

FRANK - DIETER STRICKER

## Für den jungen Funktechniker

### Schaltungen zur Klangbeeinflussung

Rundfunkempfänger und Niederfrequenzverstärker besitzen Einrichtungen, die als Klangblende, Tonblende, Klangregler oder Klangregister bezeichnet werden. Ausdrücke wie „Tonblende" oder „Tonregler" sind – streng genommen – falsch. Als Ton wird nämlich nur ein Schalleindruck von sinusförmigem Verlauf verstanden, während das Wort Klang ein Tongemisch, also auch bereits eine Mischung aus Grund- und Obertönen kennzeichnet. Die genannten Einrichtungen beeinflussen jedoch den Klang und nicht die Töne einer Darbietung. – Ebenso ist der Ausdruck „Klangblende" falsch, denn eine „Blende" (*in der Optik*) beeinflusst nicht die Qualität, sondern die Quantität, d. h. das Volumen eines Strahlenbündels.

Ein guter Niederfrequenzverstärker soll alle Frequenzen des Hörbereichs möglichst gleichmäßig verstärken. Die Klangeinsteller gestatten nun, von dieser geradlinigen Frequenzkurve abzuweichen, wenn es die Raumakustik oder der jeweilige Verwendungszweck erfordert. Der Klangeinsteller erzeugt also lineare Verzerrungen. Hierunter versteht man proportional, d. h. linear mit der Frequenz verlaufende Spannungsänderungen. Da jedoch vielfach mit Hilfe der Klangeinsteller bereits vorhandene lineare Verzerrungen rückgängig gemacht werden sollen, bezeichnet man, besonders in der Studioteknik, die Klangeinstellorgane auch als Entzerrer. Bei guter Musikübertragung wird es wünschenswert sein, daß die Höhen und vorwiegend die Tiefen mehr verstärkt werden als die mittleren Tonlagen. Das menschliche Ohr hat eine für verschiedene Frequenzen und Lautstärken unterschiedliche Empfindlichkeit. Der Klangeinsteller soll den akustischen Eindruck dieser Ohreigenschaft anpassen. Dazu müssen bei kleiner Wiedergabelautstärke die mittleren Frequenzen um 1000 Hz gegenüber den hohen und tiefen Tönen abgesenkt werden.

Bei Reden und Kommandoübertragungen wird dagegen die Sprache wesentlich besser verstanden, wenn die Tiefen abgeschnitten werden. Um das Überlagerungspfeifen benachbarter Sender, Prasselstörungen oder das Nadelgeräusch beim Abspielen älterer Schallplatten zu vermindern, senkt man gern die Höhen ab. Oft sollen auch die Klangeinstellglieder den ungleichmäßigen Frequenzgang eines Übertragerglieds, z. B. eines Tonabnehmers oder des Lautsprechers, ausgleichen. Den meisten Anforderungen genügt eine Klangeinstellung, die wahlweise Höhenanhebung oder Höhensenkung, Baßanhebung oder Baßsenkung bewirkt. Höhen und Tiefen müssen getrennt eingestellt werden können; dabei darf sich die Lautstärke der Mittellagen nicht ändern. **Bild 1** zeigt die gewünschten Frequenzkurven.

Zur Verdeutlichung ist unten an

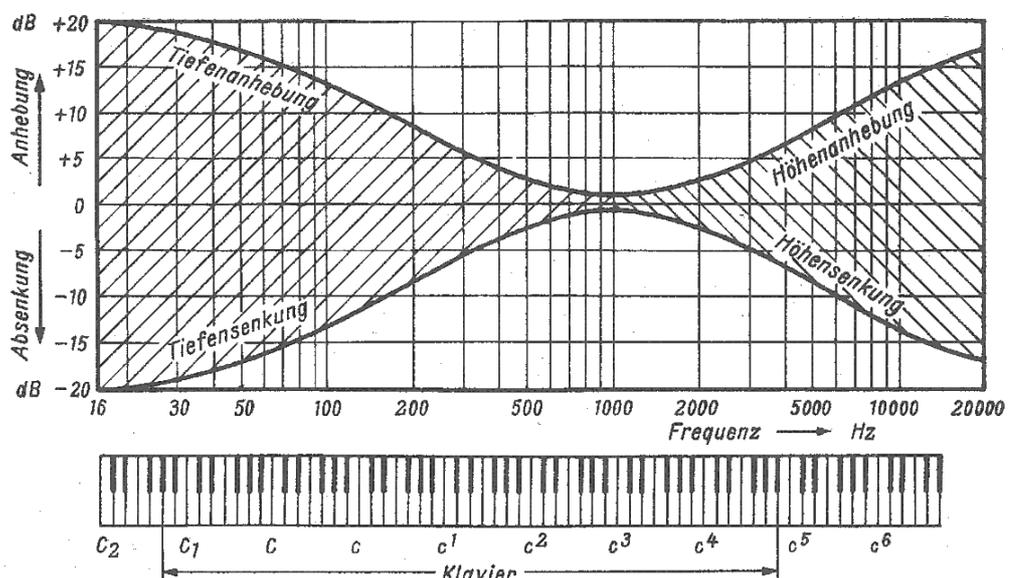


Bild 1. Erwünschte Frequenzkurven für die Klangeinstellung

der waagerechten Frequenzachse die Klaviertastatur, links und rechts über den Tonbereich des Klaviers hinausgehend, gezeichnet. Eine wirksame Beeinflussung verlangt ein Anheben bzw. Absenken der Spannung um mindestens 10 : 1 bzw. 1 : 10 (entsprechend  $\pm 20$  dB). Die Einflußbereiche, die mit dem Höhen- und mit dem Tiefeneinsteller getrennt überstrichen werden sollen, sind in **Bild 1** schraffiert.

