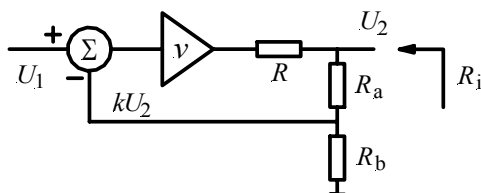


10.5.6 Gegenkopplung

Wenn bei einem Verstärker ein Teil des Ausgangssignals zum Eingang zurückgeführt und dort dem Eingangssignal überlagert wird, spricht man von **Rückkopplung**. Gleichphasige Rückkopplung heißt **Mitkopplung**, gegenphasige Rückkopplung heißt **Gegenkopplung**. Da es zwei Ausgangssignale gibt (Spannung und Strom) und dementsprechend auch zwei Eingangssignale, lassen sich vier verschiedene Gegenkopplungsarten definieren. Bei der typischen Gitarrenverstärker-Endstufe ist vor allem die Spannungs-Spannungs-Gegenkopplung anzutreffen: Ein Teil der Ausgangsspannung wird abgegriffen und der Eingangsspannung überlagert. Durch diese Überlagerung entsteht ein **Regelkreis**: Sinkt die Ausgangsspannung (z.B. bei Belastung) ab, wird auch weniger Spannung gegengekoppelt – dadurch ergibt sich eine größere Verstärkung, sodass der Spannungsverlust zum Teil ausgeglichen wird. Diese spezielle Gegenkopplung (die Schaltungstechnik spricht von g_{21} -Gegenkopplung) stabilisiert den Spannungsverstärkungsfaktor, und reduziert gleichzeitig den linearen Innenwiderstand*. Weitere Wirkungen der g_{21} -Gegenkopplung sind: Verbreiterung der Kleinsignal-Bandbreite, und Verringerung des Klirrfaktors.



$$R_i = (R_a + R_b) // R_{gk}, \quad R_{gk} = R/(1 + kv)$$

$$v_U = U_2 / U_1 = \frac{v}{1 + kv + R/R_L}$$

Abb. 10.5.15: Prinzipschaltbild einer Rückkopplungsschleife (links). Mit positiver Verstärkung v ergibt sich eine Gegenkopplung. Die wichtigsten Größen sind Innenwiderstand R_i und Spannungsverstärkungsfaktor v_U .

In **Abb. 10.5.15** bestimmt k den Grad der Rückkopplung, d.h. ihre Effizienz. Für $k = 0$ ist die Gegenkopplung wirkungslos, mit zunehmendem k steigt die Wirkung der Gegenkopplung. Ohne Gegenkopplung stellt R den Innenwiderstand der Endstufe dar, der bei Röhrendstufen deutlich größer als der Lastwiderstand ist. Beim **Fender Super-Reverb** ergibt sich z.B. ohne Gegenkopplung bei 1 kHz $R_i = R = 180 \Omega$, und $v = 160$, sodass mit einer 8- Ω -Belastung (R_L) die Spannungsverstärkung $v_U = 6.8$ wird. Mit werkmäßiger Gegenkopplung ($k = 0.056$) verringert sich R zu $R_i = 18 \Omega$, und $v_U = 4.9$ (Messung: **Abb. 10.5.16**). Interessant ist der tieffrequente Bereich: Wegen Phasendrehungen entsteht hier eine Mitkopplung! Vergrößert man jedoch den Eingangskondensator des Differenzverstärkers (von 1 nF auf z.B. 100 nF), bleibt im tieffrequenten Bereich (mit Geko.) die Ausgangsimpedanz nahezu konstant (Kap. 10.4.3).

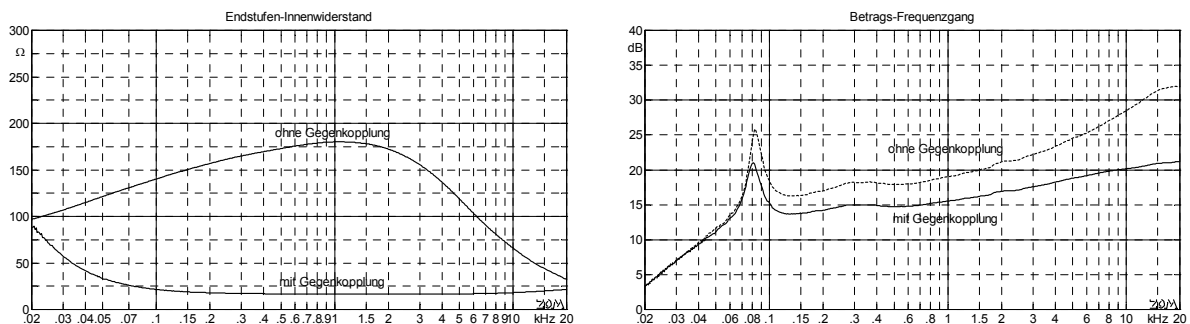


Abb. 10.5.16: Links = Betrag der Ausgangsimpedanz. Rechts = Übertragungs-Frequenzgang, vom Eingang des Differenzverstärkers (vor dem 1-nF-Koppelkondensator) bis zum Lautsprecher (4xP10-R).

* Bei nichtlinearem Betrieb (Übersteuerung) verliert jede Gegenkopplung an Wirkung, weil die steuernde Größe (hier: die Ausgangsspannung) sich praktisch nicht mehr ändern kann.

