

Vertrauen ist gut – Kontrolle ist besser: Lautsprecher-Controller

Dipl.-Ing. (FH) Volker Holtmeyer

Die Funktionen zur Ansteuerung von Lautsprechern werden heute üblicherweise in so genannten digitalen Lautsprechermanagementsystemen zusammengefasst. Neben der eigentlichen Frequenzweichenfunktion spielen hier die Frequenzgangkorrektur und die zeitliche Anpassung eine wichtige Rolle. Darüber hinaus wird besonderes Augenmerk auf den Schutz der Lautsprecher vor mechanischer und thermischer Überlastung mittels Limiter gelegt.

Überall wo in größeren Beschallungsanlagen Lautsprecher anzusteuern sind findet man Lautsprechermanagementsysteme oder Lautsprecher-Controller. Die Hauptaufgaben eines Controllers zu beschreiben, gelingt am einfachsten mit einem Blick in ein so genanntes Drive-Rack, wie es noch vor einigen Jahren zur Ansteuerung größerer Beschallungsanlagen üblich war.

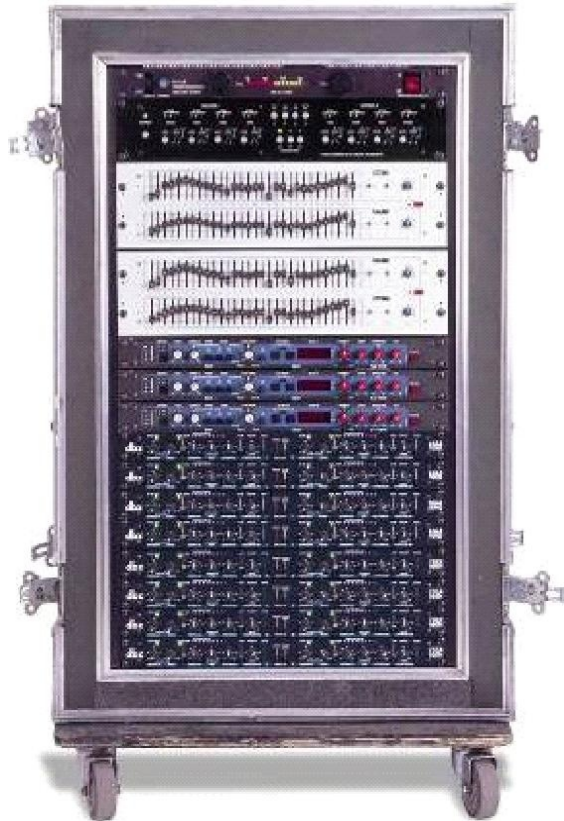


Abbildung 1 Drive-Rack (Quelle: dbx)

Von oben nach unten finden wir beispielsweise in diesem Rack:

- Frequenzweiche
- Equalizer
- Delay
- Limiter

Beschäftigen wir uns zunächst also mit der wohl nach wie vor wichtigsten Funktion – der Frequenzweiche (*engl.*: Crossover oder X-Over).

Frequenzweiche

Gewöhnliche Konuslautsprecher vermögen nicht das gesamte Frequenzspektrum gleichermaßen gut wiederzugeben. Mit steigender Frequenz bilden große Membranen zunehmend Partialschwingungen aus. Daher benutzt man zur Reproduktion hoher Frequenzen kleinere Membranen, die zur Steigerung des Wirkungsgrades zumeist als Kompressionstreiber konstruiert sind.

Somit ist es notwendig, den verschiedenen Wandlern die entsprechenden Frequenzbereiche des Audiosignals zuzuweisen. Dieses geschieht im einfachsten Fall mit einem passiven Netzwerk aus Induktivitäten, Kapazitäten und Widerständen – einer so genannten *passiven* Frequenzweiche – direkt im Lautsprechergehäuse. Bei größeren Beschallungsanlagen wird das Audiosignal in der Regel bereits vor den Leistungsverstärkern aufgeteilt – man spricht von einer *aktiven* Frequenzweiche oder auch von einer aktiven Beschallungsanlage.¹