Alle Klangfilter enthalten frequenzabhängige Widerstände, also Induktivitäten oder Kapazitäten. Um die Frequenzabhängigkeit zur Wirkung zu bringen, müssen sie mit ohmschen Widerständen kombiniert werden. Nun können sowohl mit Widerständen und Spulen als auch mit Widerständen und Kondensatoren Filter aufgebaut werden, die eine Klangänderung nach **Bild 1** erlauben. RC-Schaltungen werden vorgezogen, weil Spulen teurer als Kondensatoren sind und weil Spulen leicht Brummstörungen aufnehmen, die von magnetischen Streufeldern (z. B. vom Netztransformator) herrühren. In dieser Arbeit werden deshalb nur Klangfilterschaltungen mit Widerständen und Kondensatoren berücksichtigt.

Einfache „Klangblenden“, die nur die Höhen oder die Bässe absenken können, bestehen aus einer Reihen- oder Parallelschaltung eines Widerstandes mit einem Kondensator. Klangeinsteller, die dazu noch die Höhen und Bässe anheben müssen, sind ziemlich komplizierte „Netzwerke“ aus Widerständen und Kondensatoren. Das Klangeinstell-Netzwerk kann im Rundfunkgerät oder in einem Verstärker entweder direkt im Nf Verstärkerweg oder in einem Gegenkopplungs-zweig liegen (**Bild 2**). Das RC-Filter im Gegenkopplungsweg wirkt im Prinzip genauso wie im Verstärkerweg, es ist aber wegen der Einbeziehung des Gegenkopplungsgrades und der Röhrendaten der gegengekoppelten Stufen viel schwieriger zu berechnen. Außerdem verringert hier das Anheben eines Frequenzbereichs die Gegenkopplung in diesem Bereich, die Verzerrungen nehmen also zu. Wir beschränken uns deshalb auf die Klangbeeinflussung im Verstärkerweg.

### 1. Die Grunddämpfung

Eine Widerstands-Kondensator-Kombination kann niemals eine Spannung vergrößern, also anheben. Sie kann nur die Spannung verkleinern, d. h. absenken. Soll eine Anhebung erfolgen, so muß zunächst die Eingangsspannung für alle Frequenzen auf einen Bruchteil ihres ursprünglichen Wertes vermindert werden. In dem anzuhebenden Frequenzbereich macht der Klangeinsteller dann diese Spannungsverminderung wieder rückgängig.

Ein Klangfilter enthält also einen Spannungsteiler, der eine frequenzunabhängige Spannungsteilung erlaubt, die wir Grunddämpfung  $d$  nennen wollen. Diese frequenzunabhängige Grunddämpfung wird bei RC-Schaltungen nach **Bild 3** auf zwei Arten erreicht:

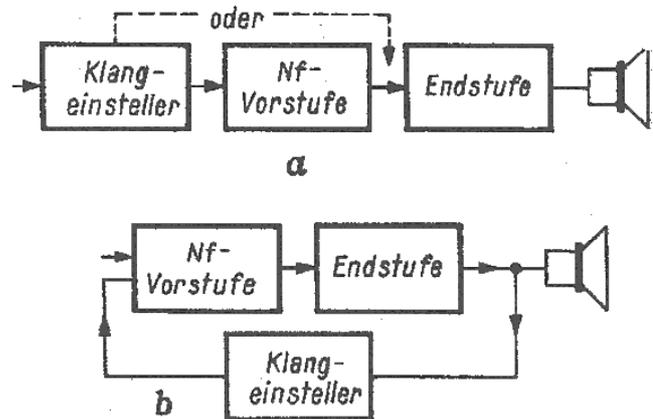
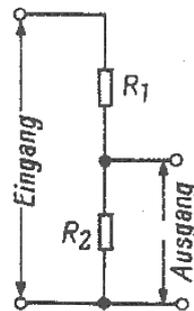


Bild 2. Möglichkeiten der Klangbeeinflussung; a = im Verstärkerweg, b = im Gegenkopplungsweg

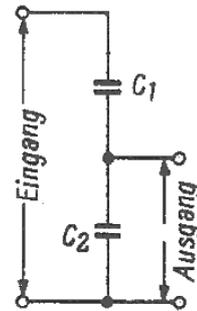
Bild 3. Frequenzunabhängige Grunddämpfung

a) mit ohmschem Spannungsteiler



$$d = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

b) mit kapazitivem Spannungsteiler



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

$$\text{Grunddämpfung } d = \frac{\text{Ausgangsspannung } U_a}{\text{Eingangsspannung } U_e}$$

### 1.1. Grunddämpfung mit einem Spannungsteiler aus ohmschen Widerständen ( $R_1$ und $R_2$ )

Die Grunddämpfung  $d$  ist gleich der Teilung der Eingangsspannung  $d = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

Die gewünschte Baß- oder Höhenanhebung soll z. B. 20 dB betragen; das bedeutet, daß die Bässe oder die Höhen mit 10facher Spannung gegenüber der Mittellage am Ausgang erscheinen. Die Grunddämpfung muß also  $d = \frac{1}{10}$  sein. Hierzu ist ein Widerstand  $R_1$  nötig, der einen 9 mal

größeren Wert als  $R_2$  hat. Für 20 dB wird:  $d = \frac{1}{10}$  und deshalb gilt für das Bemessen des