Nicht alle Endstufen sind gegengekoppelt: VOX AC-15 und AC-30 (sowie weitere) verzichten ganz auf Endstufen-Gegenkopplung. Etwas uneinheitlich ist die Situation bei Fender: Die ganz frühen Verstärker haben keine Endstufen-Gegenkopplung, der Bassman 5B6 bekommt sie um 1952, der Deluxe 5E3 erst 1955 [D. Funk]. Besondere Bedeutung erlangt der Bassman wegen seines in die Gegenkopplung eingesetzten Presence-Potentiometers: Damit wird die Frequenzabhängigkeit der Gegenkopplung einstellbar (Kap. 10.3.3). Der Legende nach ließen sich Jim Marshall und Ken Bran bei der Entwicklung ihrer Verstärker stark von Fenders Bassman inspirieren, und deshalb findet man auch bei Marshall-Verstärkern eine Endstufen-Gegenkopplung mit integriertem Presence-Poti.

Frederick Terman beschreibt schon 1943 in seinem bemerkenswerten Buch "Radio Engineers' Handbook" die Auswirkung der Endstufen-Gegenkopplung auf Verstärkung, Innenwiderstand und Klirrfaktor. Die gegenkopplungsbedingte Reduktion der Verstärkung war sicherlich nicht erklärtes Ziel der Schaltungsentwickler, wurde aber offensichtlich in Kauf genommen, um die nichtlinearen Röhren- und Ausgangsübertrager-Verzerrungen zu verringern. Selbst in den 50er-Jahren gab's noch keine Heavy-Metal-Bands, da spielte man "zivilisiert", d.h. unverzerrt. Vermutlich beobachteten die Verstärker-Pioniere die Ausgangsspannung ihrer Verstärker am Oszilloskop, und versuchten eine möglichst perfekte Sinuskurve zu erzeugen. "By the book", wie D. Funk schreibt. Je mehr man gegenkoppelt, desto weniger verzerrt der Verstärker – so stand's im Lehrbuch. Dass bei starken Phasendrehungen aus Gegenkopplung Mitkopplung werden kann, war ebenfalls bekannt, auch wenn nicht jeder Entwickler große Berechnungen machen wollte bzw. konnte. Er entdeckte aber bald, dass bei zu großer Gegenkopplung der Verstärker zu schwingen beginnt, und dann wurde die Gegenkopplung eben empirisch so eingestellt, dass auch bei üblichen Fertigungstoleranzen noch keine Instabilität auftrat.

In **Abb. 10.5.17** sind die Übertragungsfrequenzgänge eines bandbegrenzten Systems dargestellt. Im linken Bild für zwei leicht unterschiedliche Filterflanken, ohne bzw. mit Gegenkopplung. Das schmalbandigere System (gestrichelt) erfährt durch die Gegenkopplung nicht nur die zu erwartende Verstärkungsreduktion, sondern an den Frequenzbandgrenzen eine erhebliche Resonanzüberhöhung. Gegenkopplung bedeutet ja Überlagerung eines gegenphasigen Signals; die mit jeder Bandbegrenzung verbundenen Phasendrehungen bewirken aber, dass in den Randbereichen aus dem gegenphasigen Korrektursignal ein (fast) gleichphasiges Mitkopplungssignal werden kann, das die Verstärkung vergrößert. Erhöht man nun im Vorwärtszweig die Verstärkung (rechts Bild), so vergrößert sich die Gesamtverstärkung (blau) in den Randbereichen überproportional. Dies kann eine Auswirkung eines Röhrenwechsels sein: Die neuen Endstufenröhren bringen aufgrund ihrer etwas größeren Steilheit mehr Bässe, und schon liest man im Testbericht, das sei generell so: Die KT-X bringt mehr Bässe als die 6L-Y. Diese Eigenschaft ist aber immer im Zusammenhang mit der speziellen Schaltung zu sehen. Endröhren übertragen von 0 Hz bis ca. 100 MHz – erst in Zusammenarbeit mit Übertrager, Lautsprecherlast und Gegenkopplungsnetzwerk entsteht der individuelle Frequenzgang!

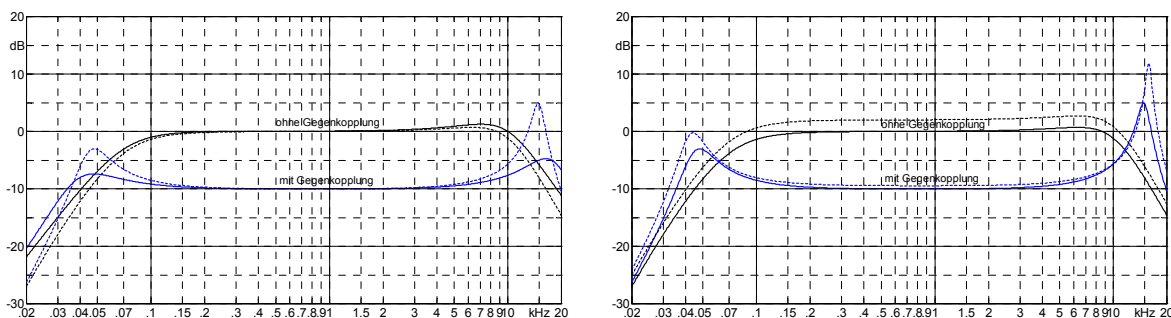


Abb. 10.5.17: Auswirkung einer Gegenkopplung bei Bandbegrenzung