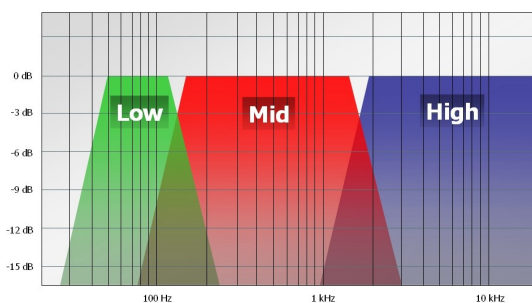


Abbildung 2 Funktion einer 3-Weg-Frequenzweiche

Dabei wird an jeweils einen separaten Verstärkerkanal durch Hoch- und Tiefpässe nur der entsprechende Frequenzbereich für den jeweiligen Wandler weitergeleitet.

In analogen Frequenzweichen geschieht dies ebenfalls mit passiven Bauelementen; in modernen Lautsprecher-Controllern wird dies mit digitaler Technik umgesetzt.

¹ Als „aktive PA“ wird zuweilen auch ein Beschallungssystem bezeichnet, bei dem die Leistungsverstärker im Lautsprechergehäuse integriert sind (*engl.*: self powered).

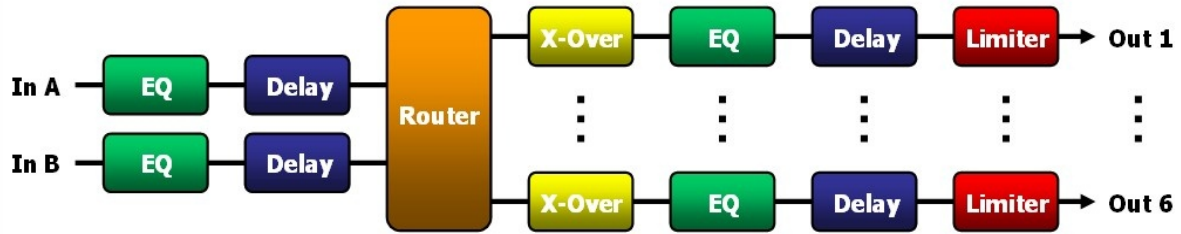


Abbildung 3 Typischer Aufbau eines Lautsprecher-Controllers

Dabei werden in den allermeisten Fällen so genannte IIR-Filter (Infinite Impuls Response) eingesetzt, die gewissermaßen lediglich die „analoge Welt“ mittels Digitaltechnik umsetzen. Das bedeutet, dass ebenfalls auch Phasendrehungen, die durch elektrische Filter zwangsläufig entstehen, erzeugt werden.

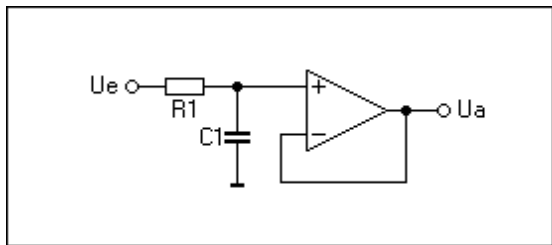


Abbildung 4 TP-Filter 1. Ordnung

Anders verhalten sich Geräte, die FIR-Filter (Finite Impulse Response) einsetzen. Hier kann der Phasenverlauf getrennt vom Amplitudenverlauf bearbeitet werden, womit komplett phasenlineare Systeme möglich sind. Allerdings entstehen mithin sehr lange Latenzen, weshalb man für Live-Anwendungen meist einen Kompromiss eingeht und den Tieftonbereich nicht phasenlinearisiert, womit man die Gruppenlaufzeit im Mittel- und Hochtonbereich in verträglichen Grenzen hält.

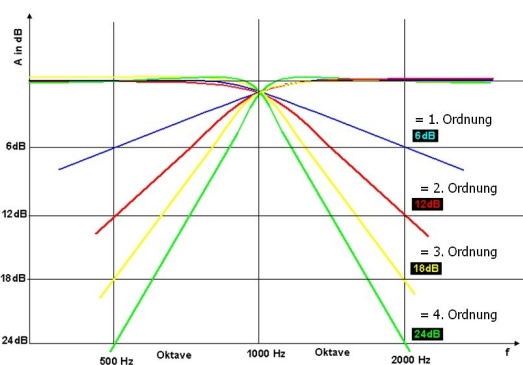


Abbildung 5 Filter unterschiedlicher Ordnung

Übliche Charakteristika von Hoch- und Tiefpassfiltern in Controllern sind Bessel, Butterworth und Linkwitz-Riley. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch das Verhalten im Überlappungsbereich.

