

## Hörbarkeit von Phasengang und group delay in Lautsprechern (Eine kleine Einführung und Erfahrungswerte). (Auszug aus dem Infoblatt „update nuBox 360/5“)

### Phasendrehungen und Group Delay in Weichen:

Bei Aktiv- und Passiv-Weichen für Lautsprecher kommen überwiegend Filter erster bis etwa vierter Ordnung zum Einsatz. Jede „Ordnung“ erhöht die Flankensteilheit um 6 dB. Eine Weiche „erster Ordnung“ hat also eine Flankensteilheit von 6 dB, eine mit „zweiter Ordnung“ hat 12 dB, usw.

Es gibt etliche Filtertypen. Die wichtigsten sind Bessel-, Butterworth- und Tschebyscheff-Filter, die sich beispielsweise durch „unterschiedliche Eckigkeit“ der Frequenzgang-Kurven im Bereich der Trennfrequenz unterscheiden. Bei der „Eckfrequenz“, bei der in Lautsprechern typischerweise die Trennfrequenz der einzelnen Chassis liegt, dreht ein Bessel- oder Butterworth-Filter die Phase „je Filterordnung“ um 45°, ein Filter 4. Ordnung also um 180°. – Egal, ob es sich um Tiefpass- oder Hochpass-Filter handelt.

Eine Linkwitz-Riley-Weiche besteht aus einer „Sonderform“ von Butterworth- Tief- und Hochpässen, die im „Übergangspunkt“ der Frequenzgänge um 6 dB (statt 3 dB) abgefallen ist, um eine saubere „akustische Frequenzgang-Summierung“ von z.B. Tief- und Hochtonsignal zu erreichen.

### Group delay:

Die Signal-Verzögerung (group delay) zeigt die Durchlaufzeit eines Signals in Abhängigkeit von der Frequenz.

Bei Bessel-Filtern ist sie (von 0 bis etwa zur halben Eckfrequenz) maximal linear. (Für ein 80 Hz-Bessel-Filter zweiter Ordnung beträgt sie 3.44 ms.)

Für ein „typisches“ Butterworth-Filter 2. Ordnung ist diese Verzögerung zwar etwas geringer, aber nicht so linear; - sie steigt von knapp 2.9 ms bei tiefen Frequenzen auf etwa 3.4 ms bei etwas über 50 Hz. - Sie hat also unterhalb der Eckfrequenz eine Anhebung um etwa 18% gegenüber den Werten bei kleinen Frequenzen.

Ein 80 Hz-Linkwitz-Riley-Filter 2. Ordnung hat bei tiefen Frequenzen 4 ms, fällt stetig ab und hat oberhalb ‚etwa halber Eckfrequenz‘ niedrigere Werte als ein Bessel-Filter.

Bei der Summierung der Signale steilflankiger Filter (mehr als 1. Ordnung) sind diese Durchlaufzeiten unvermeidbar. Sie sind umso höher, je tiefer die zu trennenden Frequenzen sind, und je höher die Filterordnung ist.

(Ausnahme: DSP-FIR-Filter haben zwar eine *noch höhere* Durchlaufzeit, die kann aber über der Frequenz linear sein.)

### Auswirkungen „flacher Filterung“ (6-dB-Weichen) zwischen Hoch- und Tieftöner in Lautsprechern:

Vor allem in „High-End-Kreisen“ gibt es gelegentlich das Missverständnis, dass man mit 6 dB-Weichen Phasendrehungen und group delay einer Lautsprecherbox „so gut wie ausschalten“ könne.

Der theoretische Vorteil von 6 dB-Weichen (**„null“ group delay** im Summensignal, deshalb **perfektes Rechteckverhalten**, wird durch Einfügen der Lautsprecher-Chassis in die Kette dramatisch verschlechtert.