Spannungsteilers:

$$R_1 = 9 R_2$$

### 1.2. Grunddämpfung mit einem Spannungsteiler aus Kondensatoren ( $C_1$ und $C_2$ )

Kondensatoren geben ebenfalls einen frequenzunabhängigen Spannungsteiler, obwohl der kapazitive Widerstand jedes Kondensators frequenzabhängig ist. Bei zwei in Reihe geschalteten Kondensatoren ist aber für jede Frequenz das Verhältnis der beiden kapazitiven Widerstände gleich, also bleiben auch die an ihnen abfallenden Spannungen gleich. Die Berechnung der Grund-

dämpfung macht dies deutlich:  $d = \frac{R_{c2}}{R_{c1} + R_{c2}} = \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{\frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2}}$

$\omega$  kürzt sich heraus, weil es in jedem Bruch des Zählers und Nenners enthalten ist (die

Spannungsteilung ist also unabhängig von der Frequenz). Man erhält:  $d = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$

Soll um 20 dB angehoben werden, so muß die Grunddämpfung hier ebenfalls  $\frac{1}{10}$  betragen. Am

Kondensator  $C_1$  soll also eine Spannung abfallen, die 9mal größer als die Spannung am Kondensator  $C_2$  ist.  $C_2$  muß dann die 9fache Kapazität von  $C_1$  besitzen, da bei Reihenschaltung von Kondensatoren stets am größeren Kondensator die kleinere Spannung abfällt.

$$\text{Für 20 dB: } d = \frac{1}{10} \quad C_2 = 9 \cdot C_1$$

Wie man sieht, verursacht jedes Klangfilter einen Verlust an Spannung, d. h. die Gesamtverstärkung wird herabgesetzt. Falls nicht genügend Verstärkungsreserve vorhanden ist, muß eine zusätzliche Röhrenstufe (Verstärkung etwa 10fach) den Verlust wieder wettmachen.

## 2. Höhenanhebung

### 2.1. Höhenanhebung bei ohmscher Grunddämpfung

Zum Anheben der Höhen muß die Ausgangsspannung ab etwa 1000 Hz von der Grunddämpfung an nach und nach den vollen Wert der Eingangsspannung erreichen. Bei einer Grunddämpfung mit ohmschen Widerständen wird dies dadurch bewerkstelligt, daß dem ersten Widerstand  $R_1$  nach **Bild 4a** ein Kondensator  $C$  parallel geschaltet wird. Der kapazitive Widerstand  $R_C$  des Kondensators ist bei niedrigen Frequenzen noch so groß gegenüber dem ohmschen Widerstand  $R_1$ , daß die Spannungsteilung nur von den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  bestimmt wird. Von einer bestimmten Frequenz an, der Übergangsfrequenz  $f_u$ , bei der  $R_C = R_1$  ist, gewinnt der Kondensator einen merklichen Einfluß auf die Spannungsteilung. Bei noch höheren Frequenzen überbrückt die Kapazität  $C$  immer mehr den Widerstand  $R_1$ , die Ausgangsspannung steigt dadurch an, bis der Kondensator schließlich den Widerstand  $R_1$  praktisch kurzschließt. Nun ist die Ausgangsspannung gleich der Eingangsspannung.

Die Wahl der Übergangsfrequenz bestimmt den Wert des Kondensators  $C$ .

Für die Übergangsfrequenz  $f_{\ddot{u}}$  gilt:  $R_1 = R_C$  oder  $R_1 = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} \cdot C}$

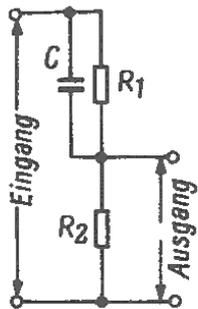
nach C aufgelöst erhält man:  $C = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} \cdot R_1}$

Die Ausgangsspannung ist bei Erreichen der Übergangsfrequenz um etwa 3 dB (d. h. Spannungsverhältnis 1,4 : 1) höher als die Grunddämpfung geworden. Die Grunddämpfung reduziert, wie vorausgesetzt worden war, die Eingangsspannung auf den zehnten Teil (20 dB). Bei der Übergangsfrequenz erhält man also ein Spannungsverhältnis von  $1,4 \cdot 0,1 = 0,14$ . (Der genaue Wert der Ausgangsspannung bei der Übergangsfrequenz hängt außerdem von der Größe der Grunddämpfung ab. Nur bei

Werten für  $d$  gleich oder kleiner als  $\frac{1}{10}$  wird die Spannung nahezu um 3 dB angehoben).

