# 5 Audion mit Rückkopplung

## 5.1 Untersuchungsergebnisse für ein KW-Audion

Im Rahmen einer Untersuchung der Wirkungsweise eines rückgekoppelten Audions für Kurzwelle [29] wird darauf hingewiesen, daß die allgemeine Behauptung *„Mit der Rückkopplung wird der Kreis entdämpft und damit die Trennschärfe erhöht“* so nicht zutrifft.

Als Nachweis dafür werden die folgenden Meßergebnisse benannt.

- In einem „freien“ Kanal ist der Sender des Nachbarkanals zu hören. Auch wenn die Rückkopplung des Audions „angezogen“ wird, bleibt die Lautstärke des Nachbarkanal–Senders gleich. Damit also keine Erhöhung der Selektivität.
- In einem „belegten“ Kanal sind der Nutz–Sender und der Nachbarkanal–Sender zu hören. Wird nun die Rückkopplung „angezogen“ erhöht sich nur die Lautstärke des Nutz–Senders. Daraus resultiert eine scheinbare Erhöhung der Selektivität.

Darus werden folgende Schlußfolgerungen gezogen.

- Durch die Rückkopplung beim Audion ändern sich die Eigenschaften des Schwingkreises nicht.
- Die Rückkopplung beeinflußt aber die Signale, speziell die Spektralanteile bei der Resonanzfrequenz $\omega_0$ des Schwingkreises.

## 5.2 Audion als Regelkreis

Um die Wirkungsweise des rückgekoppelten Audions besser verstehen zu können, wird zunächst eine allgemeinere Form der Rückkopplung betrachtet, wie sie typisch für Regelkreise ist.

Zunächst muß der Begriff „Rückkopplung“ präzisiert werden. Es gibt

- negative Rückkopplung = Gegenkopplung (i.a. bei Regelkreisen angewendet)
- positive Rückkopplung = Mitkopplung (z.B. beim Audion oder beim Oszillator angewendet)

Eine Blockstruktur, wie sie beispielsweise als Regelkreis vorkommt, zeigt Bild 5.1.

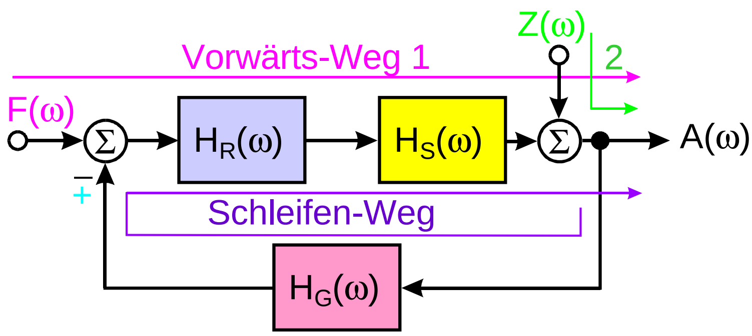


Bild 5.1: Rückkopplungs–Stuktur mit den Signal–Wegen; „–“: Gegenkopplung; „+“: Mitkopplung

- $F(\omega)$ ist die Eingangsgröße (Führungsgröße)
- $A(\omega)$ ist die Ausgangsgröße
- $Z(\omega)$ ist eine Störgröße (bei einer Regelung unerwünscht)
- $H_R(\omega)$ ist der „Regler“ (Dieser muß so dimensioniert werden, daß die gesamte Schaltung vorgegebene Kriterien einhält.)
- $H_S(\omega)$ ist die „Stecke“ (Das ist die vorgegebene Schaltung, der mit Hilfe der Regelkreisstruktur ein bestimmtes Verhalten „verpaßt“ werden soll.)

