}{f_1 \cdot R_1}$$
 und $C_2 = \frac{0.16}{f_1 \cdot R_3}$ sowie $f_2 = \frac{0.16}{R_3 \cdot C_1}$.



Beispiel:

Dämpfung $a=20~dB \triangleq k=0,1; f_1=1,5~kHz$ sowie $R_2=200~k\Omega$. Dann ist $R_1=20~k\Omega$ und $R_3=2~k\Omega$. Aus den vorherigen Gleichungen folgt weiter $f_2=10\cdot f_1=15~kHz$ sowie $C_1=5,3~nF$ und $C_2=10\cdot C_1=53~nF$.

In der Abb. 4.5.6-14 ist eine Schaltung für eine kombinierte Baß- und Höhenregelung gezeigt.



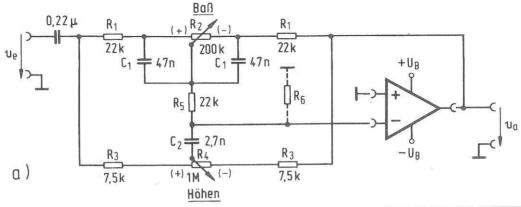
D Beispiel einer aktiven Klangregelung

dargestellt in Abb. 4.5.6-15a, die Frequenzwerte in Abb. 4.5.6-15b.

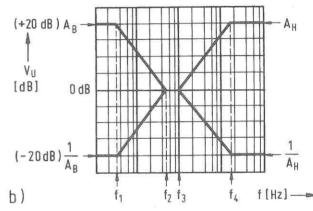
Mit den Bezeichnungen A_B = maximale Baßanhebung; $\frac{1}{A_B}$ = maximale Baßabsenkung, sowie A_H = maximale Höhenanhebung; $\frac{1}{A_H}$ = maximale Höhenabsenkung, lassen sich die folgenden Beziehungen finden:

$$A_{B} = \frac{R_{1} + R_{2}}{R_{1}}; \quad \frac{1}{A_{B}} = \frac{R_{1}}{R_{1} + R_{2}}; \quad A_{H} = \frac{R_{1} + R_{3} + 2 \cdot R_{5}}{R_{3}}; \quad \frac{1}{A_{H}} = \frac{R_{3}}{R_{1} + R_{3} + 2 \cdot R_{5}}.$$

Für die Baßregelung gilt mit $R_2 \gg R_1$: $f_2 = A_B \cdot f_1$ sowie mit







$$f_1 = \frac{0.16}{R_2 \cdot C_1} \quad \text{und} \quad f_2 = \frac{0.16}{R_1 \cdot C_1} \quad \text{ist die Verstärkung} \quad A_B = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Weiter folgt hier
$$C_1 = \frac{0.16}{f_2 \cdot R_1}$$
 sowie $R_2 = \frac{0.16}{f_1 \cdot C_1}$.

Für die Höhenregelung gilt mit $R_4 \gg R_1 + R_3 + 2 \cdot R_5$:

$$f_3 = \frac{0.16}{C_2 \cdot (R_1 + R_3 + 2 \cdot R_5)}$$
 sowie $f_4 = \frac{0.16}{R_3 \cdot C_2}$ und die Verstärkung ist

$$A_{\rm H} = 1 + \frac{R_1 + 2 \cdot R_5}{R_3}$$
. Weiter wird gewählt $R_4 \ge 10 \cdot (R_1 + R_3 + 2 \cdot R_5)$, sowie

$$C_2 = \frac{0.16}{f_4 \cdot R_3}$$
 (siehe oben). Daraus folgt auch $f_3 = \frac{f_4}{A_H}$.

Für den Widerstand
$$R_5$$
 gilt: $R_5 = 0.5 \cdot \left(\frac{0.16}{f_3 \cdot C_2} - R_1 - R_3 \right)$.

Der Widerstand R₆ kann eingefügt werden, um die Verstärkung zu beeinflussen.