*Aktive* 6 dB-Weichen können *tatsächlich* so aufgebaut werden, dass im Summensignal der Weiche keine Gruppenlaufzeit erscheint. Die 90 Grad Phasenverschiebung zwischen Hoch- und Tiefton-Kanal könnte man dabei ganz gut verschmerzen, - aber die Lautsprecherchassis selbst verhalten sich ebenfalls wie Filter und packen locker noch einmal jede Menge „verschobene Phase“ dazu. Deshalb sind die dann benutzten Formeln über Eckfrequenz und Phasenlage der Weiche völlig untauglich.

In der Praxis erhält man im Bereich der Übernahme-Frequenz Werte von 160 bis 180 Grad Phasenverschiebung, deshalb wird der Hochtöner bei Lautsprechern mit 6 dB-Weichen so gut wie immer verpolt angeschlossen. Beim Verpolen der Filter-Ausgänge einer 6 dB-Weiche hat man zwar einen linearen Frequenzgang, aber verspielt den theoretischen Vorteil von „sauberer Phasenlage“ und „null group delay“ ohnehin von vornherein!

In der Praxis erreicht man mit verpolten 6 dB Weichen gegenüber 12 dB-Weichen exakt die gleichen Durchlaufverzögerung erzielen, - allerdings mit einer Reihe von Nachteilen, die hier beschrieben werden.

Diese Nachteile gibt es auch dann, wenn der ein gleichmäßig abfallender Verlauf eines Tieftöners oberhalb 2 kHz und die Dämpfung der Hochtöner-Resonanz durch Ferrofluid den flachen Filtersteilheiten der Weiche eigentlich entgegenkommt.

6 dB-Weichen, die nur aus einem Bauelement pro Zweig bestehen, bewirken schlecht unterdrückte Hochtöner-Resonanz, eingegengten vertikaler Winkelbereich infolge zu breitem Überlappungsbereich und stark ansteigenden Klirrfaktor im Hochtonbereich bei höheren Lautstärken.

Jede der so genannten „Highend“-Boxen mit 6 dB-Weiche, die wir in unserem Labor analysiert haben, konnten wir innerhalb weniger Tage durch aufwändigere Weichen klanglich deutlich verbessern.

Mit 12 dB - Weichen kann man unter Berücksichtigung der Chassis-Eigenschaften - und mittels zusätzlicher Komponenten in der Weiche - die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Chassis im Bereich der Trennfrequenz (auch bei gleichphasig gepolten Chassis) bei „null“ halten.

Ohne DSP-Systeme ist es aber *auch mit diesem Weichentyp* natürlich nicht möglich, eine konstante Gruppenlaufzeit über einen weiten Frequenzbereich zu erzielen.

### **Zeitrichtigkeit:**

Dieser Begriff wurde wohl beim Betrachten der *Sprungfunktion* „erfunden“, die man am Oszilloskop sehen kann, wenn man mit einem Messmikrofon das Signal eines Lautsprechers aufnimmt, an den ein Gleichspannungssprung angelegt wird. Dabei handelt es sich um den Schalldruck-Verlauf auf der Zeitachse.

### **Zeitversatz durch „mechanische“ Maßnahmen:**

Der für die Laufzeit „zuständige“ Membranbereich des Tieftöners ist bei den allermeisten HiFi-Lautsprechern um zwei oder drei cm weiter vom Ohr entfernt als die Hochtöner-Membran. Das kann man z.B. durch ein „Zurücksetzen“ des Hochtöners oder „nach vorne Setzen“ des Tieftöners ausgleichen.

Nach intensiven Hörtests mit auf *der Schallwand bündig montierten* Chassis, bzw. mit *zurückversetzten* Hochtönern spielt die „Zeitrichtigkeit“, die von „High-End-Fetischisten“ oft sehr hoch eingestuft wird, im Bereich der Trennfrequenz (oberhalb etwa 1.5 kHz) offenbar nur eine untergeordnete Rolle. Viel unangenehmer sind Kantenbeugungs-Effekte und Kanten-Reflexionen bei mechanisch zurückgesetzten Hochtönern.

