

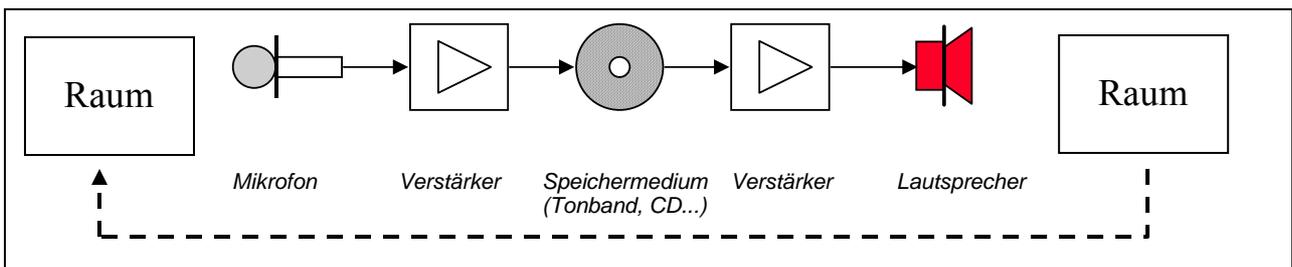
## 8. Beschallungstechnik

### 8.1 Raumakustik

Sowohl für die Schallaufnahme als auch für die Schallwiedergabe ist der Einfluss des Raumes von großer Bedeutung. Daher sind Kenntnisse über das akustische Verhalten des zu beschallenden Raumes die Grundlage für eine gute Raumbeschallung.

Merke: *Ein schlechter Raum kann mit einer Lautsprecherbeschallung nicht verbessert werden, man kann nur das Beste aus dem Raum herausholen.*

Raumeinfluss bei Schallaufnahme und –wiedergabe:

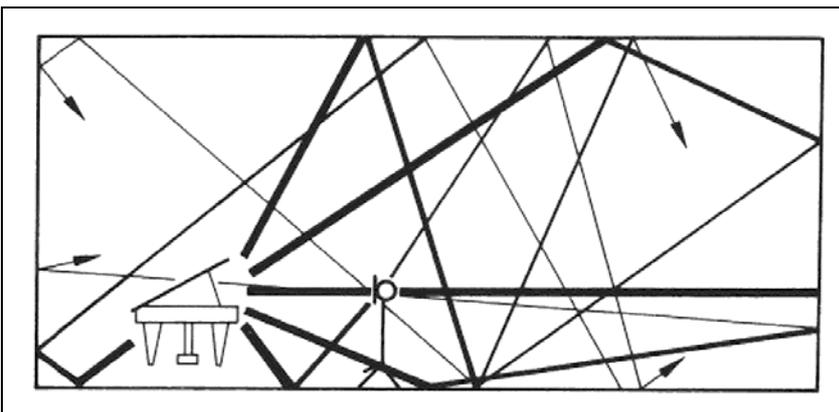


Raumeinflüsse können objektiv (Raumakustik) durch Messungen der Raumparameter und subjektiv (Hörakustik) durch verbale Beschreibung des Hörereignisses bestimmt werden.

Als objektive Raumkriterien dienen:

- Reflektogramm
- Nachhallzeit
- Hallradius

Schallausbreitung in einem Raum (Ausbreitungsrichtung und Stärke durch Schallstrahlen):

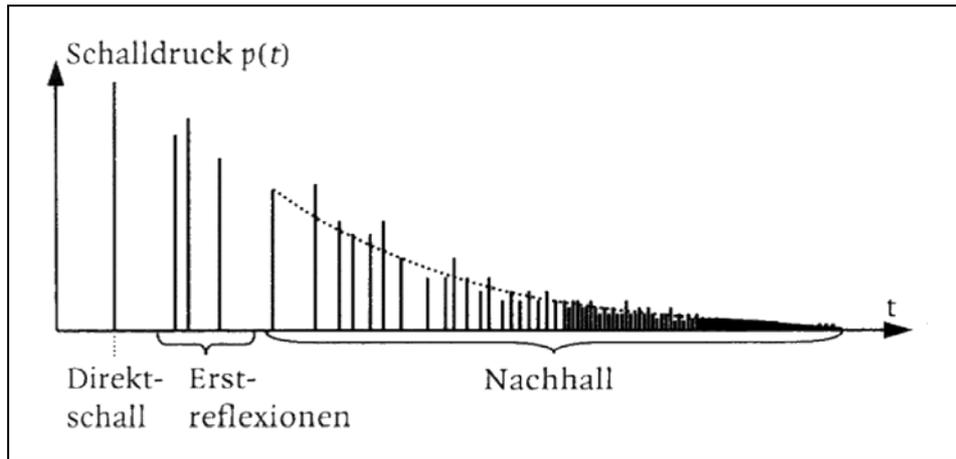


Das Reflektogramm eines Raumes besteht aus dem Direktschall, aus den frühen Reflexionen und schließlich dem Nachhall.

Schallfeld in Räumen:

1. Direktschall
2. Frühe Reflexionen
3. Diffuser Nachhall

Schallfeldanteile:



Unmittelbar nach dem Direktschall treffen in kurzen Abständen nach ca. 30-40 ms mehrere Wellenfronten beim Hörer ein, die einmal an der Decke, am Boden oder an den Wänden reflektiert wurden und als Erstreflexionen bezeichnet werden. Um zwei aufeinanderfolgende Schallsignale getrennt wahrnehmen zu können, muss ihr zeitlicher Abstand mehr als 50 ms betragen. Ab 100 ms sind deutlich zwei getrennte Ereignisse hörbar. Die große Anzahl an Mehrfachreflexionen wird schließlich immer als einheitliches, mit der Zeit verklingendes Schallereignis wahrgenommen und als Nachhall bezeichnet.

Die ersten Reflexionen verursachen einen Eindruck über die Raumgröße:

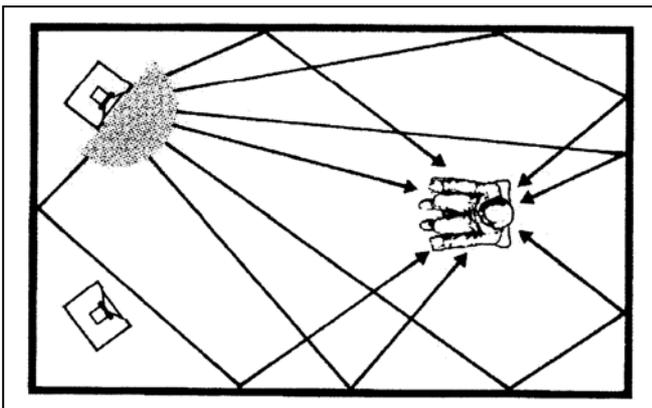
- 1- 10 ms: Kommen sie zu früh, wird insbesondere bei Mikrofonaufnahmen von Musik die Klangfarbe verfälscht.
- 10-50 ms: Erhöhung der empfundenen Lautstärke, Bestimmung von Raumart und Raumgröße
- 50-100 ms: verwischter Schalleindruck
- > 100 ms: Wahrnehmung von Echos

Guter Raumeindruck: Reflektogramm gleichmäßig abnehmend, Echos kleiner 5 dB  
 Seitliche Echos rufen Eindruck starker Räumlichkeit hervor (Surroundbeschallung).

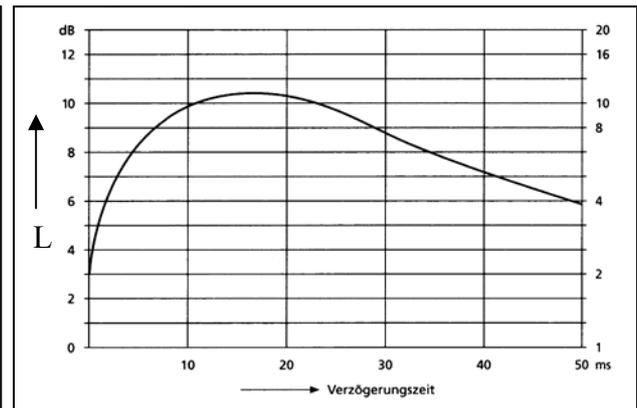
Wegen des **Precedence oder Haas-Effektes** (Gesetz der ersten einfallenden Welle) wird die Quelle jedoch immer richtig geortet.

**Das Gesetz der ersten einfallenden Wellenfront besagt, dass als Schallquelle diejenige Quelle geortet wird, deren Schallwellen zuerst eintreffen, selbst wenn eine andere Quelle einen um 10 dB höheren Pegel besitzt.**

Precedence oder Haas-Effekt:



Zulässiger Pegel des Sekundärschalls:



Da die Schallwellen bei jeder Reflexion Schallenergie durch Absorption verlieren, wird die Stärke der Reflexionen und damit die Stärke des Nachhalls rasch schwächer. Ein Maß hierfür ist die Nachhallzeit  $T_N$ , die infolge der frequenzabhängigen Absorptionsgrade der verschiedenen Materialien im Raum von der Frequenz abhängt.