- $H_G(\omega)$ ist die „Rückführung“ (in der Praxis oft ein Meßwandler, der die Ausgangsgröße in die gleiche Art [z.B. Spannung] wie die Eingangsgröße wandelt. Bei einem Operationsverstärker entspricht das der „äußeren Beschaltung“.)
- $\Sigma$ ist eine „Summierstelle“.
- Wird die Rückführ-Schleife über „–“ geschlossen, entsteht eine Gegenkopplung. (Regelkreis)
- Wird die Rückführ-Schleife über „+“ geschlossen, entsteht eine Mitkopplung. (Audion, Oszillator)

Markiert sind die verschiedenen „Wege“ der Signale.

- Vorwärts-Weg 1 (für die Eingangsgröße [Führungsgröße]): .......................... $H_V(\omega) = H_R(\omega)H_S(\omega)$
- Vorwärts-Weg 2 (für die Störung): ........................................................... $H_Z(\omega) = 1$
- Schleifen-Weg = Kreisverstärkung: ......................................... $H_O(\omega) = H_G(\omega)H_R(\omega)H_S(\omega)$

Für die Übertragungsfunktion $G_F(\omega)$ bzw. $G_Z(\omega)$ der obigen Regelkreisstruktur ergibt sich allgemein formuliert:

$$\textbf{Übertragungsfunktion} = \frac{\textbf{Vorwärts-Weg}}{1 \pm \textbf{Schleifen-Weg}} \tag{5.1}$$

$$G_F(\omega) = \frac{H_V(\omega)}{1 \pm H_O(\omega)} \quad \textbf{Führungs–Übertragungsfunktion} \tag{5.2}$$

$$G_Z(\omega) = \frac{H_Z(\omega)}{1 \pm H_O(\omega)} \quad \textbf{Störungs–Übertragungsfunktion} \tag{5.3}$$

„+“ wenn „–“ an der Summierstelle $\Sigma$ ; „–“ wenn „+“ an der Summierstelle $\Sigma$

### 5.2.1 Beispiel mit Gegenkopplung

Für den Spezialfall eines beschalteten Operationsverstärkers oder eines NF-Verstärkers mit Gegenkopplung, bei dem der Betrag der Kreisverstärkung $|H_O(\omega)| \rightarrow \infty$ geht, gilt damit:

- $G_F(\omega) \rightarrow 1/H_G(\omega)$, Frequenzgang ist also nur noch von der **äußeren Beschaltung** abhängig.
- $G_Z(\omega) \rightarrow 0$ , also Störung (durch Nichtlinearitäten) verschwindet.

## 5.3 Mitkopplung beim Audion

Nach dem Exkurs zu der Regelungstechnik nun zurück zu dem Problem mit dem Audion. Hier hat man i.a. eine positive Rückkopplung, also eine Mitkopplung, Bild 5.2.