Beispiel:

Es wird wieder gewählt $A_B = A_H = 20 \text{ dB} = 10$; $R_2 = 200 \text{ k}\Omega$; $f_1 = 25 \text{ Hz}$; $f_3 = 8 \text{ kHz}$. Weiter wird in der Praxis $R_5 = R_1$ gewählt.

Mit diesen Vorgaben ist:

$$R_1$$
 $A_B = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 10$ und damit $R_1 = \frac{R_2}{10 - 1} = \frac{200 \text{ K}}{9} = 22 \text{ k}\Omega.$

 C_1 Ähnlich der passiven Schaltung ist $f_2 = A_B \cdot f_1 = 10 \cdot 25$ Hz = 250 Hz. Damit wird

$$C_1 = \frac{0.16}{f_2 \cdot R_1} = \frac{0.16}{300 \text{ Hz} \cdot 11 \text{ k}} \approx 47 \text{ nF}.$$

$$R_3$$
 $A_H = \frac{R_1 + R_3 + 2 \cdot R_5}{R_3} = 1 + \frac{R_1 + 2 \cdot R_5}{R_3} = 10$ daraus folgt

$$R_3 = \frac{R_1 + 2 \cdot R_5}{10 - 1} = \frac{22 k + 2 \cdot 22 k}{9} \approx 7,5 k.$$

$$C_2$$
 $C_2 = \frac{0.16}{f_4 \cdot R_3} = \frac{0.16}{8 \text{ kHz} \cdot 7.5 \text{ k}} \approx 2.7 \text{ nF}.$

$$\mathbb{R}_4 \quad \mathbb{R}_4 \ge 10 \cdot (\mathbb{R}_3 + \mathbb{R}_1 + 2 \cdot \mathbb{R}_5) = 10 \cdot (7.5 \text{ k} + 22 \text{ k} + 2 \cdot 22 \text{ k}) = 1 \text{ M}\Omega.$$

Mit
$$R_5 \approx R_1$$
 wird $R_5 = 0.5 \cdot \left(\frac{0.16}{f_3 \cdot C_2} - R_1 - R_3\right)$ und somit

$$R_5 = 0.5 \cdot \left(\frac{0.16}{2.7 \text{ nF} \cdot 800 \text{ Hz}} - 22 \text{ k} - 7.5 \text{ k} \right) = 22 \text{ k}. \text{ Dabei ist } f_3 = \frac{1}{A_H} \cdot f_4 = 800 \text{ Hz}.$$

4.5.7 R-C-Filter im HF-Bereich

Operationsverstärker erreichen als HF-Typen Grenzfrequenzen (Verstärkungs-Bandbreitenprodukt), die bereits im GHz-Bereich liegen. Somit ist es einfach, aktive R-C-Filter (HF)-Filter im Bereich bis etwa 150 MHz herzustellen. Als allgemeine Regel gilt, daß die Grenzfrequenz des OPs etwa 15...25mal höher liegen sollte als die gewünschte Arbeitsfrequenz. Ein wichtiges Kriterium ist das Rauschen, so daß als zweiter Parameter rauscharme OPs gefordert werden. Für das Platinendesign gelten die Gesetze der Hochfrequenz – also große Masseflächen, kurze Leitungsführungen und entsprechende Abblockung der Betriebsspannung am OP. Vorteilhaft eignen sich die Sallen-Key-Schaltungen der Abb. 4.5.3-7b und 9b.

Um entsprechend niedrige Ein- und Ausgangsimpedanzen zu erreichen, kann es erforderlich werden, am Ein- und Ausgang einen Treiber vorzuschalten. Auch das Laufzeitverhalten ist erwähnenswert. Bei einer Phasenverschiebung von 180° (μ_e/μ_a) wird die Frequenz f ermittelt, dann ist die Laufzeit

$$T = \frac{1}{2 \cdot f} \ .$$

Beispiel: f = 100 MHz ergibt

$$T = \frac{1}{2 \cdot 100 \cdot 10^6} = 5 \text{ ns}.$$

Die Grenzen der Betrachtung sind dann gegeben, wenn die Bauelemente trotz Treiber im Wert zu niedrig werden.