Als **Nachhallzeit**  $T_N$  bzw.  $T_{60}$  wird diejenige Zeit definiert, innerhalb der der Schalldruckpegel um 60 dB abgefallen ist. Meist wird die Zeit innerhalb eines 30-dB-Pegelabfalls gemessen und verdoppelt.

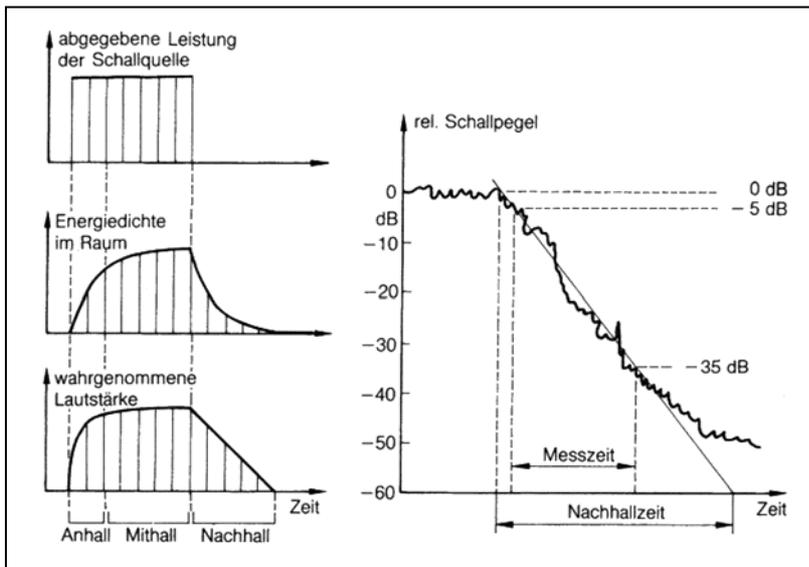
$$\frac{T_N}{s} \approx 0,163 \frac{\frac{V}{m^3}}{\frac{\alpha S}{m^2} + 0,46 \frac{\alpha_L}{dB/m} \cdot \frac{V}{m^3}}$$

$\bar{\alpha}S$ : offene-Fenster-Fläche  
 $\alpha_L$ : Absorptionsgrad in Luft  
 $f < 4$  kHz:  $\alpha_L = 0$   
 $f > 4$  kHz:  $\alpha_L$  bestimmend

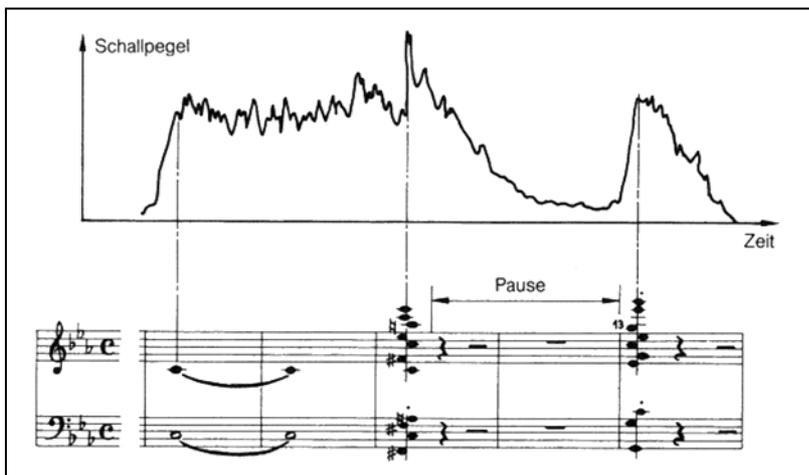
Für  $\alpha_L = 0$ :

$$\frac{T_N}{s} \approx 0,163 \frac{V/m^3}{\alpha S/m^2}$$

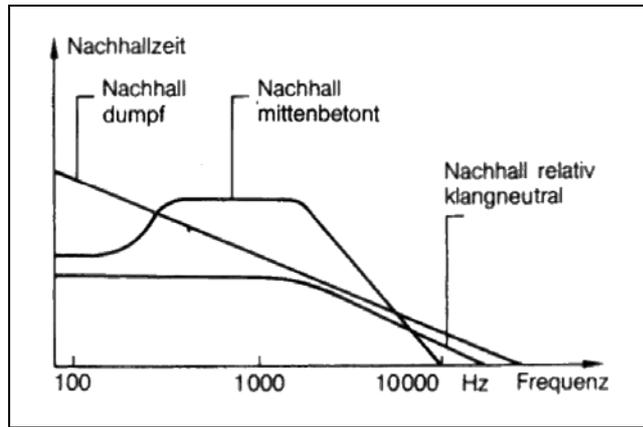
Hallarten und Messung der Nachhallzeit:



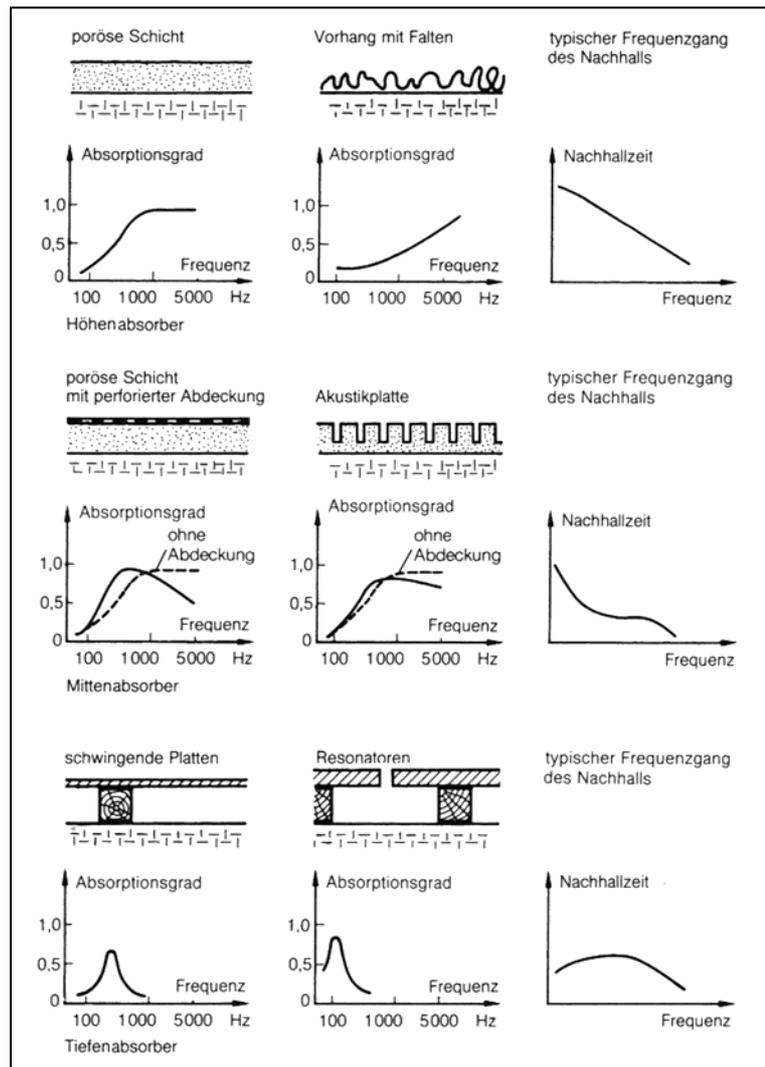
Wirkung des Nachhalls auf den Pegelverlauf von Musik in einem Konzertsaal:



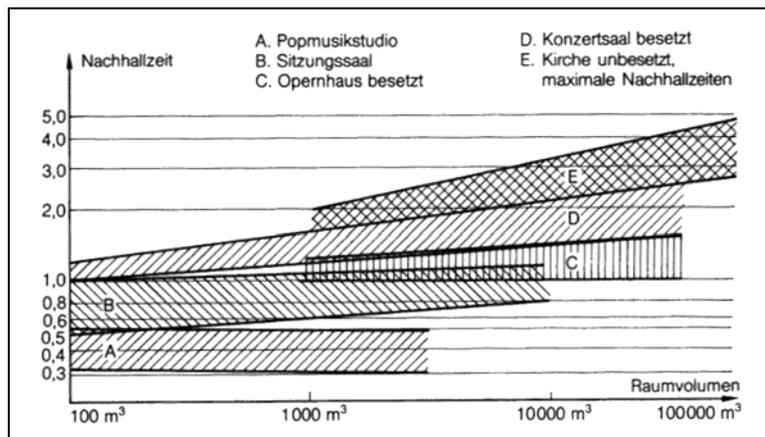
Frequenzgänge der Nachhallzeit:



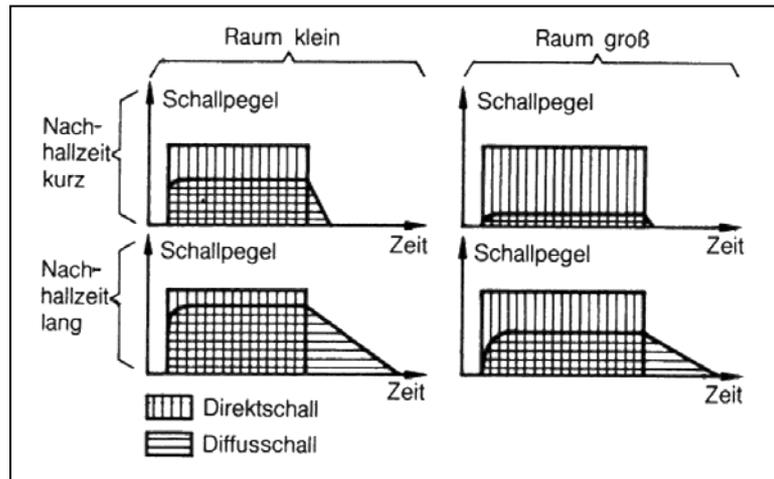
Höhen-, Mitten- und Tiefenabsorber und ihre Wirkung auf die Nachhallzeit  $T_N$ :



Günstige Nachhallzeiten für verschiedene Raumnutzung:

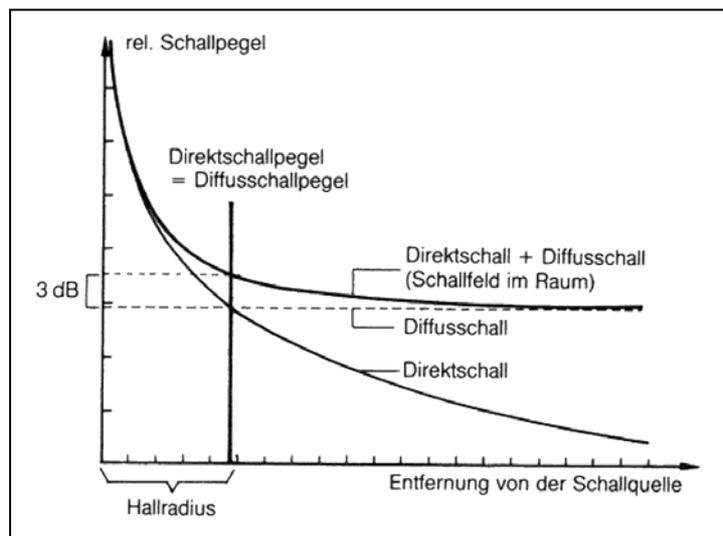


Pegelverhältnisse von Direkt- und Diffusschall bei gleichem Mikrofonabstand:



Je nach Raumgröße und nach Nachhallzeit, welche vom Absorptionsverhalten des Raumes abhängt, ergibt sich bei gleichem Mikrofonabstand zur Quelle ein unterschiedliches Verhältnis von Direktschall und Diffusschall. Dieses Verhältnis wird indirekt durch den **Hallradius**  $r_H$  ausgedrückt, der den Übergang vom mit zunehmender Entfernung abnehmenden Direktschall (ortabhängig) zum konstant bleibenden Diffusschall (ortunabhängig) darstellt. Der Diffusschall entsteht durch die vielen Reflexionen im Raum, ohne Reflexionen gibt es dementsprechend keinen Hallradius. 95 Prozent der Zuhörer sitzen bei einer Raumbeschallung im Diffusfeld.

Definition des Hallradius:



Der frequenzabhängige Hallradius  $r_H$  wird hauptsächlich durch das Absorptionsverhalten des Raumes bestimmt:

$$r_H = \sqrt{\frac{\bar{\alpha} \cdot S}{16 \pi}} = 0,14 \sqrt{\bar{\alpha} \cdot S} \quad \text{für: } \bar{\alpha} \leq 0,4$$

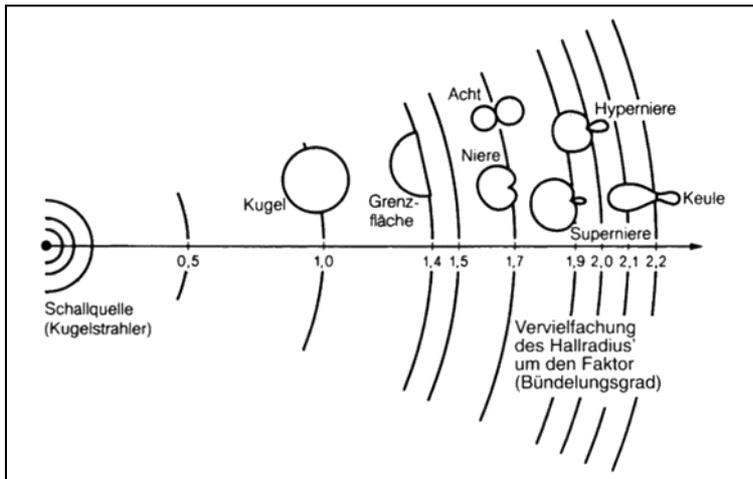
$$\frac{r_H}{m} \approx 0,057 \sqrt{\frac{V}{\frac{m^3}{T_N} s}}$$

In der Praxis ist der Hallradius im Allgemeinen erheblich größer als nach obiger Formel ermittelt, da durch gerichtete Schallabstrahlung und Verwendung von Richtmikrofonen weniger Reflexionen verursacht bzw. aufgenommen werden. Ein einfache Methode, den effektiven Hallradius  $r_H^*$

zu ermitteln, besteht darin, mit einem weit von der Quelle entfernten Mikrofon den Schallpegel zu messen und ein zweites Mikrofon der Quelle so weit zu nähern, bis gegenüber dem ersten Mikrofon ein um 3 dB höherer Pegel angezeigt wird. Hierzu wird der Mikrofontyp verwendet, der auch für die Aufnahme vorgesehen ist. Bei Kenntnis des Bündelungsgrades  $\gamma_{LS}$  von Lautsprecher und  $\gamma_{Mikro}$  von Mikrofon kann der effektive Hallradius  $r_H^*$  auch berechnet werden. Der Hallradius wird aber auch durch die Abstrahlcharakteristik von Musikinstrumenten beeinflusst, welche als gerichtet abstrahlende Quellen angesehen werden können.

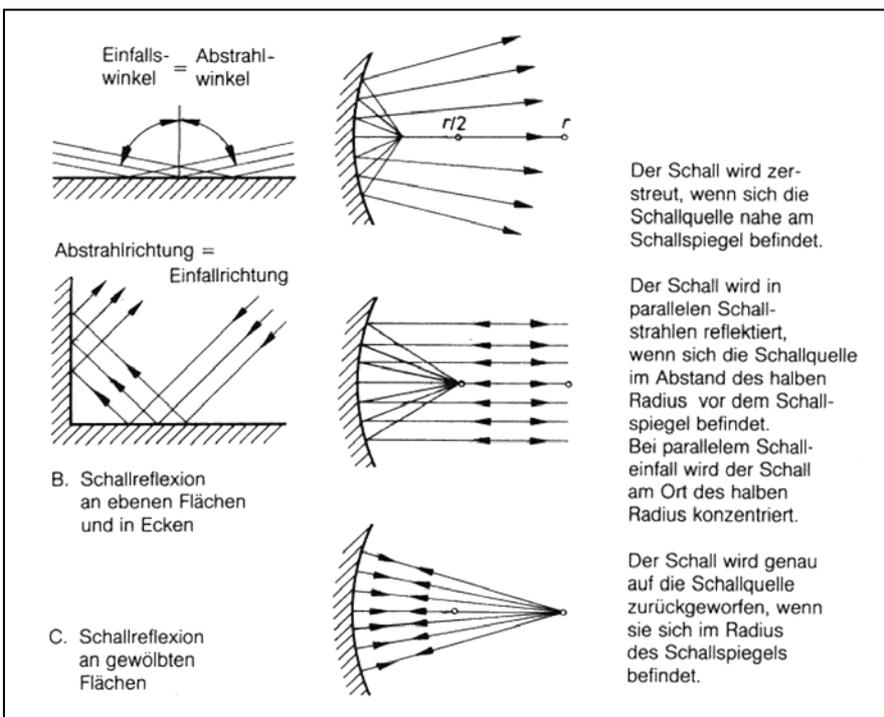
$$r_H^* = r_H \sqrt{\gamma_{LS}} \sqrt{\gamma_{Mikro}}$$

Vergrößerung des Hallradius' aufgrund der Mikrofonrichtcharakteristik:



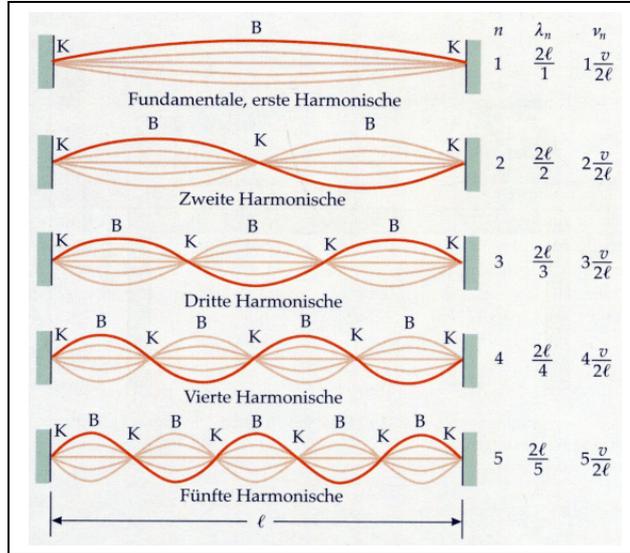
**Schallreflexionen** entsprechen den Gesetzen der Spiegelung des Lichtes: Einfallswinkel ist gleich dem Abstrahlwinkel. Eine Ecke wirft durch doppelte Reflexion den Schall in die Einfallsrichtung zurück. Gewölbte Flächen haben die Eigenschaft von Sammel- bzw. Zerstreungsspiegeln. Gewölbte Decken führen also in der Praxis oft zu starken Schallkonzentrationen, die Tonaufnahmen verfälschen können.