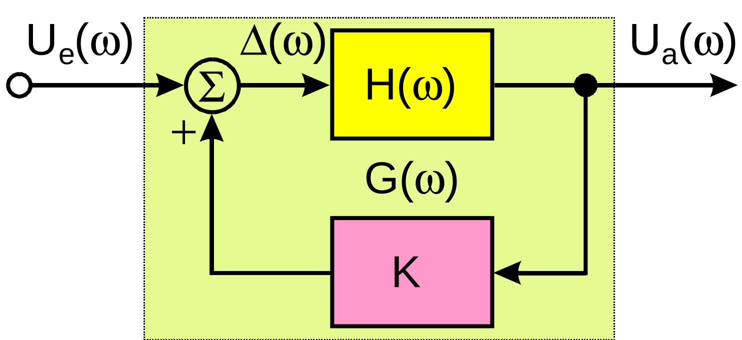


Bild 5.2: Blockstruktur des Audions als „Mitkopplung“

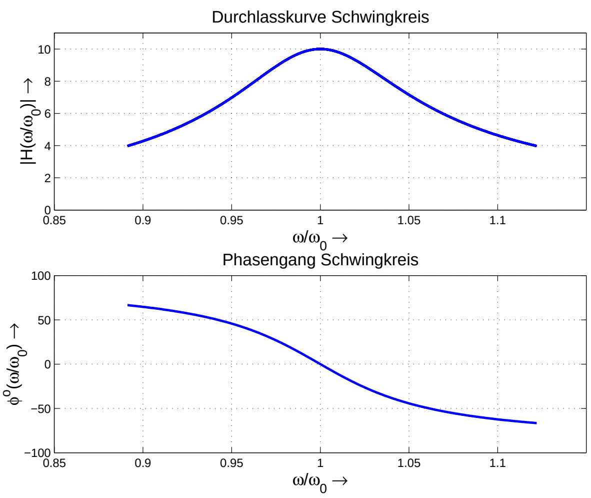


Bild 5.3: Amplitudengang $|H(\omega/\omega_0)|$ und Phasengang $\phi(\omega/\omega_0)$ des Schwingkreises (mit Güte $Q = 10$); $\omega = \omega_0$ ist die Resonanzfrequenz. Die Frequenzachse ist auf $\omega_0$ normiert.

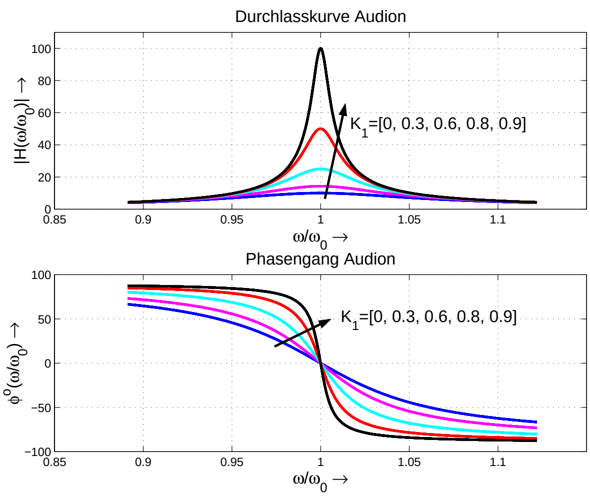


Bild 5.4: Amplitudengang $|G(\omega/\omega_0)|$ und Phasengang $\phi(\omega/\omega_0)$ des Audions; $\omega = \omega_0$ ist die Resonanzfrequenz. Die Frequenzachse ist auf $\omega_0$ normiert. $K_1$ ist die Kreisverstärkung $H_O(\omega_0)$.

Wegen der Anschaulichkeit wurden folgende Vereinfachungen gemacht. Der Block $H(\omega)$ im Vorwärtsweg habe die Übertragungsfunktion eines Parallelschwingkreises, während der Rückführblock $K$ frequenzunabhängig sein soll. Die gesamte Übertragungsfunktion des Audions wird mit $G(\omega)$ bezeichnet.

Für die Übertragungsfunktion $H(\omega)$ des Schwingkreises sei ein Verlauf gemäß Bild 5.3 angenommen.

Die Schwingbedingung ist erreicht (das Audion „pfeift"), wenn die Kreisverstärkung $H(\omega) \cdot K = 1$ wird. Da der Block $K$ in der Rückführung frequenzunabhängig sein soll, wird die Schwingbedingung bei Vergrößerung des Wertes von $K$ bei der Frequenz $\omega = \omega_0$ erreicht ($\omega/\omega_0 = 1$), wie aus der Resonanzkurve sofort erkennbar ist.

Eine Sinus-Schwingung der Frequenz $\omega_0$ erleidet beim Durchgang durch den Schwingkreis keine Phasendrehung, wie der Kurve des Phasengangs $\phi(\omega/\omega_0)$ entnommen werden kann. Somit wird sie phasenrichtig an der Summierstelle addiert.

Wenn nun die Kreisverstärkung bei der Frequenz $\omega_0$ (im Grenzfall) genau gleich 1 ist, wird keine Eingangsspannung mehr benötigt, um die Schwingung aufrecht zu erhalten. Das ist die Schwingbedingung.