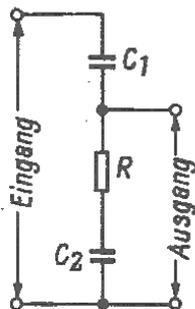
Bei Schaltungen, die lediglich aus einem ohmschen Widerstand mit einem Kondensator bestehen, wird anstelle des Begriffs Übergangsfrequenz die Bezeichnung Grenzfrequenz benutzt. Für sie gilt ebenfalls Blindwiderstand = Wirkwiderstand. Bei Klangfiltern jedoch, bei denen mehrere Blind- und Wirkwiderstände zusammenschaltet werden und außerdem die Grunddämpfung in die Rechnung eingeht, ist der Ausdruck Übergangsfrequenz besser angebracht.

a) bei ohmscher Grunddämpfung



$$C = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} R_1}$$

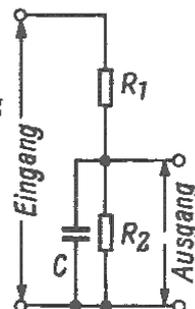
b) bei kapazitiver Grunddämpfung



$$R = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} C_2}$$

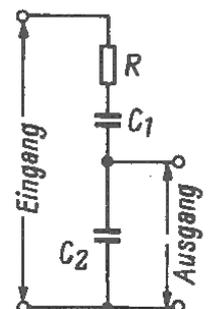
Links: Bild 4. Höhenanhebung

a) bei ohmscher Grunddämpfung

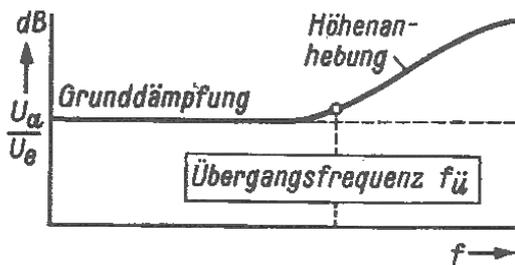


$$C = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} R_2}$$

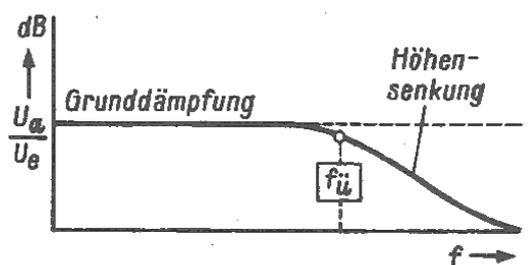
b) bei kapazitiver Grunddämpfung



$$R = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} C_1}$$



Rechts: Bild 5. Höhensenkung



## 2.2 Höhenanhebung bei kapazitiver Grunddämpfung

Zum Anheben der Höhen bei kapazitiver Grunddämpfung wird nach **Bild 4b** in Reihe zum zweiten Kondensator  $C_2$  ein Widerstand  $R$  geschaltet. Solange bei niedrigen Frequenzen der kapazitive Widerstand von  $C_2$  noch groß gegenüber dem ohmschen Widerstand  $R$  ist, wird die Spannungsteilung allein von den Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  bestimmt. Von der Übergangsfrequenz  $f_{\ddot{u}}$  (hier ist  $R = R_{C_2}$ ) an beeinflusst der Widerstand  $R$  die Spannungsteilung. Hohe Frequenzen werden von den Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$  praktisch kurzgeschlossen, die gesamte Eingangsspannung fällt dann am

Widerstand  $R$  ab. Bei der Übergangsfrequenz  $f_{\ddot{u}}$  ist:  $R = R_{C_2} = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} C_2}$

Bei  $f_{\ddot{u}}$  erfolgt eine Anhebung um rund 3 dB über die Grunddämpfung (für  $d = \frac{1}{10}$  also  $U_a = 0,14 \cdot U_e$ ).

### 3. Höhensenkung

#### 3.1. Höhensenkung bei ohmscher Grunddämpfung

Ein Kondensator C parallel zum zweiten Widerstand  $R_2$  in **Bild 5a** senkt die Höhen oberhalb der Übergangsfrequenz ab. Der kapazitive Widerstand dieses Kondensators wird bei höheren Frequenzen immer kleiner, und dadurch verringert sich auch die Ausgangsspannung.

Die Kapazität des Kondensators berechnet sich ähnlich wie bei der Höhenanhebung zu:

$$C = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} R_2}$$

Die Absenkung unter die Grunddämpfung beträgt bei der Übergangsfrequenz etwa 3 dB (d. h. Spannungsverhältnis  $1 : 1,41 = 0,7 : 1$ ), bei  $d = \frac{1}{10}$  also  $U_a = 0,07 \cdot U_e$ .

#### 3.2. Höhensenkung bei kapazitiver Grunddämpfung

Hier muß nach **Bild 5b** zur Höhensenkung ein Widerstand R in Reihe zum ersten Kondensator  $C_1$  geschaltet werden. Oberhalb der Übergangsfrequenz verringert sich der kapazitive Widerstand von  $C_2$  viel schneller als der Widerstand der Reihenschaltung von R und  $C_1$ . Die Ausgangsspannung sinkt bei höheren Frequenzen ab.

Die Berechnung des Widerstandes R:  $R = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} C_1}$

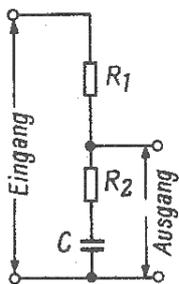
Bei der Übergangsfrequenz findet eine Absenkung um fast 3 dB statt ( $U_a = 0,07 \cdot U_e$  für  $d = \frac{1}{10}$ ).