Schallreflexionen:

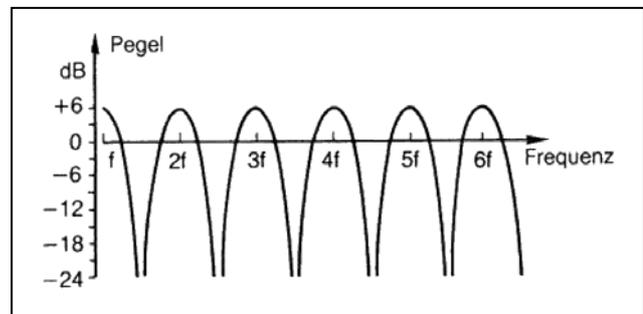
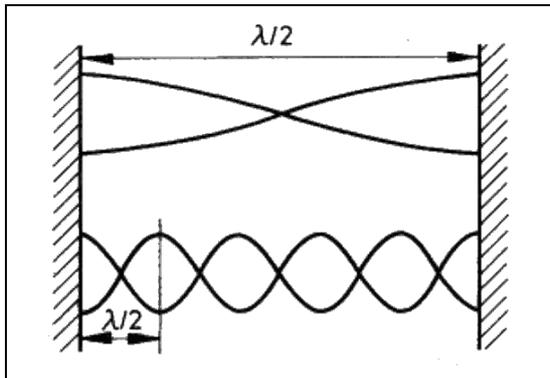


Aber auch gerade Wände können insbesondere bei tiefen Frequenzen stehende Wellen verursachen. Bei entsprechend phasenverschobener Überlagerung von direkter Schallwelle und Reflexion entsteht als Raumübertragungsfunktion eine **Kammfilterkurve**. Übertragungsmaxima sind bei Vielfachen der Grundfrequenz zu finden und müssen bei der Beschallung von Räumen durch Pegelabsenkungen mit einem Equalizer berücksichtigt werden. Kammfiltereffekte führen auch zu unterschiedlicher Basswahrnehmung bei verschiedenen Raumpositionen.

Stehende Wellen:

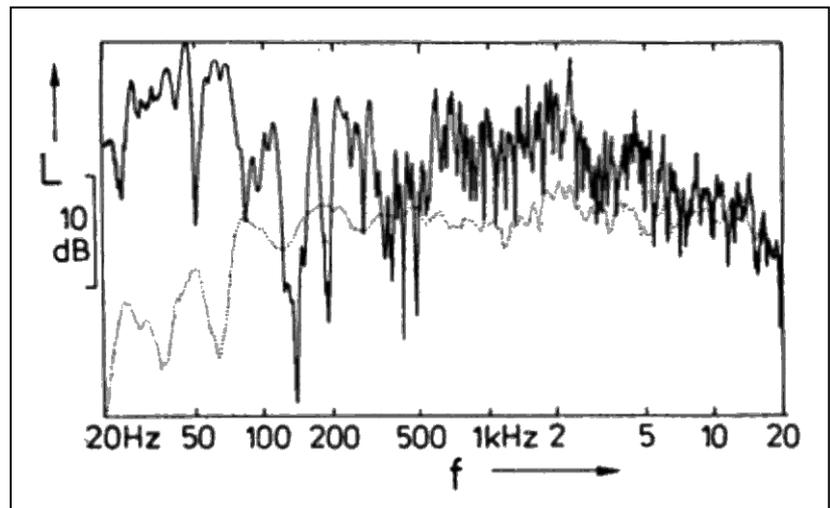


Stehende Wellen zwischen parallelen Wänden: Raumfrequenzgang nach der Überlagerung einer Schallwelle mit ihren Reflexionen (hier gleicher Pegel) bei tiefen Frequenzen, Kammfilterkurve:



Bei höheren Frequenzen besteht der Raumübertragungsfrequenzgang aus vielen Raumresonanzen. In Räumen mit Nachhallzeiten von etwa 1 Sekunde werden Steigungen der Frequenzabhängigkeit des Pegels von über 2 dB/Hz gemessen. Eine geringe Frequenzänderung der Quelle wird dadurch in eine stark hörbare Amplitudenänderung übergeführt.

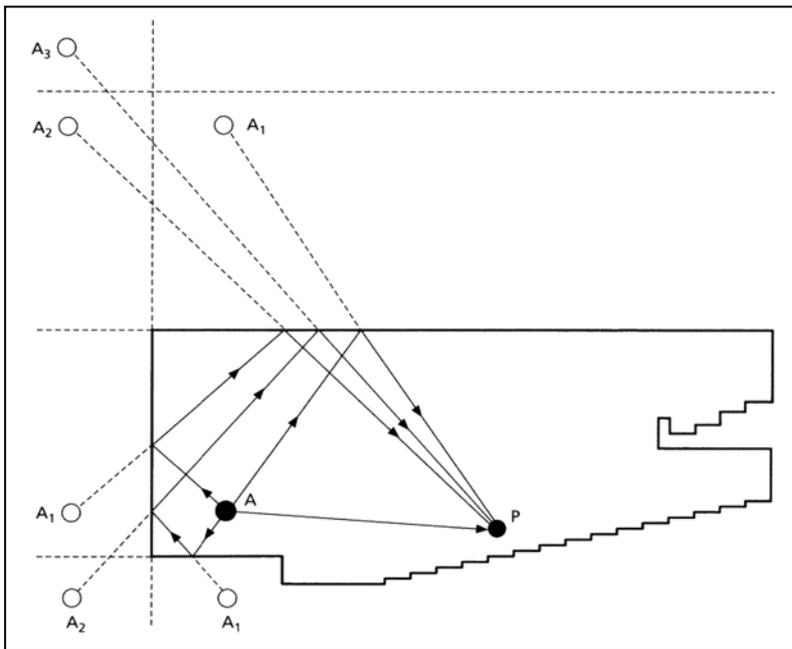
Frequenzgang eines guten Lautsprechers in einem normalen Zimmer, gemessen in 3 m Abstand. Punktiert: Messung im reflexionsarmen Raum:



Einfache Reflexionsverhältnisse bei tiefen Frequenzen können durch ein *Spiegelquellenmodell* beschrieben werden: Ein von der Quelle A ausgehender Schallstrahl reflektiert an der Wand und erreicht den Zuhörer im Punkt P. Vom Zuhörerpunkt P aus gesehen, scheint der Strahl von einer virtuellen Schallquelle  $A_1$  zu kommen, die spiegelbildlich zu den reflektierten Flächen liegt. Wird der Schallstrahl an zwei Wänden reflektiert, so kann für die erste Reflexion eine Spiegelquelle  $A_1$  erster Ordnung und für die zweite Reflexion eine Spiegelquelle  $A_2$  zweiter Ordnung angenommen werden, die der Zuhörer als virtuelle Schallquelle interpretiert. Ein dreimal reflektierter Schallstrahl scheint von der Spiegelquelle  $A_3$  dritter Ordnung auszugehen, der das Spiegelbild der unteren Spiegelschallquelle  $A_2$  bezüglich der Decke ist.

Durch Vielfachreflexionen und Berücksichtigung verschiedener Reflexionsgrade wird eine computergestützte Berechnung eines *Reflektogrammes* sehr schnell aufwendig, so dass bei höheren Frequenzen nur noch mit statistischen Aussagen gearbeitet wird.