Der Wert $K$ sei nun aber so gewählt, daß das Audion (noch) nicht schwingt. Es werde eine sinusförmige Spannung mit der Frequenz $\omega = 1,05\ \omega_0$ auf den Eingang gegeben. Bei dieser Frequenz ist der Amplitudengang des Schwingkreises auf das ca. $0,7$ fache des Maximalwertes abgefallen. Gleichzeitig hat die rückgeführte Spannung aber auch noch einen Phasenwinkel von ca. $-45^0$. Dadurch addieren sich die Spannungen am Summenpunkt $\Sigma$ nunmehr vektoriell, wodurch der Betrag der Summenspannung geringer wird als bei algebraischer Addition.

Trägt man den Quotienten, also das Verhältnis, $U_a(\omega)/U_e(\omega) = G(\omega)$ auf, so ergibt sich damit der folgende Amplituden– und Phasengang für die mitgekoppelte Struktur $G(\omega)$ [der grün unterlegte Block in Bild 5.2], in Abhängigkeit von der Kreisverstärkung bei der Resonanzfrequenz $\omega_0$, $|H_O(\omega_0)| = K_1$, Bild 5.4.

Die stärkere Resonanzüberhöhung bei „angezogener" Rückkopplung entsteht durch die vektorielle Addition der einzelnen Frequenzkomponenten. Nur die Frequenzkomponente auf exakt der Resonanzfrequenz $\omega_0$ wird „phasenrein" addiert und liefert den größten Betrag, während alle sonstigen aufgrund der Dämpfung des Schwingkreises neben der Mittenfrequenz und wegen ihrer Phasendrehung nur geringere Beiträge liefern.

Die Durchlaßkurven $|G(\omega)|$ werden aus einem Quotienten von Ausgangsspannung $U_a(\omega)$ zu Eingangsspannung $U_e(\omega)$ erhalten und nicht etwa durch eine physikalische Änderung der Eigenschaften des Schwingkreises $H(\omega)$. Dieser behält seine Eigenschaften bei - wird also tatsächlich nicht „entdämpft", unabhängig davon, wie groß die Mitkopplung $K$ eingestellt wird.

## 5.4 Einfluß von Amplitudengang und Phasengang

Bei einem Schwingkreis sind die Form des Amplitudengangs und die Form des Phasengangs eindeutig miteinander verknüpft. Physikalisch lassen sich die Einflüsse der beiden auf die Übertragungsfuktion des Audions nicht auftrennen. Diese Auftrennung geht jedoch in der Simulation, wo man keine Rücksicht auf physikalische Realisierbarkeit nehmen muß.[1]