### **Zeitversatz durch „elektrische“ Maßnahmen:**

Wenn bei der Übernahme-Frequenz jeweils die Phasenlage zwischen HT und TT „stimmte“, brachte die „Zeitrichtigkeit“ durch verzögertes „Absenden der Wellenfront“ des Hochtöners mittels Digital-Delay oder analoge Allpassfilter keine eindeutig unterscheidbaren Klang-Eindrücke,

Von manchen Fachzeitschriften wird die „klangliche Homogenität“ gelobt, die durch das Zurückversetzen des Hochtöners um vielleicht 3 cm entstehen soll. Das entspricht einem Zeitversatz von etwa 100µs.

Mit durchstimmbaren Allpass-Filtern und DSP-Systemen kann man sehr elegant (und praktisch „real time“) Untersuchungen vornehmen, die zeigen, dass auch ein Mehrfaches dieses Zeitversatzes keine nennenswerten klanglichen Auswirkungen hat.

Die meisten maßstabsetzenden Fachleute (z.B. in der Audio Engineering Society) behaupten: oberhalb 1500 Hz ist das damit verknüpfte „group delay“ gehörmäßig nicht unterscheidbar.

In unseren eigenen, extrem ambitionierten Hörtests kam immer wieder heraus, dass das „Richtigstellen“ von group delay (mit DSP-Systemen) im Bassbereich dramatische Auswirkungen hat, unter 1 kHz ist es *noch recht deutlich*, aber knapp oberhalb 1.5 kHz *gerade noch unterscheidbar*. Der „Klang-Unterschied“ macht aber weit weniger aus, als z.B. eine Pegeldifferenz von 1 dB zwischen den Testkandidaten oder Frequenzgang-Abweichungen von unter +- 2 dB (relativ zum Vergleichs-Lautsprecher).

Trotzdem kann es aus „ästhetischen Gründen“ sinnvoll sein, solch eine Zeitrichtigkeit anzustreben.

Die grundsätzlichen Überlegungen zu diesem Themenkreis werden von uns ständig neu angestellt und gehörmäßig sowie messtechnisch überprüft.

### **Hörempfinden:**

Beim Hörempfinden ist die Frage, was „guter Klang“ ist, nicht so klar zu beurteilen wie die Entscheidung, wer ein 100-Meter-Rennen gewonnen hat. – Trotzdem sind die Ergebnisse recht gut reproduzierbar, wenn die Jury erfahren, gut ausgeruht und kritisch ist.

Bei „Updates“ unserer Boxen gehen wir sehr pragmatisch vor. Wir laden grundsätzlich kompetente Leute (auch aus der Tonstudio-Technik) ein und machen aufwändige Hörtests mit verschiedenen Gehäuse-Geometrien und Weichen-Konzeptionen; - erst dann entscheiden wir, welche Entwicklung das bisherige Modell ablösen soll.

– Es kam auch schon öfter vor, dass Verbesserungen, die messtechnisch eindeutig waren, gehörmäßig keinen merklichen Zugewinn an Klangqualität brachten. - Dann wurde das Update *nicht* durchgeführt.

Obwohl bei uns bisher noch nie eine Box mit 6 dB-Weiche einen Vergleichstest gewonnen hat, entwickeln wir mit „stoischer Gelassenheit“ auch diesen Weichentyp immer weiter (in Verbindung mit Allpass-Filtern zur Phasenanpassung und group delay Linearisierung sowie mit zusätzlichen „Entzerrungskreisen“).

Seit 1995 sind auch Aktivboxen mit DSP-Systemen bei den Tests dabei; - sie haben *jedes mal* gewonnen. - Manchmal mit relativ kleinem Abstand, - manchmal sehr deutlich.

Bei unseren Hörtest resultieren die größten Klang-Unterschiede aus Unsauberkeiten im Frequenzgang.

Wenn die Frequenzgänge „ähnlich linear“ sind, gibt es trotzdem noch große Unterschiede im Rundstrahlverhalten, in der Abbildungspräzision, in den Verzerrungswerten, in der Impulspräzision, beim Maximal-Pegel und bei sonstigen (z.B. „topfigen“) Verfärbungen.

Mit freundlichem Gruß,

Günther Nubert