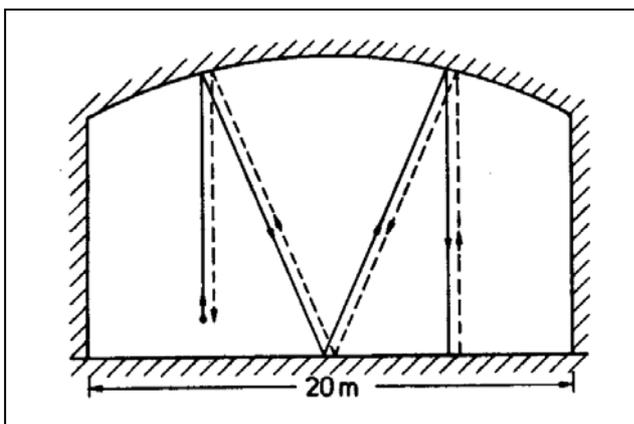
Schallstrahlen und Spiegelschallquellen in einem Auditorium:



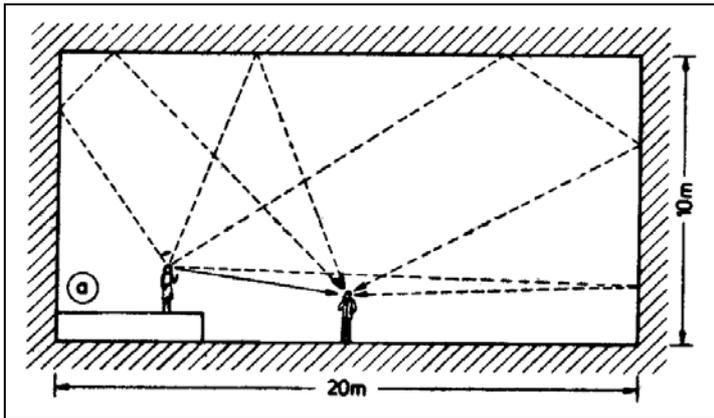
**Raumreflexionen:**

Unter *Flutterechos* versteht man periodische Echos, die zwischen parallelen Wänden entstehen. Bei Kuppelhallen mit einer Höhe von beispielsweise 12 m ergeben sich Laufzeiten von 300 ms, welche als Echos sehr gut wahrgenommen werden können.

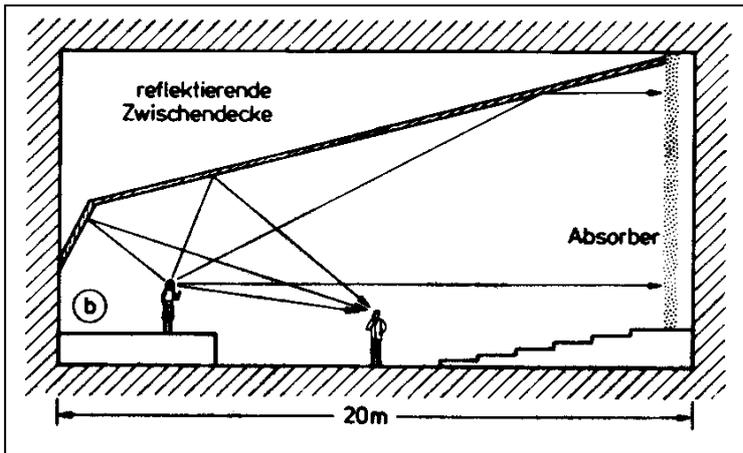
Ein Kanzeldeckel vermeidet z.B. in Kirchen Flutterechos.



Flutterecho



Normale Schallführung



Verbesserte Schallführung

## 8.2 Hörakustik

Für die subjektive Beschreibung der Hörakustik eines Raumes werden folgende Begriffe verwendet:

- Hörsamkeit:

Akustische Eignung eines Raumes für Sprach- bzw. Musikdarbietung. Eine gute Sprachverständlichkeit an allen Raumorten ohne elektroakustische Verstärkung kennzeichnet eine gute Sprachhörsamkeit des Raumes.

1. Sprachhörsamkeit
2. Musikhörsamkeit

- Durchsichtigkeit

Klarheit einer akustischen Darbietung durch Unterscheidbarkeit gleichzeitig gespielter Instrumente oder deren Register (Tonhöhe) bzw. zeitlich aufeinanderfolgender Töne. Reflexionen unter 80 ms erhöhen die Durchsichtigkeit und Räumlichkeit bei Musik, für Sprache liegt die Grenze bei 50 ms.

1. Registerdurchsichtigkeit
2. Zeitdurchsichtigkeit

- Raumeindruck

Empfindung von Größe und Ausgestaltung eines Raumes.

1. Einbezogenheit des Hörers
2. Raumgröße
3. Halligkeit
4. Räumlichkeit

### 8.3 Sprachverständlichkeit

Die objektive Beschreibung von Raumeigenschaften erfolgt über verschiedene Verfahren, die sich hauptsächlich an der Sprachverständlichkeit orientieren.

#### a, Deutlichkeitsmaß $C_{50}$ und Klarheitsmaß $C_{80}$

Als objektives Kriterium zur Beurteilung der Raumakustik dient beispielsweise die Zeitstruktur der Reflexionen. Hierbei wird die Energie von Direktschall und frühen Reflexionen bis 50 ms bezogen auf die Energie des Nachhalls. Dieses Verhältnis wird als **Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$**  (distinctness ratio) bezeichnet und ist auch ein Maß für die Sprachverständlichkeit.

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} \cdot 100 \%$$

Der logarithmierte Deutlichkeitsgrad  $D_{50}$  wird als **Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$**  (clarity factor) definiert und ist letztendlich die Differenz der Pegel der vor bzw. nach 50 ms eintreffenden Schallenergie. Ein Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$  von 0 dB bedeutet, dass der Pegel von Direktschall und der innerhalb von 50 ms eintreffenden Reflexionen genauso groß ist wie der Pegel der restlichen Reflexionen.

$$C_{50} = 10 \log D_{50} \text{ dB}$$

- $C_{50} > 2 \text{ dB}$ : sehr gute Sprachverständlichkeit
- $-3 \text{ dB} \leq C_{50} \leq 2 \text{ dB}$ : gute Sprachverständlichkeit
- $-8 \text{ dB} \leq C_{50} < -3 \text{ dB}$ : noch ausreichende Sprachverständlichkeit

Das **Klarheitsmaß  $C_{80}$** , das die Pegeldifferenz der Schallanteile vor 80 ms und nach 80 ms des Zeitsignals angibt, ist ein Maß für die Durchsichtigkeit des Raumes bzgl. Musik.

$$C_{80} = 10 \log \left( \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_{80ms}^{\infty} p^2(t) dt} \right) \text{ dB}$$

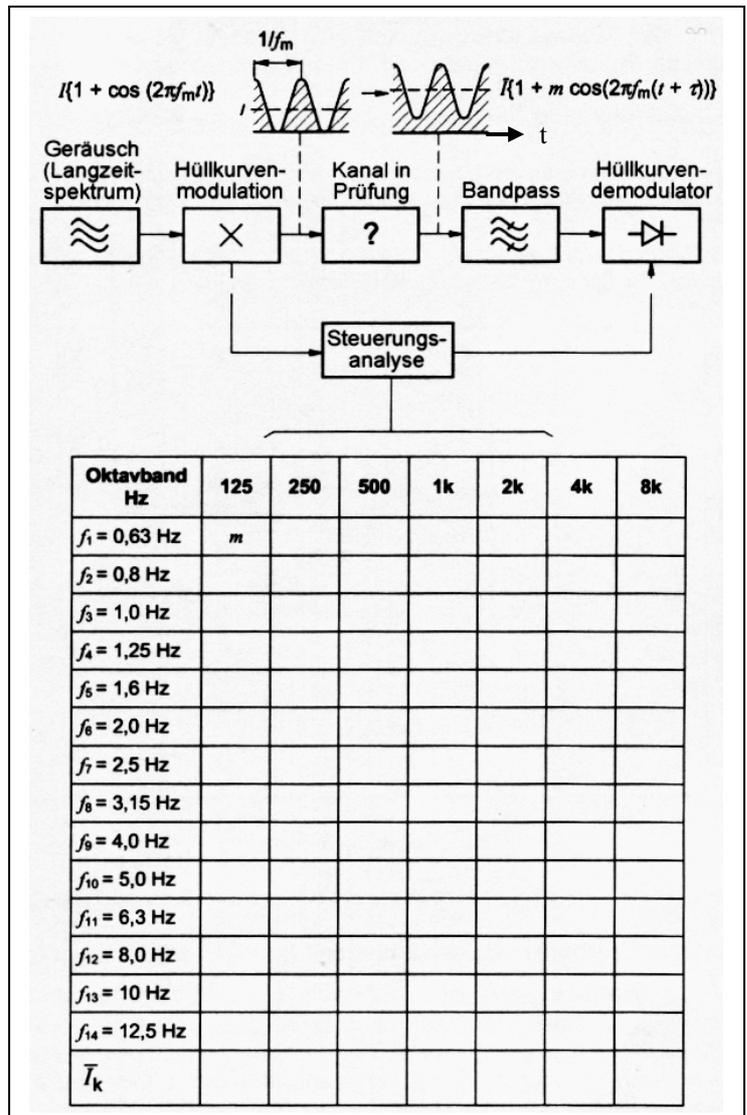
- $C_{80} > 0 \text{ dB}$ : hohe Durchsichtigkeit der Musik
- $-3 \text{ dB} \leq C_{80} \leq 0 \text{ dB}$ : von Musik umhüllt
- $C_{80} < -3 \text{ dB}$ : schlechte Durchsichtigkeit