### 5.4.1 Simulation 1: Amplitudengang wie der Schwingkreis, aber Phase identisch Null

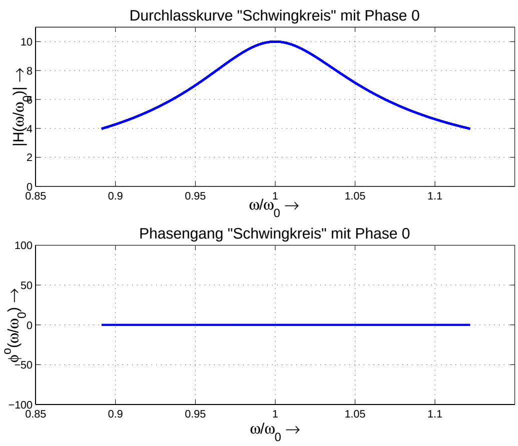


Bild 5.5: Amplitudengang des Schwingkreises aber Phasengang identisch Null

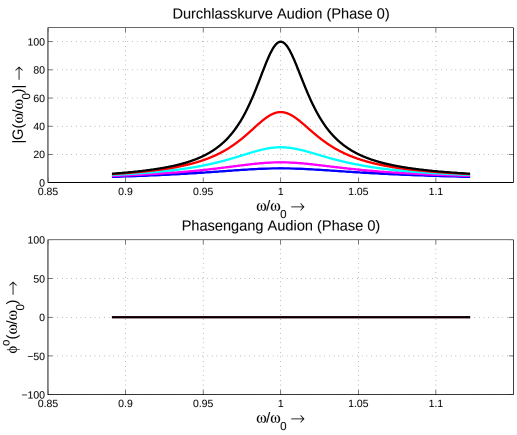


Bild 5.6: Amplitudengang $|G(\omega/\omega_0)|$ und Phasengang $\phi(\omega/\omega_0)$ des Audions mit einem theoretischen Schwingkreis mit Phase Null.

Auch dieser (theoretische) Fall ergibt eine Resonanzüberhöhung bei $\omega_0$, die Abhängig vom Wert $K_1$ der Kreisverstärkung $H_O(\omega_0)$ ist, Bilder 5.5 und 5.6.

Ein Vergleich mit dem Ergebnis mit dem realen Schwingkreis, Bild 5.4, zeigt, daß die Resonanzüberhöhungen auf $\omega_0$ identische Werte erreichen, jedoch wegen der algebraischen statt der vektoriellen Addition in der Summierstelle die Resonanzkurven breiter werden.[2]

### 5.4.2 Simulation 2: Amplitudengang (Durchlaßkurve) rechteckförmig konstant, aber Phase wie der Schwingkreis

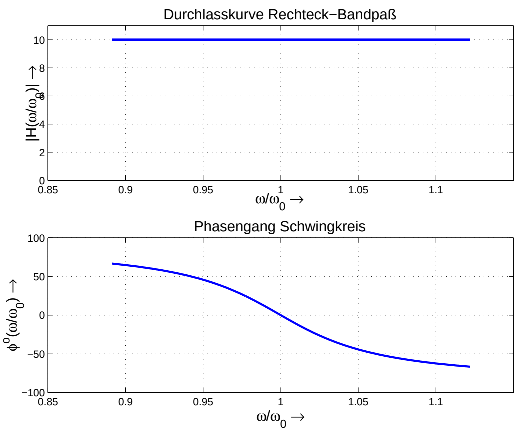


Bild 5.7: Amplitudengang konstant aber Phasengang identisch zu dem des Schwingkreises

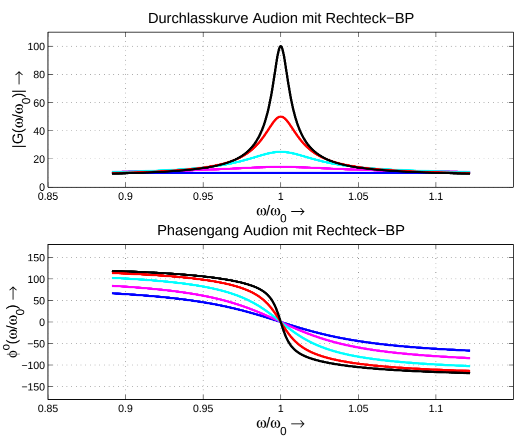


Bild 5.8: Amplitudengang $|G(\omega/\omega_0)|$ und Phasengang $\phi(\omega/\omega_0)$ des Audions mit einem theoretischen Schwingkreis mit rechteckförmiger Durchlaßkurve.

[1] Das ist auch die Gefahr jeder Simulation, daß man aufpassen muß, um nicht an der physikalischen Realität vorbei zu simulieren!
[2] Die Werte für $K_1$ und die entsprechenden Farben sind identisch zu Bild 5.4.

Bei der Summation sind jetzt alle Amplituden gleich, aber sie werden wegen der Phasendrehung vektoriell summiert.