### 4. Baßanhebung

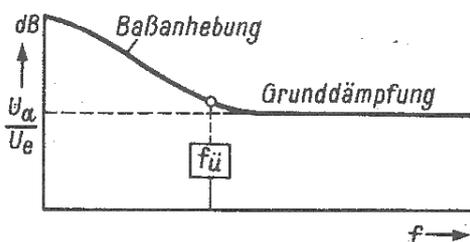
#### 4.1. Baßanhebung bei ohmscher Grunddämpfung

In **Bild 6a** ergibt ein Kondensator C in Reihe zum zweiten Widerstand  $R_2$  eine Baßanhebung. Sie wirkt sich unterhalb der Übergangsfrequenz (z. B.  $f_{\ddot{u}} = 800$  Hz) aus. Dabei überschreitet nach tieferen Frequenzen hin der kapazitive Widerstand  $R_c$  des Kondensators den Wert des Widerstands  $R_2$ , so daß die Ausgangsspannung größer wird, bis sie schließlich bei der Frequenz 0 den vollen

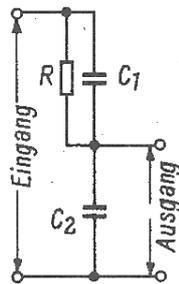
a) bei ohmscher Grunddämpfung



$$C = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} R_2}$$



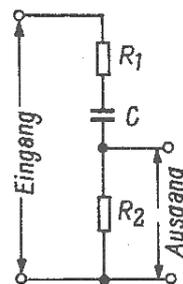
b) bei kapazitiver Grunddämpfung



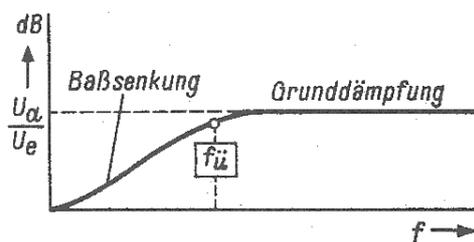
$$R = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} C_1}$$

Links: Bild 6. Baßanhebung

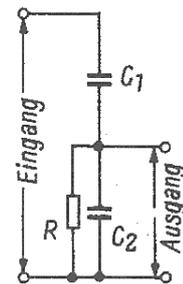
a) bei ohmscher Grunddämpfung



$$C = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} R_1}$$



b) bei kapazitiver Grunddämpfung



$$R = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} C_2}$$

Rechts: Bild 7. Baßsenkung

Wert der Eingangsspannung erreicht.  $C = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} R_2}$

Bei der Übergangsfrequenz beträgt die Anhebung über die Grunddämpfung etwa 3 dB.

#### 4.2. Baßanhebung bei kapazitiver Grunddämpfung

Die Schaltung **Bild 6b** erlaubt die Baßanhebung bei kapazitivem Spannungsteiler. Bei tiefen Frequenzen nähert sich die Ausgangsspannung der angelegten Eingangsspannung, weil der kapazitive Widerstand des Kondensators C2 gegen Unendlich strebt, während die Parallelschaltung

von R und C1 den Widerstandswert von R nicht überschreiten kann.  $R = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} C_1}$

Die Anhebung bei der Übergangsfrequenz liegt ebenfalls rund 3 dB über der Grunddämpfung.

### 5. Baßsenkung

#### 5.1. Baßsenkung bei ohmscher Grunddämpfung

Bei hohen Frequenzen wirkt der Kondensator C in **Bild 7a** wie ein Kurzschluß. Die Ausgangsspannung wird allein durch die Spannungsteilung an den Widerständen R1 und R2 bestimmt. Wird die Frequenz vermindert, so wächst der kapazitive Widerstand von C an. Wenn der kapazitive Widerstand bei der Übergangsfrequenz den Wert von R1 erreicht, dann beginnt die Ausgangsspannung merklich abzusinken. Bei der Frequenz 0 ist keine Ausgangsspannung mehr

vorhanden.  $C = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} R_1}$

Bei dieser Bemessung von C fällt die Ausgangsspannung bei der Übergangsfrequenz  $f_{\ddot{u}}$  um nahezu 3 dB ab.

#### 5.2. Baßsenkung bei kapazitiver Grunddämpfung

In **Bild 7b** vergrößern beide Kondensatoren C1 und C2 ihren kapazitiven Widerstand im gleichen Verhältnis nach kleineren Frequenzen zu. Der dem zweiten Kondensator C2 parallel geschaltete Widerstand R hindert jedoch ein Anwachsen des Widerstands der Parallelschaltung über den Wert von R hinaus. Deshalb fällt bei kleinen Frequenzen an der Parallelschaltung weniger Spannung ab

als bei hohen Frequenzen. Berechnung des Widerstands R:  $R = \frac{1}{2\pi f_{\ddot{u}} C_2}$

Bei der Übergangsfrequenz ist die Ausgangsspannung um etwa 3 dB kleiner geworden.

### 6. Veränderliche Filter in Brückenschaltung

Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf Schaltungen, die eine Grunddämpfung mit ohmschen Widerständen enthalten. Diese Schaltungen werden in der Praxis vorgezogen. Beim Höhenfilter hat die kapazitive Grunddämpfung nämlich einen schwerwiegenden Nachteil: Der Gesamtwiderstand des Filters verringert sich stark bei höheren Frequenzen. Im Ausgang einer Röhre schwächt aber ein absinkender Arbeitswiderstand die Verstärkung.

Das veränderliche Höhenfilter soll gestatten, den Frequenzgang bei den Höhen beliebig zwischen der maximalen Höhenanhebung und der größten Höhensenkung zu variieren. Das Tiefenfilter soll eine beliebige Einstellung des Frequenzganges bei den Tiefen gewähren.