#### b, STI: Sprach-Übertragungs-Index

Ein messtechnisch aufwendiges, aber objektives Verfahren ist in der EN 60268, Teil 16 genormt. Bei diesem Verfahren wird die Sprachverständlichkeit anhand der Modulationübertragungsfunktion bestimmt. Diese gibt im sog. **Speech Transmission Index (STI)** an, in welchem Maße die Modulationen der Sprache bei der Schallübertragung vom Sprecher zum Hörer durch Störschall oder Reflexionen verloren gehen. Änderungen des STI von 0,03 sind gerade wahrnehmbar. Das Verfahren wird vor allem bei der Bestimmung der Sprachverständlichkeit in Räumen bzw. beim Einsatz elektroakustischer Übertragungssysteme eingesetzt. Während Deutlichkeitsmaß und Klarheitsmaß nur Reflexionen berücksichtigen, schließt der STI auch Störschall ein.

Anordnung und Frequenzen der Messung für das STI-Verfahren:

$$m = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{u_{\max} + u_{\min}}$$

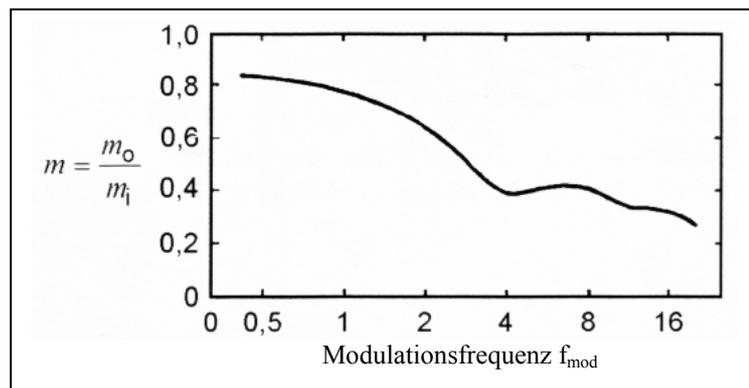


Das STI-Verfahren beruht darauf, dass die Amplitudenabsenkungen eines im Raum abgestrahlten amplitudenmodulierten Signals durch Raumreflexionen, Nachhall und Echos aufgefüllt werden. Dieser Vorgang ist ein objektives Maß für die Sprachverständlichkeit im Raum, die sogar durch nur eine Messgröße ausgedrückt wird. Als Anregungssignale werden 7 oktavgefilterte Rauschsignale verwendet, die mit 14 verschiedenen Modulationsfrequenzen  $f_{\text{mod}}$  mit Modulationsgrad  $m = 1$  amplitudenmoduliert werden.

Die Verringerung des Modulationsgrades innerhalb einer der Oktaven wird als Modulationsübertragungsfunktion (MTF)  $m(f)$  ausgedrückt. Aus allen Modulationsübertragungsfunktionen wird dann über Korrekturfaktoren, die noch Verdeckungseffekte berücksichtigen, der eigentliche STI-Wert berechnet, der ein Maß für die Sprachverständlichkeit darstellt.

Modulationsübertragungsfunktion für ein bestimmtes Oktavrauschen:

$$m(f) = \frac{m_0}{m_i}$$



STI	Sprachverständlichkeit
$0,75 < STI \leq 1$	ausgezeichnet
$0,6 < STI \leq 0,75$	gut
$0,45 < STI \leq 0,6$	befriedigend
$0,3 < STI \leq 0,45$	mangelhaft
$STI \leq 0,3$	sehr schlecht

**RASTI:** Raumakustik-Sprach-Übertragungs-Index

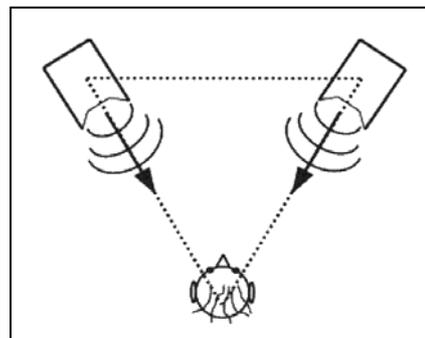
Das RASTI-Verfahren entspricht dem STI-Verfahren, er werden jedoch nur zwei Oktavbänder bei einer Mittenfrequenz von 500 Hz und 2 kHz und wenige Modulationsfrequenzen  $f_{mod}$  verwendet, so dass nur 9 Messungen notwendig sind. Es dient als Näherungsverfahren für die meisten Personen-Personen-Kommunikationen in raumakustischen Anwendungen.

$f_{oktav}/f_{mod}$ : 2k/0,7 500/1,0 2k/1,4 500/2,0 2k/2,8 500/4,0 2k/5,6 500/8,0 2k/11,2 Hz

**8.4 Nahfeldbeschallung**

Um den Einfluss des Raumes auf die Wahrnehmung von Schallereignissen möglichst gering zu halten, wird in Tonstudios manchmal eine Abhörposition im Direktfeld der Lautsprecher gewählt. Dadurch überwiegt der Direktschall gegenüber den Erstreflexionen und dem Diffusschallanteil. Der Abstand zwischen Boxen und Zuhörer sollte etwa einen Meter betragen. Der Einfluss des Raumes auf das Klangbild wird dadurch minimiert und eine objektive Beurteilung der Aufnahme ermöglicht. **Nahfeldmonitorboxen** beinhalten meist bereits einen Verstärker, sind also aktive Lautsprechersysteme, wobei wegen des geringen Hörabstandes keine großen Leistungen benötigt werden. Der Frequenzgang der Lautsprecher wird bei der Herstellung der Boxen speziell im Nahfeld optimiert.

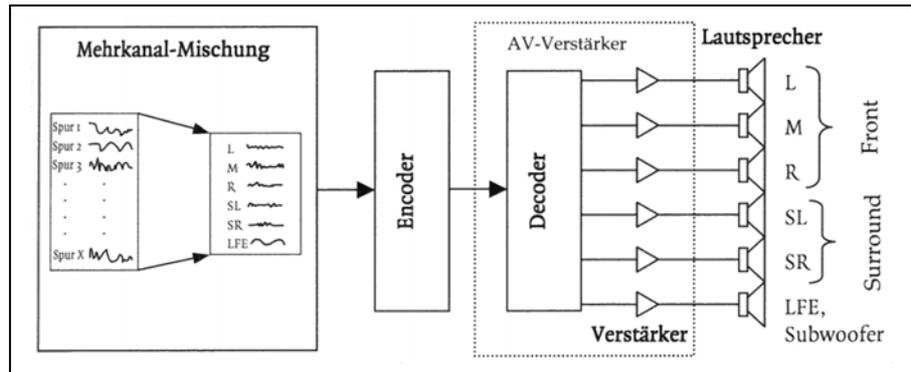
Nahfeldmonitoring:



**8.5 Surroundbeschallung**

Zur Wiedergabe von Mehrkanalton wird ein geeigneter Decoder benötigt, der im Falle vom analogen Dolby-Surround-Pro-Logic aus der aufgezeichneten Stereospur die vier unabhängigen Tonkanäle (Links, Center, Rechts, Surround) bzw. im Fall vom digitalen AC-3 (Dolby Audio Coding 3) die fünf separaten Kanäle ermittelt. Hinzu kommt ein LFE-Signal (Low Frequency Exit), das an den Subwoofer geschickt wird. Analoge Signale werden vom DVD-Spieler über zwei im HiFi-Bereich übliche koaxiale Kabel mit Cinch-Stecker, digitale Signale mit einem optischen oder koaxialen SPDIF-Kabel einem entsprechenden mehrkanaligen Verstärker mit Dolby-Decoder zugeführt.