Butterworth-Filter sind beispielsweise durch das konstante Leistungsspektrum im Tieftonbereich vorteilhaft, während Linkwitz-Riley-Filter durch das

konstante Amplitudenspektrum im Mittel- und Hochtonbereich zu bevorzugen sind.

Die Steilheit von Hoch- und Tiefpassfiltern wird durch die Anzahl der kapazitiven respektive induktiven Bauteile bestimmt, wobei jedes Bauteil die Steilheit um 6 dB pro Oktave erhöht und eine Phasendrehung von 90° hervorruft. Dieses bezeichnet man auch als Ordnung. Ein Filter 2. Ordnung weist also eine Flankensteilheit von 12 dB/Oktave und eine Phasendrehung von 180° auf.

Shape	Order	Amplitude response flatness	Group delay flatness	Polar response	Roll-off rate
BUT 6	1 st	●●●●●●	●●●●●●	●	●
BUT 12*	2 nd	●	●●●●●●	●●●●●●	●●
BES 12*	2 nd	●●●●●●	●●●●●●	●●●	●
L-R 12*	2 nd	●●●●●●	●●●●●●	●●●●●●	●●
BUT 18*	3 rd	●●●●●●	●●●●●●	●●	●●●
BUT 24	4 th	●	●●●●	●●●●●●	●●●●
BES 24	4 th	●●	●●●●●●	●●●●●●	●●●
L-R 24	4 th	●●●●●●	●●●●	●●●●●●	●●●●
BUT 48	8 th	●	●	●●●●●●	●●●●●●
L-R 48	8 th	●●●●●●	●●	●●●●●●	●●●●●●

Abbildung 6 Eignung verschiedener Filtern

In der Abbildung 6 sind verschiedene Filter gegenübergestellt. Je größer die Anzahl der Punkte ist, desto besser geeignet ist das Filter für das jeweilige Kriterium.

Equalizer

Eine weitere wichtige Aufgabe wird ebenfalls mit Filtern gelöst - und zwar die Entzerrung des Amplitudenfrequenzgangs der einzelnen Lautsprecher. Naturgemäß haben Lautsprecher in bestimmten Frequenzbereichen Defizite. Diese können in gewissen Grenzen mit Filtern entsprechend entzerrt werden. Dazu werden in der Regel so genannte Bell- und Shelving-Filter eingesetzt. Bell-Filter haben einen glockenförmigen Amplitudenverlauf, während die Form eines Shelving-Filters sehr anschaulich mit der deutschen Bezeichnung „Kuhschwanzfilter“ beschrieben wird.

Letzterer wird zum Beispiel typischerweise zur CD-Horn-Entzerrung benutzt. Hochtontreiber haben die Eigenschaft die Energie mit steigender Frequenz immer stärker zu bündeln. Durch den Einsatz eines Constant-Directivity-Horns wird die Energie der höheren Frequenzbereiche auf einen größeren Raumwinkel aufgefächert, womit der Schalldruck-

pegel singt. Hier wird nun durch eine kräftige Höhenanhebung dieser Pegelabfall kompensiert.

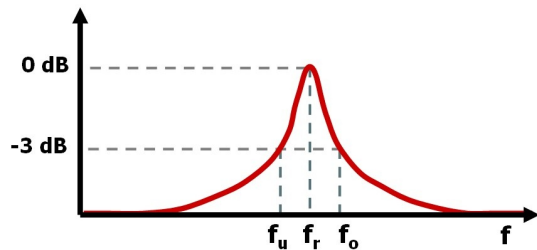


Abbildung 7 Definition der Güte Q eines Bell-Filters

Der spektrale Wirkungsbereich eines Bell-Filters wird als Bandbreite (*engl.*: Bandwidth) bezeichnet und ist als die Differenz der oberen und unteren Grenzfrequenz definiert. Bei den Grenzfrequenzen ist der Pegel jeweils um 3 dB niedriger als bei der Resonanzfrequenz. Häufig wird die Bandbreite auch als Güte Q ausgedrückt, welche der Quotient der Resonanzfrequenz und der Bandbreite ist.