An diesen Kurven ist deutlich erkennbar, daß die Phase und damit die vektorielle Addition zu schmaleren Durchlaßkurven des Audions führt. Der Einfluß der Phase ist hier also größer als der der Amplitude des Schwingkreises!

## 5.5 Schwingkreisgüte contra Rückkopplung

Theoretisch kann bei einem Audion ein Schwingkreis mit geringer Güte zum Einsatz kommen, da mit Hilfe der Rückkopplung das Audion so weit entdämpft werden kann, daß de facto eine Durchlaßkurve wie bei einem Schwingkreis mit sehr hoher Güte entsteht. In der Praxis zeigt es sich aber, daß es vorteilhaft ist, die Güte des Schwingkreises möglichst hoch zu wählen. Zum Nachweis der theoretischen Aussage werden berechnete Amplituden- und Phasenverläufe eines Schwingkreises und einer Audionschaltung mit einander verglichen.

Die Güten der untersuchten Schwingkreise betragen $Q = 10, 20, 50, 100, 200$. Die Durchlaßkurven sind im logarithmischen Maßstab dargestellt, damit die Verläufe außerhalb der Resonanzfrequenz besser zu sehen sind, Bild 5.9. Diese Kurven werden nun verglichen mit einer Mitkopplungs-Struktur (entsprechend zum rückgekoppelten Audion), wobei der verwendete Schwingkreis eine Güte $Q = 10$ hat.

Die Rückkopplung (und damit die Kreisverstärkung $H_O(\omega_0) = K_1$) wird hierbei so gewählt, daß das Audion die gleichen Durchlaßkurven hat wie zuvor die Schwingkreise alleine, Bild 5.10. Und in der Tat, die beiden Kurvenscharen sind (bis auf Rundungsfehler bei der Berechnung) identisch.[3]

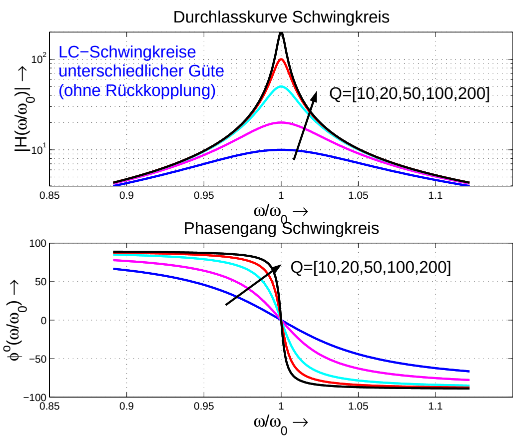


Bild 5.9: Amplitudengänge (in logarithmischer Darstellung) und Phasengänge von Schwingkreisen mit Güten $Q = [10, 20, 50, 100, 200]$.

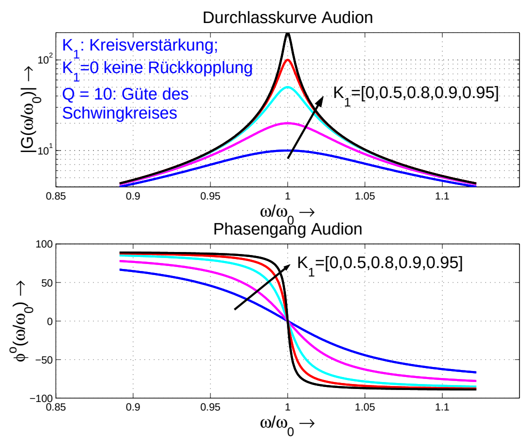


Bild 5.10: Die Amplitudengänge $|G(\omega/\omega_0)|$ (in logarithmischer Darstellung) und die Phasengänge $\phi(\omega/\omega_0)$ des Audions mit einer Kreisverstärkung $H_O(\omega_0) = K_1 = [0, 0.5, 0.8, 0.9, 0.95]$.