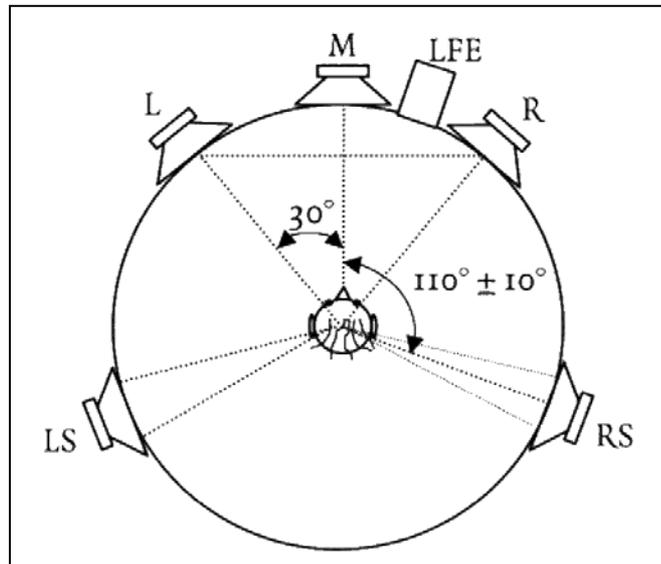
Mehrkanalton 5.1-Format:



Für eine gute Surroundwiedergabe ist eine gute Raumakustik, richtige Boxenplatzierung und eine gute Lautsprecherqualität wichtig. Die Boxen werden für Mehrkanalton auf einem gedachten Kreis um den Hörer platziert. Der Mittenlautsprecher (Center), der die Stimmen auf das Bild projiziert, soll keine seitliche Verschiebung aufweisen. Linker und rechter Lautsprecher werden um jeweils 30° ausgelenkt und bilden mit dem Hörer ein gleichseitiges Dreieck. Die Surround-Lautsprecher sollen um 110° ± 10° verschoben werden. Die Platzierung des für die Wiedergabe der tiefen Frequenzen des LFE-Kanals optimierten Subwoofers ist weitgehend beliebig, solange keine höheren Frequenzen als 100 Hz wiedergegeben werden, da das menschliche Ohr in diesem Frequenzbereich über keine Richtungswahrnehmung verfügt.

Um im Kino für möglichst viele Besucher gute Hörbedingungen zu schaffen, werden oft mehrere Lautsprecher für jeweils ein Surround-Signal verwendet. Dadurch kann die Hörzone vergrößert und der Eindruck vermittelt werden, dass sich die Effektgeräusche aus den Surround-Lautsprechern tatsächlich im Raum befinden und nicht aus einer einzigen Richtung kommen.

Optimale Lautsprecheranordnung für 5.1-Format:



### 8.6 Raumbeschallung

In größeren Räumen ist vielfach eine elektroakustische Beschallung notwendig, die Fragen über Lautsprecheranzahl, -leistung, -position, maximalen Zuhörerabstand, Verzögerungszeiten usw. aufwirft. Ein durchschnittlich geübter Sprecher kann in 1,5 m Abstand einen mittleren Schallpegel von 65 dB erzeugen. In kleineren Räumen genügt also durchaus die menschliche Stimme solange sie im maximalen Zuhörerabstand einen Pegel von 20 dB über dem Geräuschpegel liefert.

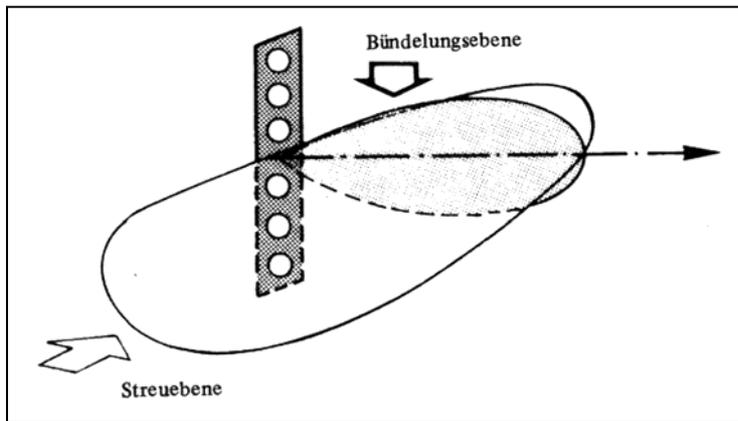
In größeren Räumen wird eine Beschallungsanlage benötigt, deren Hauptaufgabe die Sicherstellung einer guten Sprachverständlichkeit bzw. eines klaren und durchsichtigen Klangbilds ist. Darüberhinaus sollte ein möglichst natürlicher Richtungseindruck entstehen, so dass im Idealfall das

Signal der Entstehungsquelle und nicht dem Lautsprecher zugeordnet wird. Ziel der Lautsprecheranordnung ist es also, möglichst viel Direktschall und möglichst wenig Diffusschall zu den Hörerplätzen zu bringen. Dadurch werden auch die Gefahr von Rückkopplungen und der Leistungsbedarf vermindert.

Um ein möglichst geringes Diffusfeld zu erzeugen, werden zur Beschallung häufig Lautsprecherzeilen verwendet, die folgende Vorteile besitzen:

1. Als Linienschallquelle (z.B. Zug) bündeln sie in vertikaler Richtung stark und decken horizontal einen weiten Hörbereich ab (Anwendung z.B. auch in Kirchen).
2. Der Schalldruck nimmt nur mit  $1/\sqrt{r}$  ab (bei Kugelquelle:  $1/r$ )

Schallbündelung einer Lautsprecherzeile:



Die Beschallung eines Raumes erfolgt üblicherweise in Mono!

Für die Auslegung einer Beschallungsanlage sind Kenngrößen des Raumes wie sein Volumen  $V$  und die Nachhallzeit  $T_N$  notwendig, aus denen der Hallradius  $r_H$  berechnet werden kann. Ferner ist der Bündelungsgrad  $\gamma_{LS}$  der Lautsprecheranlage wichtig. Bei Übertragung von Sprache sollte der Pegel  $L_{max}$  am Zuhörerort mindestens 70 dB betragen bzw. für eine gute Sprachverständlichkeit mindestens 20 dB über dem Störpegel an der entsprechenden Position liegen.

Daraus können die Kenngrößen der Beschallungsanlage ermittelt werden:

- Maximaler Zuhörerabstand  $r_{max}$
- Lautsprecherleistung  $P_{el}$
- Verzögerungszeiten  $\tau$

Aus der Vorgabe, dass eine ausreichende Sprachverständlichkeit und damit ein gewisser Anteil an Direktschall vorhanden sein muss, ergibt sich für die maximale Entfernung  $r_{max}$  eines Zuhörers vom Lautsprecher:

$$r_{max} = 4,2 \frac{r_H \sqrt{\gamma_{LS}}}{\sqrt{\frac{T_N}{s}}}$$

Je größer die Nachhallzeit, desto geringer also der maximale Zuhörerabstand. Für einen großen Zuhörerabstand ist also eine kurze Nachhallzeit sehr wichtig.

Da ab einer Entfernung über den effektiven Hallradius hinaus der Diffusschallpegel im Raum gleich bleibt, errechnet sich der notwendige Schallpegel  $L_{1m}$  eines Lautsprechers in 1 m Abstand im Freifeld aus dem maximalen Schallpegel  $L_{max}$  am Zuhörerort wie folgt:

$$L_{1m} = L_{max} + 20 \log \frac{r_H^*}{1 m} \text{ dB} \quad \text{mit: } r_H^* = r_H \sqrt{\gamma_{LS}}$$

Da bei Lautsprecherboxen vielfach der im reflexionsarmen Raum (entspricht Freifeld) in 1 m Abstand bei 1 W elektrischer Leistung gemessene Schallpegel  $L_{1W,1m}$  angegeben wird, kann damit auf die notwendige elektrische Leistung  $P_{el}$  des Lautsprechers zurückgerechnet werden.

Durch einen höheren Bündelungsgrad  $\gamma_{LS}$  wird der effektive Hallradius  $r_H^*$  erhöht (weniger Diffusschall erzeugt) und die notwendige Lautsprecherleistung nach obiger Formel ebenfalls angehoben. Alle Zuhörer müssen im Abstrahlbereich des Lautsprechers sitzen. Vielfach wird noch eine Verstärkungsreserve von 10 dB, also ein Verstärkungsfaktor von 10 hinzugerechnet, der auch durch mehrere Lautsprecher realisiert werden kann.

Für den Fall eines dumpfen Lautsprecherklanges werden manchmal die für die Sprachverständlichkeit weniger wichtigen tiefen Frequenzen abgesenkt.

Während Heimlautsprecher bei 1 W elektrischer Leistung in 1 m Abstand etwa 85 dB Schallpegel liefern, können die weitaus größeren Beschallungsboxen 100 dB erzeugen. Heimlautsprecher können stärker bedämpft werden und sind damit impulsfester, während Beschallungslautsprecher wegen ihres höheren Wirkungsgrades wenig bedämpft und somit impulsanfälliger sind.

Lautsprecher werden durch zu geringe Verstärkerleistung eher zerstört, weil bei Vollaussteuerung der Verstärker klirrt und in Begrenzung geht, so dass viele Oberwellen mit hoher Amplitude entstehen (vgl. Rechtecksignal), die den Hochtöner einer Box zerstören können. Daher wird vielfach eine größere Verstärkerleistung mit Limiter verwendet, der eine weiche Amplitudenbegrenzung des Eingangssignals hervorruft und so die Hochtöner schützt. Ebenso werden Tieftonimpulse, welche beim Anschließen des Mikrofons bei angeschalteter Anlage entstehen können, von den Lautsprechern ferngehalten.