Delay

Die akustischen Zentren der verschiedenen Schallwandler in einem Lautsprechergehäuse haben in der Regel einen gewissen räumlichen Versatz. Zum Beispiel liegt das akustische Zentrum eines Hochtonhorns zumeist dort, wo es sich beginnt stark aufzuweiten und damit einige Zentimeter tiefer in der Box als das akustische Zentrum des Konuslautsprechers. Dadurch gelangen die Schallanteile mit einem zeitlichen Versatz zum Zuhörer. Des Weiteren wird auch durch die Phasendrehung elektrischer Filter und bestimmter Gehäusekonstruktionen ein Anstieg der Gruppenlaufzeit hervorgerufen.

Im Übernahmebereich der beiden Wandler kommt es dadurch zu einem so genannten „Lobing“ oder „Tilting“; die Richtkeule der Schallabstrahlung in diesem Frequenzbereich zeigt dabei nicht mehr in Hauptabstrahlrichtung sondern wird ein wenig nach oben abgelenkt. Dadurch entsteht im Frequenzgang auf Achse im Übernahmebereich eine Lücke. Dies kann hier beispielsweise durch ein Verzögerungsglied im Ausspielweg des Konuslautsprechers eliminiert werden. Eine solche Korrektur wird häufig als „Driver Alignment“ bezeichnet.

Verzögerungen in den einzelnen Ausspielwegen werden auch eingesetzt um Laufzeitunterschiede auszugleichen, die in der Regel entstehen, wenn Topteile geflogen werden und Subwoofer, die auf dem Boden stehen. Durch ein Delay werden hier die Schallanteile so angepasst, dass sie weitestgehend zeitgleich am Zuhörer eintreffen. Zwar gilt diese Einstellung streng genommen nur für einen einzigen Punkt im Raum, doch ist es auf Grund der großen Wellenlängen im entsprechenden Bereich (um die 100 Hz) möglich, für einen weiten Zuhörerbereich gute Verhältnisse zu schaffen.

Ein weiterer wichtiger Einsatz von Delays ist die Ansteuerung von Delay-Lines. Durch das Abstandsgesetz sind der Reichweite von Lautsprechern Grenzen gesetzt. Auch unter Verwendung von Lautsprechern mit einem sehr guten vertikalen Abstrahlverhalten, ist es notwendig für weit entfernte Zuhörerbereiche weitere Lautsprechersysteme einzusetzen, um eine gleichmäßige Pegelverteilung zu erreichen. Dabei ist darauf zu achten, dass die von den Hauptsystemen eintreffenden Schallanteile nicht diskret wahrgenommen werden – also als Echo auftreten. Dies ist immer der Fall, wenn der zeitliche Unterschied größer als etwa 35 - 40 ms ist.

Ein anderer wichtiger Ansatz bei der korrekten Einstellung einer Delay-Line wird durch den Haas-Effekt oder das Gesetz der ersten Wellenfront beschrieben. Letzteres besagt, dass ein Schallereignis stets aus der Richtung wahrgenommen wird, aus welcher der erste Impuls empfangen wird. Durch eine geschickte Wahl der Verzögerungszeit kann man es erreichen, dass die Ortung auf den Hauptlautsprechern liegt und die Delay-Lautsprecher weitestgehend nicht mehr diskret gehört werden.

Streng genommen gilt auch hier die Einstellung wieder nur für einen einzigen Punkt, allerdings hat man einen Spielraum von etwa 5 – 25 ms mit dem die Signale zeitversetzt beim Zuhörer eintreffen dürfen. Dabei darf der Pegel des verzögerten Signals sogar um bis zu 10 dB lauter empfangen werden als der Pegel der Hauptlautsprecher.