Da man mit Hilfe der Rückkopplung bei einem Audion mit einem Schwingkreis geringer Güte die gleiche Resonanzüberhöhung erreichen kann, wie sie ein Schwingkreis entsprechend hoher Güte hätte, könnte man schlußfolgern, daß die Schwingkreisgüte eines Audions von untergeordnetem Interesse sei.

Rein theoretisch stimmt das auch, jedoch gibt es praktische Gesichtspunkte, die eine möglichst hohe Güte für den Schwingkreis eines Audions nahelegen. Man erkennt das bereits aus dem Amplitudengang Bild 5.10. Um bei einem Audion mit Schwingkreisgüte $Q = 10$ z.B. eine effektive Güte von $Q = 100$ zu bekommen (entspricht einer Resonanzüberhöhung $M = 10$), ist eine Kreisverstärkung $H_O(\omega_0) = K_1 = 0.9 \doteq 90\%$ erforderlich. Bezogen auf die Kreisverstärkung ist dieser Wert nur noch $10\%$ von der Stabilitäts– oder Schwinggrenze $K_1 = 1$ entfernt.

Aus diesem Zahlenwert alleine ist noch nicht die Schwierigkeit zu erkennen, die bei der Einstellung der Rückkopplung dabei entsteht. Hierzu muß der Zusammenhang zwischen der Resonanzüberhöhung $M$ und der Kreisverstärkung $H_O(\omega_0) = K_1$ gemäß den Gleichungen (5.1) näher betrachtet werden. Eine graphische Auswertung ergibt die Kurven in den Bildern 5.11.

Aus diesen Darstellungen ist zu erkennen, daß die Steilheit dieser Kurven ab einer Kreisverstärkung von ca. $90\%$ sehr stark zunimmt. Auch ist die Steilheit der Kurven links und rechts von einem Sollpunkt (z.B. $90\%$) stark unterschiedlich.

[3] Da die einzige Frequenzabhängigkeit durch den Schwingkreis entsteht, kann theoretisch auch kein anderes Ergebnis herauskommen.

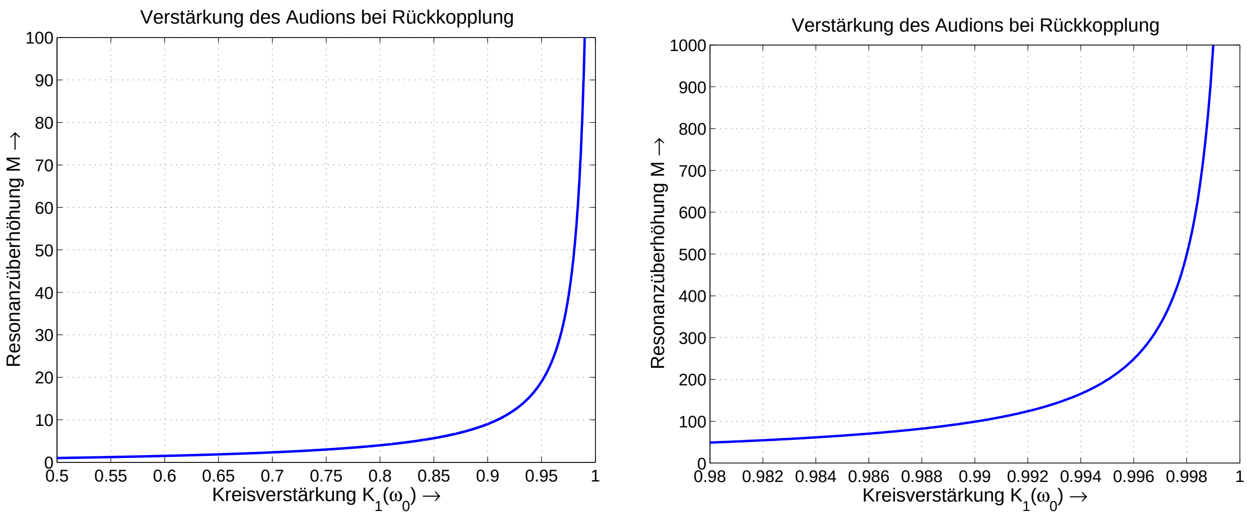


Bild 5.11: Die Resonanzüberhöhung $M$ des rückgekoppelten Audions als Funktion der Kreisverstärkung $H_O(\omega_0) = K_1$