Nach einem älteren Patent (Nr. 743 930 vom 5. 1. 1944) läßt sich ein veränderliches Filter als Brückenschaltung aufbauen. Der linke Brückenzweig des Höhenfilters in **Bild 8a** besteht aus einer RC-Schaltung zur Höhensenkung, der rechte Zweig aus einer Schaltung zur Höhenanhebung. Die Spannung zwischen dem Punkt A und Masse wird oberhalb der Übergangsfrequenz mit wachsender Frequenz kleiner, während die Spannung zwischen Punkt B und Masse gleichzeitig steigt. Die Punkte A und B sind durch ein Potentiometer  $R_p$  verbunden. Je nach Schleiferstellung lassen sich die Höhen zwischen den Maximalwerten beliebig anheben oder absenken. Bei Schleifermittelstellung zeigt die Ausgangsspannung einen geradlinigen Frequenzgang.

Entsprechend ist das Tiefenfilter aufgebaut (**Bild 8b**). Der linke Brückenweig dient zum Absenken, der rechte zum Anheben der Tiefen. Auch hier wieder der Grundgedanke: Die Spannungen zwischen den Punkten A und B gegen Masse ändern sich gegensinnig bei sinkender Frequenz. Mit dem Potentiometer  $R_p$  kann zwischen  $\pm 20$  dB jeder Grad der Tiefenanhebung oder Tiefensenkung eingestellt werden.

Der Querwiderstand des Potentiometers muß so groß sein, daß die Brückenweige sich nicht gegenseitig beeinflussen. Wäre der Widerstand  $R_p$  sehr klein, im Extremfall  $R_p = 0 \Omega$ , dann wäre lediglich eine ohmsche und kapazitive Grunddämpfung parallel geschaltet. Die verbundenen Punkte A und B würden nun gegenüber Masse eine frequenzunabhängige Spannung aufweisen, Praktisch wählt man den Wert von  $R_p$  10- bis 20mal größer als den von  $R_2$ . (Zu groß darf  $R_p$  allerdings auch nicht werden, weil hochohmige Stromkreise in Verstärkerschaltungen brummanfällig sind).

Um ein Filter zu berechnen, muß von dem erforderlichen Eingangswiderstand ausgegangen werden. Arbeitet die vorhergehende Röhre wie üblich als Katodenbasisstufe, so kann als Richtwert  $500 \text{ k}\Omega$  angenommen werden. Im Filter sind die Spannungsteiler zur Grunddämpfung parallel geschaltet. Man erhält also für  $R_1 + R_2 = 1 \text{ M}\Omega$ . Bei einer Grunddämpfung von  $20 \text{ dB}$  wird  $R_2$  zu  $100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_1$  zu  $900 \text{ k}\Omega$ . Ein Potentiometerwiderstand  $R_p = 20 \cdot R_2 = 2 \text{ M}\Omega$  ist groß genug, um eine gegenseitige Beeinflussung der Brückenweige zu verhindern. Die Kapazitäten der Kondensatoren richten sich nach den gewählten Übergangsfrequenzen und den Widerständen, mit denen sie zusammengeschaltet sind. Die Berechnung erfolgt nach den bereits besprochenen Formeln. Zweckmäßig wird beim Höhenfilter für Anheben und Absenken dieselbe Übergangsfrequenz genommen, auch das Tiefenfilter sollte nur eine einzige Übergangsfrequenz haben.

Beide Übergangsfrequenzen wählt man in der Nähe einer mittleren Frequenz. Mit Ausnahme dieser Frequenz soll die Klangeinstellung den gesamten Hörbereich beeinflussen können. Nun kann jedoch bei RCFiltern die Größe der Ausgangsspannungsänderung in Abhängigkeit von der Frequenz eine bestimmte Grenze nicht überschreiten. Der Widerstand eines Kondensators verringert sich bei der zweifachen Frequenz um die Hälfte. Bei einer Höhenanhebung zum Beispiel kann sich bei doppelter Frequenz die Ausgangsspannung höchstens verdoppeln. Für diese Erscheinung hat sich der Fachausdruck  $6 \text{ dB}$  pro Oktave eingebürgert.  $6 \text{ dB}$  ist das logarithmische Maß für zweifach (oder mit negativem Vorzeichen für  $1/2$ ), unter einer Oktave versteht man die doppelte Frequenz.

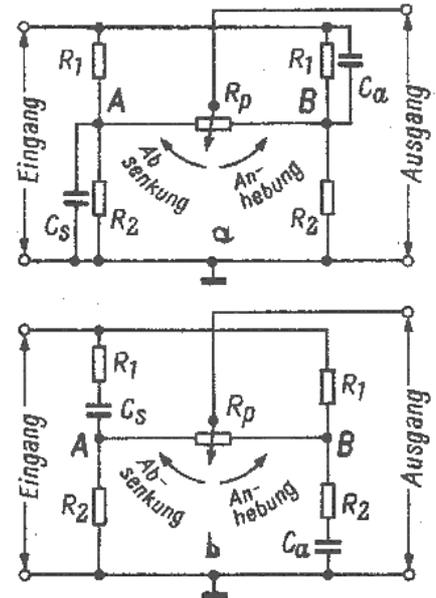
Teilen wir den Hörbereich in Oktaven (Frequenzverhältnis  $1 : 2$ ) auf, so ergibt sich folgende Reihe:

Frequenz	62,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16 000	Hz
Oktave		1.	2.	3.	4.	↑	5.	6.	7.	8.
							mittlere Frequenz			

Beim Festlegen der mittleren Frequenz ist nicht der Wert der Frequenz in Hertz, sondern das Frequenzverhältnis entscheidend. Das Verhältnis der mittleren zur höchsten Frequenz muß also gleich dem Verhältnis der mittleren zur tiefsten Frequenz sein. Die mittlere Frequenz ist folglich das geometrische Mittel von tiefster und höchster Frequenz.

$$f_m = \sqrt{f_u \cdot f_o} = \sqrt{62,5 \cdot 16000} = \sqrt{100000} = 1000 \text{ Hz}$$

Die eingesetzten Zahlenwerte entsprechen dabei den Grenzen, wie man sie etwa für Verstärkeranlagen vorsieht.