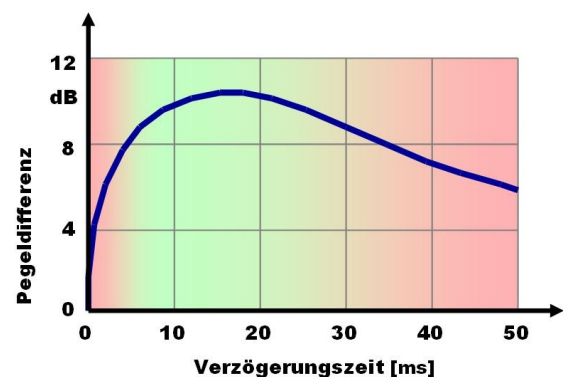


Abbildung 8 Haas-Effekt

Delay-Lautsprecher sollten stets mit einem Mono-Signal angesteuert werden, da eine Ortung dieser Lautsprecher durch den Haas-Effekt ohnehin nicht möglich ist. Das Stereo-Bild wird also mit den Hauptlautsprechern erzeugt. Auch sollte darauf geachtet werden, dass dieses Signal zur Ansteuerung der Delay-Lautsprecher direkt von der Fader-Stellung des Masters abhängig ist. Auf keinen Fall sollte der Pegel der Delay-Lines getrennt von den Hauptlautsprechern geregelt werden, da dadurch das Verhältnis von Haupt- zu Delay-Lautsprechern verändert werden könnte.

Limitier

Die meisten Lautsprechermanagementsysteme oder Controller besitzen in jedem Ausgangsweg einen separat einzustellenden Limiter, der die Lautsprecher vor zu großen Signalen schützen soll. Um einen möglichst großen Schutz gewährleisten zu können, ist es notwendig die Limiter auf die Eigenschaften der angeschlossenen Endstufe und des angetriebenen Wandlers abzustimmen.

Die wohl größten Differenzen und Unklarheiten von Lautsprecherdaten findet man bei der Angabe der elektrischen Belastbarkeit. Das ist vermutlich darin begründet, dass sich die Ermittlung diesbezüglicher Daten vergleichsweise schwierig gestaltet, ob der starken Abhängigkeit der Art und Einwirkungsdauer des verwendeten Testsignals.

Üblicherweise wird als Kriterium für die elektrische Belastbarkeit die Leistung herangezogen. Die Leistung ist definiert als Energie pro Zeit. Mit dem Umstand, dass sich Leistung nicht direkt messen lässt und der Zeitabhängigkeit begegnet man hier schon zwei Problemstellen.

Grundsätzlich kann man die maximale Belastbarkeit eines Lautsprechers in zwei Grenzen begründet sehen:

1. Mechanische Belastbarkeit
2. Thermische Belastbarkeit

Im ersten Fall ist z.B. die Auslenkung der Membran zu groß und die Schwingspule schlägt an die Polplatte oder springt aus dem Spalt oder die Membran selbst zerreißt. Im zweiten Fall heizt sich z.B. die Schwingspule derart stark auf, dass sich der Kleber der Schwingspule löst oder die Isolation des Schwingspulendrahtes schmilzt, wodurch ein Kurzschluss entsteht.

Beide Fälle treten ein, wenn im Lautsprecher eine bestimmte Leistung umgesetzt wird. Diese Leistung lässt sich naturgemäß nicht direkt bestimmen, sie steht aber im direkten Zusammenhang zur angelegten Spannung.

Die Leistung P ist der Quotient des Quadrates der Spannung U und der Impedanz Z des Lautsprechers.

$$P = \frac{U^2}{R}$$

1. Spitzenbelastbarkeit (engl.: Peak Power)

Die Spitzenbelastbarkeit basiert auf der Berechnung mit dem Spitzenwert der Spannung und ist ein Maß für die *mechanische Belastbarkeit* eines Lautsprechers. Für ein Signal mit einem Crest-Faktor von 6 dB ist die Spitzenbelastbarkeit beispielsweise viermal so groß wie die Dauerbelastbarkeit.