- Infolgedessen sind Werte in dieser Größenordnung in der Praxis nur sehr schwer genau einzustellen.
- Veränderungen (Schwankungen) der Größe der Kreisverstärkung in Folge z.B. von Spannungsschwankungen, Änderung der Antennen–Ankopplung, Kapazitäts–Schwankungen („Hand-Empfindlichkeit“: Theremin) führen dann leicht zum Schwingen, aber auch zu Änderungen der Resonanzfrequenz.

Hat in einem Gegen–Beispiel der Resonanzkreis eines Audions die Güte $Q = 50$, so wird nur eine Kreisverstärkung $K_1 = 0.5$ benötigt, was eine Resonanz–Überhöhung von $M = 2$ und damit eine effektive Güte des rückgekoppelten Audions von $Q = 100$ ergibt. Wie aus den Kurven in den Bildern 5.11 zu sehen ist, sind diese hier sehr viel flacher. Man hat daher in der Praxis dann auch kein Problem, die Rückkopplung geeignet einzustellen.

- Bei einem Audion sollte daher die Güte des Schwingkreises möglichst hoch sein.[4]

## 5.6 Weitabselektion

Die Weitabselektion eines Empfängers, hier des Audions, wird wesentlich durch die Steigung der Durchlaßkurven des Schwingkreises außerhalb des Bereichs der Resonanzüberhöhung bestimmt. Da 1 Schwingkreis 2 Energiespeicher hat ($L$ & $C$), kann die Steilheit der Durchlaßkurven asymptotisch, d.h. außerhalb des Bereiches mit der Resonanzüberhöhung, nur maximal $\pm 20$ dB/Dekade betragen. ($+20$dB/Dek. unterhalb von $\omega_0$ und $-20$dB/Dek. oberhalb)

Wie aus den Amplitudenkurven in Bild 5.10 aufgrund der logarithmischen Darstellung erkennbar ist, trifft die obige Feststellung unabhängig von der Güte $Q$ bzw. der (durch die Rükkopplung) eingestellten Kreisverstärkung $K_1$ zu. Das ist eine weitere Bestätigung für die festgestellte Unmöglichkeit, die Weitabselektion durch „Anziehen“ der Rückkopplung zu verbessern.[29]

Verwendet ein Empfänger 2 Schwingkreise (Zweikreiser) ist die asymptotische Steigung $\pm 40$dB/Dekade, und bei 3 Schwingkreisen (Dreikreiser) wird sie $\pm 60$dB/Dekade, usw.[5] Man braucht also weitere Schwingkreise um die Weitabselektion zu verbessern.

Durch die Verwendung mehrerer Schwingkreise gibt es zusätzliche Freiheitsgrade, die es ermöglichen, die Form der Durchlaßkurve günstig (in Richtung rechteckförmig) zu beeinflussen. Da es in der Praxis unüberwindliche Schwierigkeiten bereitet, abstimmbare Filter mit vorgegebener Durchlaßkurve zu bauen, werden solche Filter auf einer festen Zwischenfrequenz realisiert, womit man dann beim Überlagerungsempfänger (Super) angekommen ist.

[4] Schwingkreise hoher Güte erreicht man auf MW & LW mit Spulen mit Litze und Drehkondensatoren mit Luft als Dielektrikum.

[5] Bei Geradeaus–Empfängern mit 3 oder mehr Kreisen wird i.a. kein rückgekoppeltes Audion mehr verwendet, sondern meist ein Anodengleichrichter.