**Bild 8.** Klangfilter in Brückenschaltung; a = zum Einstellen der Höhen, b = zum Einstellen der Tiefen

## 7. Veränderliche Filter mit vereinfachter Schaltung

Eine andere Schaltung, die heute vielfach zur Klangeinstellung verwendet wird, kommt mit weniger Bauelementen aus.

Das Höhenfilter zeigt **Bild 9a**. Mit dem Potentiometer  $R_p$  kann der Kondensator  $C_a$  einmal parallel zum Widerstand  $R_1$  oder zum anderen die Kapazität  $C_s$  parallel zum Widerstand  $R_2$  gelegt werden. Befindet sich der Schleifer des Potentiometers am oberen Anschlag (**Bild 9b**), so sind  $C_a$  und  $R_1$  parallel geschaltet (Höhenanhebung, vgl. **Bild 4a**). Der Widerstandswert von  $R_p$  ist so groß, daß die Kapazität  $C_s$  keinen

störenden Einfluß auf die Höhenanhebung haben kann ( $R_p$  und  $C_s$  sind in **Bild 9b** gestrichelt gezeichnet, um anzudeuten, daß sie elektrisch keine Wirkung ausüben).

Steht der Schleifer am unteren Anschlag (**Bild 9c**), so liegt der Kondensator  $C_s$  parallel zum Widerstand  $R_2$  (Höhensenkung, vergleiche **Bild 5a**). Der hohe Potentiometerwiderstand  $R_p$  verhindert, daß  $C_a$  die Höhensenkung beeinflusst. Zwischen beiden Schleiferstellungen kann jeder Grad der Anhebung oder Absenkung eingestellt werden. Die Schaltung **Bild 10a** erlaubt, die Bässe beliebig anzuheben oder abzusenken. In der oberen Schleiferstellung (**Bild 10b**) ist der Kondensator  $C_s$  kurzgeschlossen. Der Kondensator  $C_a$  liegt in Reihe mit dem Widerstand  $R_2$ . Der Potentiometerwiderstand  $R_p$  (in **Bild 10b** gestrichelt gezeichnet) ist so groß, daß seine Parallelschaltung zu  $C_a$  elektrisch wirkungslos bleibt. Damit zeigt sich das Bild der Grundschaltung zur Baßanhebung (vgl. **Bild 6a**).

In unterer Schleiferstellung (**Bild 10c**) ist die Kapazität  $C_a$  kurzgeschlossen und der Kondensator  $C_s$  in Reihe mit dem Widerstand  $R_1$  geschaltet (Baßsenkung, vgl. **Bild 7a**). Der große Wert von  $R_p$  parallel zu  $C_s$  stört die Baßsenkung nicht.

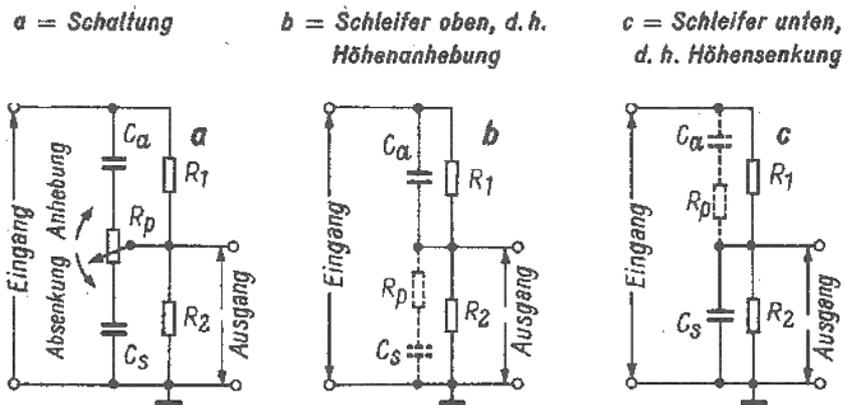


Bild 9. Vereinfachte Schaltung eines Höhenfilters

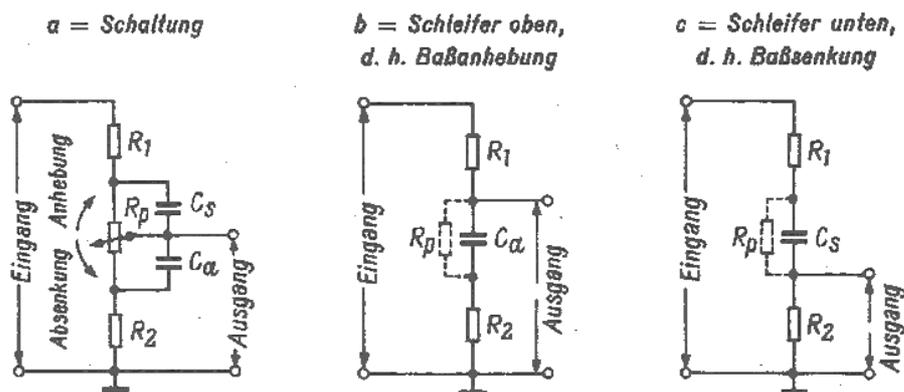


Bild 10. Vereinfachte Schaltung eines Baßfilters

Die Dimensionierung der eben beschriebenen Filter erfolgt genau wie bei den Filtern in Brückenschaltung. Zwischen Höhen- und Tiefenfilter kann eine Röhre angeordnet sein (vollständige Entkopplung) oder die Eingänge beider Filter werden parallel geschaltet und die Ausgänge über genügend große Entkopplungswiderstände dem Gitter einer Röhre zugeführt.