2. Dauerbelastbarkeit (engl.: Average Power)

Die Dauerbelastbarkeit wird mit dem quadratischen Mittel der Spannung errechnet und ist ein Maß für die *thermische Belastbarkeit* eines Lautsprechers. Daher wird sie auch häufig nicht ganz korrekt als „RMS-Leistung“ bezeichnet.

In der Praxis, wo zumeist Musik oder Sprache wiedergegeben werden soll, ist das Signal und damit die Spannung, die am Lautsprecher anliegt, aber sehr zeitvariant und damit nur schwer zu beschreiben. Allerdings lassen sich für je einen bestimmten Zeitabschnitt der Spitzenwert und der Mittelwert der Spannung bestimmen. Das Verhältnis dieser beiden Größen wird als Crest-Faktor bezeichnet und als logarithmisches Maß in dB angegeben.

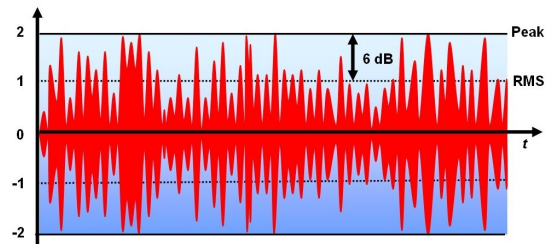


Abbildung 9 Crest-Faktor

Die Abbildung 9 zeigt ein Signal mit einem Crest-Faktor von 6 dB. Der Pegel der Signalspitzen liegt also um 6 dB höher als der Durchschnittspegel. Das ist vergleichbar mit einem Verhältnis von 2:1 zwischen dem Spitzenwert (engl.: Peak) und dem quadratischen Mittel (engl.: RMS) einer Spannung, oder mit einem Verhältnis von 4:1 zwischen dem Spitzenwert und dem quadratischen Mittel einer Leistung.

Im Fall der mechanischen Überlastung ist der Spitzenwert der Spannung und im Fall der thermischen Überlastung der durchschnittliche Wert der Spannung zur Berechnung der Leistung relevant.

Daher braucht man streng genommen zwei verschiedene Limiter: Einen Limiter zum Schutz vor mechanischer Überlast, der Pegelspitzen sofort limitiert und einen Limiter zum Schutz vor thermischer Überlast, der den Dauerpegel limitiert, also einen niedrigeren Schwellwert, aber eine längere Ansprechzeit hat, um kurzzeitige Peaks passieren zu lassen.

Ein guter Kompromiss ist ein Limiter mit variabler Attack-Zeit, wobei als Schwellwert der Dauerpegel zu wählen ist und mit der Attack-Zeit wird das Ansprechen entsprechend angepasst, so dass kurzzeitige Pegelspitzen durchgelassen werden.

Solch ein Attack weist tendenziell den gleichen Charakter auf, wie ihn der zeitliche Verlauf der Belastungsgrenze eines Lautsprechers darstellt.

Je kürzer ein Impuls ist, desto größer darf dessen Amplitude sein. Bei Tieftonlautsprechern sind längere und bei Hochtonlautsprechern kürzere Attack-Zeiten zu wählen.

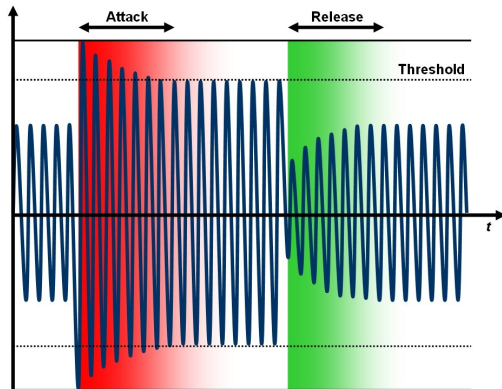


Abbildung 10 Charakteristik von Attack und Release eines Limiters

Einen zusätzlichen Schutz bietet noch ein Overshoot-Limiter, wie er z. B. im BSS FDS-366T Omnidrive zu finden ist. Hier lässt sich beispielsweise bei einem üblichen Verhältnis der Peak-Leistung zur Dauerleistung von 4:1 ein Overshoot von 6 dB einstellen, um einen recht sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Was wird berechnet?

