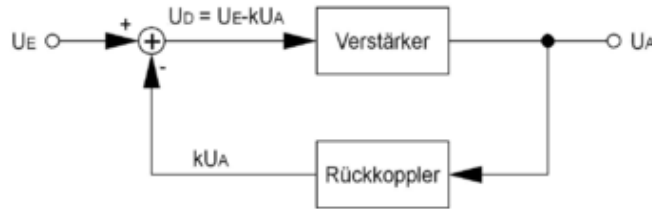




# Gegenkopplung bei Verstärkern

Teilweise aus Wikipedia: Gegenkopplung und Verstärker.

Unter Gegenkopplung versteht man die Rückführung eines Teiles des Ausgangssignals eines Verstärkers auf dessen Eingang, wobei es sich um einen Regelkreis handelt. Ein Teil der Ausgangsgröße wird derart auf den Eingang zurückgeführt, dass er dem Eingangssignal bzw. der Ausgangsgröße entgegenwirkt und damit z. B. die in einem elektrischen Verstärker entstandenen Verzerrungen vermindert. Zweck der Gegenkopplung ist eine statische (Arbeitspunkt) und dynamische (Linearität des Frequenzgangs) Linearisierung des Verhaltens des Verstärkers. Gleichzeitig wird die Verstärkung dadurch weitgehend unabhängig von Toleranzen der verwendeten aktiven Bauelemente. Die Linearisierung durch Gegenkopplung wird mit einer geringeren Verstärkung erkauft.



Fast alle analogen Verstärker haben eine Gegenkopplung, um die hohe Grundverstärkung auf einen bestimmten Wert zu reduzieren und gleichzeitig die Linearität zu verbessern. Bei mehreren Gegenkopplungszweigen innerhalb eines Verstärkers spricht man von verteilter Gegenkopplung. In der Röhrentechnik bedingt eine starke Gegenkopplung aufgrund der geringeren Verstärkung eine höhere Anzahl von Verstärkerstufen (Röhren). Aus diesem Grunde und aufgrund der Schwierigkeit, den Ausgangsübertrager in die Gegenkopplung mit einzubeziehen, wird hier traditionell nur eine geringe Gegenkopplung angewendet. Die Halbleitertechnik mit ihren geringeren Abmessungen und Bauteilpreisen, der Integrierbarkeit und dem Entfallen der Heizspannungsquelle bietet die Möglichkeit, die Schleifenverstärkung (Verstärkung ohne Gegenkopplung) stark zu erhöhen und mit extrem hohen Gegenkopplungsfaktoren eine hohe Linearisierung zu erreichen. Eine Gegenkopplung kann jedoch unter Umständen den Frequenzbereich und das Zeitverhalten eines Verstärkers negativ beeinflussen:

Erreicht den Eingang des gegengekoppelten Verstärkers ein Impuls (steiflankiger Vorgang), so bedarf es einer bestimmten, u. a. durch die obere Grenzfrequenz des Signalweges bestimmten Zeit, bis das korrigierende Gegenkopplungs-Signal den Eingang erreicht. Während dieser Zeit hat die Gegenkopplung keine Wirkung, die Schleife ist "offen". Dieses führt insbesondere bei hohen Gegenkopplungsfaktoren und unzureichendem Schaltungsdesign zu transienten Signalabweichungen (sogenannte "Überschwinger" oder Einschwingverhalten), bis das Signal eingeschwungen ist (engl. "settling"). Diese Abweichungen sind umso größer, je näher der Verstärker an seiner Instabilitätsgrenze arbeitet. Diese liegt dort, wo die Phasenverschiebungen der gesamten Schleife (Verstärker + Gegenkopplung) so groß werden, dass es zur Selbsterregung kommt - die Gegenkopplung wird durch die Summe der Phasenverschiebungen zur Mitkopplung. Den Verzerrungen und Instabilitäten muss durch eine Frequenzkompensation begegnet werden, welche die Verstärkung vor Erreichen der kritischen Frequenz auf unter Eins senkt. Da das Phasenverhalten auch durch die Last beeinflusst wird, sind Audioverstärker besonders betroffen, da die an ihnen betriebenen Lasten (Lautsprecher) einen stark frequenzabhängigen Impedanzverlauf haben.

Elektronenröhren- und Transistorverstärker unterscheiden sich sowohl im Verhältnis zwischen gerad- und ungeradzahligem Oberwellen (Verzerrungsspektrum) als auch in den transienten Verzerrungen.

Röhrenverstärker sind durch den weichen Einsatz von Übersteuerungs-Verzerrungen (soft clipping) charakterisiert, haben jedoch Probleme aufgrund des gegenüber Transistorverstärkern höheren Ausgangswiderstandes, was zu einer schlechteren Impulstreue aufgrund der geringeren Dämpfung der Lautsprecher-Eigenresonanzen führt. Der Ausgangsübertrager führt aufgrund seiner Streuinduktivität auch zu einem nach oben begrenzten Frequenzgang.

## Probleme bei zu starker Gegenkopplung

Die übliche Art, die entstandenen Verzerrungen zu eliminieren ist die Über-Alles-Gegenkopplung (Negative Feed Back = NFB), die das Problem scheinbar löst - jedoch nur für eingeschwungene Signale. Leider sind die Verzerrungen bei den üblichen Messungen nicht zu erkennen, deshalb meinen einige Entwickler, dass sie nicht existieren. Mati Otala konnte diese Verzerrungen nachweisen, die kurzzeitig auftreten und durchaus hörbar sind.

Man hatte erkannt, dass für die verzerrungsfreie Übertragung von kurzen Impulsen, insbesondere an Lautsprechern mit geringem Wirkungsgrad, hohe Leistungen notwendig erforderlich waren, andererseits konnte man nachweisen, dass dabei eine früher nicht erkannte Art von Verzerrungen eine Rolle spielte, die für den "typischen" Transistorklang verantwortlich waren.

Man spricht von "Transient Intermodulation Distortion", kurz TIM. Schuld daran waren die starken Gesamtgegenkopplungen, die zur Folge hatten, dass die Gegenkopplung bei steilen Impulsen mit minimaler Verspätung wirksam wurde. Aus solchen Verzögerungen resultierten sehr kurzzeitige (transiente) Verzerrungen hoher Frequenzanteile, die - an sich unhörbar - tieffrequente Signalanteile beeinflussten (Intermodulation). Verzerrungen bei jeder Art von Verstärkern können unterschiedliche Ursachen haben: Neben klangverschlechternden Bauteilen und Störungen vom Netzteil, hauptsächlich die Unlinearität der Kennlinien von Transistoren oder Röhren. Die beiden erstgenannten Störungen lassen sich durch sorgfältige Entwicklung und geeignete Materialwahl minimieren. Anders das Durchlaufen der Kennlinien: Wären die Kennlinien gerade, könnte man viel einfacher, gut klingende Verstärker zu bauen. Sie sind es aber weder bei Röhren noch bei Transistoren.

Audio-Transistorverstärker weisen gegenüber Röhrenverstärkern sehr viel unangenehmere Verzerrungen bei Übersteuerung auf und zeigen bei unzureichendem Design sogenannte **Übernahmeverzerrungen**, die durch Gegenkopplung nicht vollständig beseitigt werden können.