## 8. Beispiele für Klangeinstellsdialtungen

### 8.1. Im Röhrenverstärker

**Bild 11** zeigt eine Klangeinstellschaltung in einem Röhrenverstärker, die nach den besprochenen Gesichtspunkten aufgebaut ist. Höhen- und Baßfilter (nach **Bild 9** und **10**) sind eingangseitig parallel geschaltet. Die Ausgänge sind über den Entkopplungswiderstand  $R_a$  verbunden, der groß genug (etwa  $10 \cdot R_2$ ) ist, um eine gegenseitige Beeinflussung zu verhindern. Die Reihenschaltung

der Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  besorgt die Grunddämpfung. Sie wirkt gleichzeitig für das Höhenfilter, weil bei hohen Frequenzen die Kapazitäten  $C_{S2}$  und  $C_{A2}$  praktisch einen Kurzschluß bedeuten.

Bei der Dimensionierung der Einzelteile ist zunächst zu beachten, daß der Spannungsteiler  $R_1+R_2$  die vorausgehende Röhre nicht zu sehr belastet. Bei dieser Betrachtung muss der wirksame Innenwiderstand der Röhre in Rechnung gestellt werden, der sich aus der (wechselstrommäßigen) Parallelschaltung des Röhreninnenwiderstands und des Arbeitswiderstands ( $R_a = 200 \text{ k}\Omega$ ) ergibt.

Die Größe des Potentiometerwiderstands  $R_{P2}$  des Baßfilters errechnet sich nach folgender Überlegung: Bei sehr kleinen Frequenzen soll mit  $R_{P2}$  einen Bereich von insgesamt 40 dB (entspricht einer Ausgangsspannungsänderung von 1 : 100) überstrichen werden (vgl. **Bild 1**). Der Potentiometerwiderstand muß also rund 100mal größer sein als der Wert von  $R_2$ . Das Potentiometer  $R_{P1}$  des Höhenfilters braucht ebenfalls diesen hohen Widerstandswert, weil sonst die Frequenzkurve des Filters bei sehr hohen Frequenzen zu stark vom Innenwiderstand der Röhre beeinflusst wird.

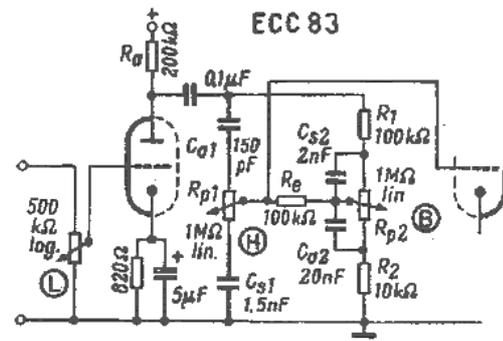


Bild 11. Klangeinsteller für einen Röhrenverstärker

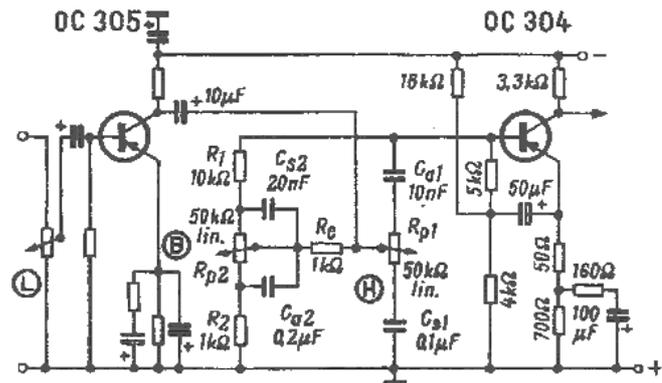


Bild 12. Klangeinsteller für einen Transistorverstärker

### 8.2. Klangeinstellung beim Transistorverstärker

Bei Schaltungen mit Transistoren muß – im Gegensatz zu den Röhrenschaltungen – zusätzlich noch die ausgangsseitige Belastung durch die niederohmige Basis-Emitterstrecke des Transistors berücksichtigt werden. Man schließt deshalb das Klangfilter umgekehrt an (Ausgang mit Eingang vertauscht) wie **Bild 12** zeigt. Diese Art der Anschaltung ist wegen der niederohmigen Belastung des Klangfilters durch den nachfolgenden Transistor günstiger als die bei Röhren übliche. Der Frequenzgang des Filters ändert sich durch das Umpolen nicht. Die Grunddämpfung wird durch die Reihenschaltung des Widerstandes  $R_1$  mit dem wirksamen Eingangswiderstand des Transistors (etwa 1 kΩ) hergestellt. Bei 20 dB Dämpfung ergibt sich also für  $R_1$  ein Wert von rund 10 kΩ. Im übrigen gelten für die Bemessung der Einzelteile die gleichen Formeln wie bei der entsprechenden Röhrenschaltung.