Um einen Limiter zum Schutz eines Lautsprechers zu berechnen, gilt es sich zunächst zu verdeutlichen, was eigentlich ausgerechnet wird:

Ausgangspunkt ist die maximale elektrische Leistung, die im Lautsprecher umgesetzt wird. Mit dieser Leistung und der Nennimpedanz des Lautsprechers lässt sich die Spannung berechnen, die maximal vom Verstärker abgegeben werden darf. Diese Spannung ist direkt abhängig von der Spannung die am Eingang der Endstufe und damit am Ausgang des Controllers anliegt. Der Faktor mit dem diese beiden Spannungen verknüpft sind ist die so genannte Spannungsverstärkung der Endstufe oder englisch Voltage Gain (Dieser Wert ist übrigens konstant und weitgehend unabhängig vom abgegebenen Strom!).

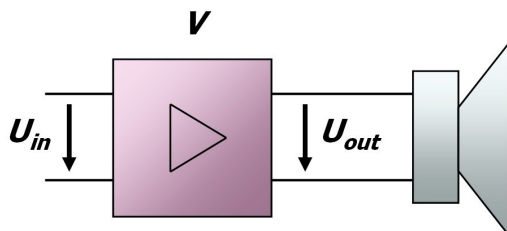


Abbildung 8 Spannungsverstärkung

Es gilt also die maximale Ausgangsspannung des Controllers zu berechnen und hierauf wird schlussendlich der Schwellwert des Limiters eingestellt.

Bei der Parallelschaltung mehrerer gleicher Lautsprecher ist der Schwellwert übrigens identisch mit dem des einzelnen Lautsprechers, da die am Lautsprecher anliegende Spannung gleich bleibt (solange die maximale Spannung der Endstufe nicht durch eine zu geringe Impedanz sinkt).

Vorgehensweise:

1. Zunächst ist die maximal zulässige Ausgangsspannung der Endstufe zu bestimmen. Als Grundlage hierfür dient die vom Hersteller angegebene maximale Dauerleistung des Lautsprechers. Damit wird mit der Nennimpedanz nach dem Ohm'schen Gesetz die maximale Spannung des Dauerpegels am Lautsprecher berechnet, die (Leitungsverluste unberücksichtigt) identisch ist mit der Ausgangsspannung der Endstufe. Dabei ist die Spannung die Wurzel aus dem Produkt der Leistung und der Nennimpedanz.
2. Dieser Wert ist nun als Pegel in dBu (bezogen auf 0,775 V) auszudrücken.
3. Schließlich ist die Spannungsverstärkung der Endstufe zu ermitteln, die üblicherweise dem Handbuch oder dem Datenblatt zu entnehmen ist.
4. Die Differenz des Pegels der maximalen Ausgangsspannung und dem Pegel der Spannungsverstärkung ist als Schwellwert des Limiters einzustellen.

Die Ausgangspegelanzeigen der meisten Controller beziehen sich auf den jeweils eingestellten Limiter-Schwellwert! Das bedeutet beispielsweise, dass bei einem zu hoch eingestellten Schwellwert fälschlicherweise der Eindruck erweckt werden kann, dass unter Umständen noch reichlich Headroom vorhanden ist.

Falls die Leistung der Endstufe kleiner ist als die Leistung des Lautsprechers, kann es zu einem Clipping der Endstufe kommen, wobei hochfrequente Signalanteile erzeugt werden, die insbesondere Hochtöner stark belasten. In diesem Fall wäre es ratsam, den Limiter des Controllers zu nutzen, um ein Clipping der Endstufe zu verhindern. Dabei wird der Limiter-Schwellwert entsprechend herabgesetzt und zur Berechnung die Leistung der Endstufe herangezogen.

Fazit

Die Zeiten aufwendiger und platzraubender Drive-Racks sind durch den Einzug der Digitaltechnik in die professionelle Audiowelt endgültig vorbei. Alle Funktionen wie Frequenzweiche, Equalizer, Delay und Limiter sind heute in Geräten mit zwei bis vier Eingängen und vier bis acht Ausgängen vereint.