Die Verzögerungszeit  $\tau$  zwischen den Lautsprechern mit Abstand  $\Delta l$  ergibt sich zu:

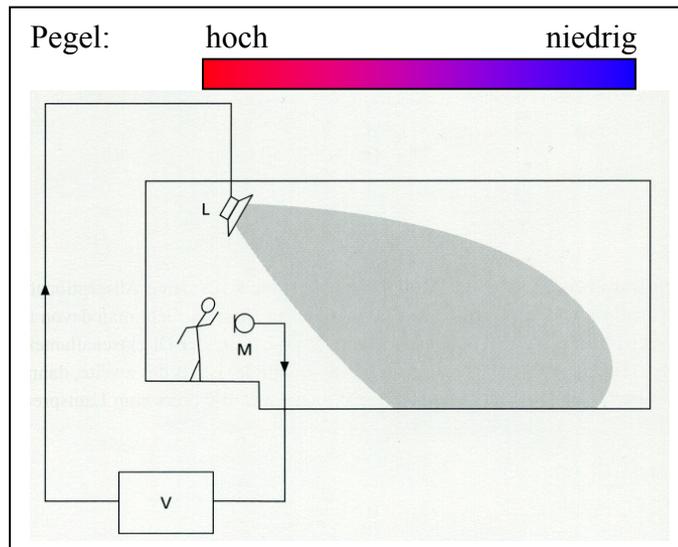
$$\tau = \frac{\Delta l}{c}$$

**Beschallungs- oder PA (public address) -Lautsprecher** besitzen folgende Eigenschaften:

- guter Wirkungsgrad
- hohe Belastbarkeit
- leicht transportierbar (Griffe)
- effektive Gestaltung (Linienarrays zusammensteckbar)
- definierte Abstrahlcharakteristik
- Frequenzgang muss nicht linear sein, da durch Equalizer an Raum angepaßt

In nicht allzu großen Räumen kommt man vielfach mit einer **zentralen Beschallungsanlage** aus. Ein Lautsprecher oder mehrere beieinander angeordnete Boxen strahlen gerichtet auf die Zuhörer. Dabei ist zu beachten, dass die rückwärtige, reflektierende Wand möglichst wenig bestrahlt wird, da ansonsten starke Reflexionen im Rücken der Zuhörer verursacht werden, die zudem stark zeitverzögert auf das Mikrofon gelangen. Infolge des mit der Entfernung abnehmenden Schalldrucks und einer guten Beschallung auch der rückwärtigen Zuhörer werden die Boxen vielfach vorne oben aufgehängt. Eine Lokalisation des Schalls im Bereich des Agierenden ist dadurch auch gewährleistet, da die vertikale Lokalisation des Gehörs schlechter ist als die horizontale. Aufgrund der Lautsprecherrichtcharakteristik befindet sich das Mikrofon nicht im Schallkegel, so dass Rückkopplungen vermieden werden.

Zentrale Beschallung:

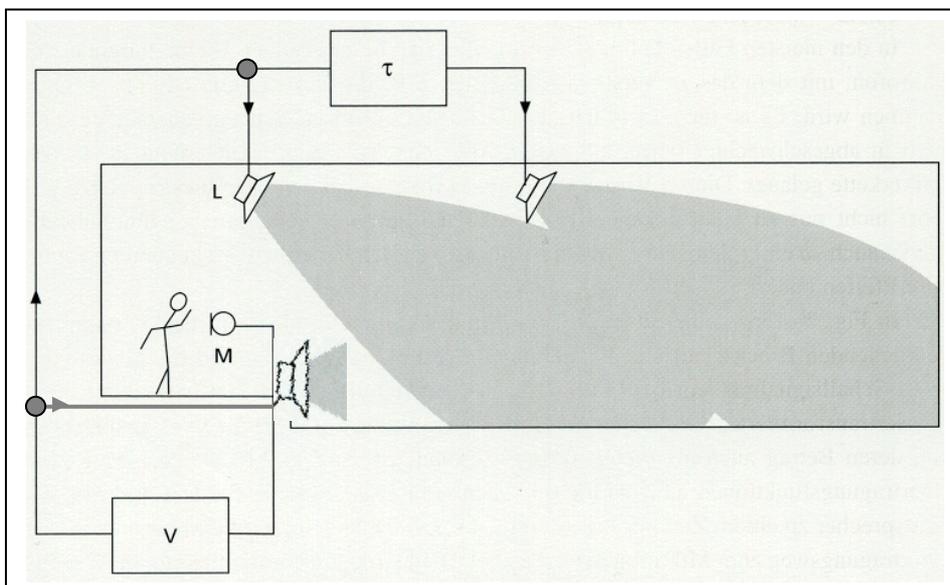


In großen Räumen ist eine **dezentrale Beschallung** mit mehreren räumlich verteilten Lautsprechern notwendig. Die Oberkante der Schallkeule des hinteren Lautsprechers sollte dabei in Ohrhöhe des hintersten Zuhörers sein, um möglichst wenig Reflexionen von der Rückwand zu erhalten. Dadurch wird eine gleichmäßigere Schallversorgung der Zuhörerschaft gewährleistet, jedoch mit der Gefahr, dass im Überschneidungsbereich der Lautsprecher das Signal doppelt gehört werden kann, wenn die Laufzeitdifferenz mehr als 17 m beträgt, was einem Laufzeitunterschied von 50 ms entspricht, und die Pegeldifferenz der beiden Schallsignale kleiner als 10 dB ist. Auch das Gesetz der ersten einfallenden Wellenfront muss beachtet werden. Der hintere Lautsprecher sollte geringeren Pegel haben und muss nicht nur um den entsprechenden Laufzeitunterschied, sondern um zusätzliche 10 ms verzögert werden, damit die erste Welle immer von vorne einfällt und dort das Signal geortet wird.

Auf der Bühne wird meist noch ein sog. „Bürgermeisterlautsprecher“ angebracht, der speziell die vorderen Reihen im Nahfeld beschallt und dort aus politischen Gründen für eine gute Sprachverständlichkeit sorgt. Je nach Abstand können Bürgermeisterlautsprecher und vorderer oberer Lautsprecher das Signal ohne Zeitversatz zueinander abstrahlen.

Beschallung ist in vielen Fällen mono, nur durch separate Mikrofone und Aufteilung der Signale für linke und rechte Lautsprecher kann ein Stereoeindruck geschaffen werden, wobei sehr viele Zuhörer nicht im optimalen Hörbereich sitzen werden.

Dezentrale Beschallung:



### **Merkmale dezentraler Beschallung:**

- zweite Lautsprecherebene in gleiche Richtung wie erste, da Schallwelle von vorne nach hinten
- zweite Lautsprecherebene wird um Laufzeitdifferenz verzögert
- Verzögerung kann bei stark absorbierenden Räumen wegen Haas-Effekt um einige Millisekunden größer sein
- Vornelokalisation in hinteren Reihen wegen Pegelabfall der Front-LS nicht immer gegeben
- Zweite Lautsprecherebene sollte nicht an Rückwand gerichtet sein
- aber: Zweite Lautsprecherebene beschallt Teil der Zuhörer auch von hinten
- Bürgermeisterlautsprecher zur Beschallung der vorderen Reihen

### **Abstimmung eines dezentralen Beschallungssystems:**

#### 1. Voreinstellung

Alle Lautsprecher verschiedener Hersteller mit parametrischem Equalizer gleich einstellen, bekannte Mikrofone verwenden, bekannten Musiktitel (Frequenzbereiche nacheinander gestaffelt, Bass, Frauenstimme) oder eigene Stimme verwenden.

#### 2. Raumresonanzen eliminieren

Eine Box umdrehen und im Abstand von wenigen Metern an die Wand strahlen lassen, um diffuses Feld zu erzeugen. Bekannten Musiktitel oder Sinussweep (Terzrauschen ist zu breitbandig) verwenden. Mit parametrischem EQ schmalbandig (hohe Güte) von tiefen zu hohen Frequenzen Verstärkung auf 15 dB drehen und auf Dröhnen der Musik im Raum achten. Es entstehen Dröhnfrequenzen bei einer Grundfrequenz (z.B. 80 Hz) und höheren Vielfachen. Bei diesen Frequenzen muss die gesamte Signalübertragung um jeweils 6 dB schmalbandig per EQ abgesenkt werden, um die Rückkopplungsgefahr zu vermindern. Bei graphischen EQ wird hierzu jeder 3. Regler heruntergezogen, da 3 Terzen eine Oktave ergeben. Anschließend wird der Pegel der Hauptlautsprecher eingestellt.

#### 3. Verzögerungen einstellen

Metronom auf Bühne mit dem Mikro aufnehmen und Verzögerung der zweiten Lautsprecherfront so einstellen, dass beim Anhören im hinteren Diffusfeld des Raumes kein Impulsecho wahrnehmbar ist und Vornelokalisation erreicht wird.

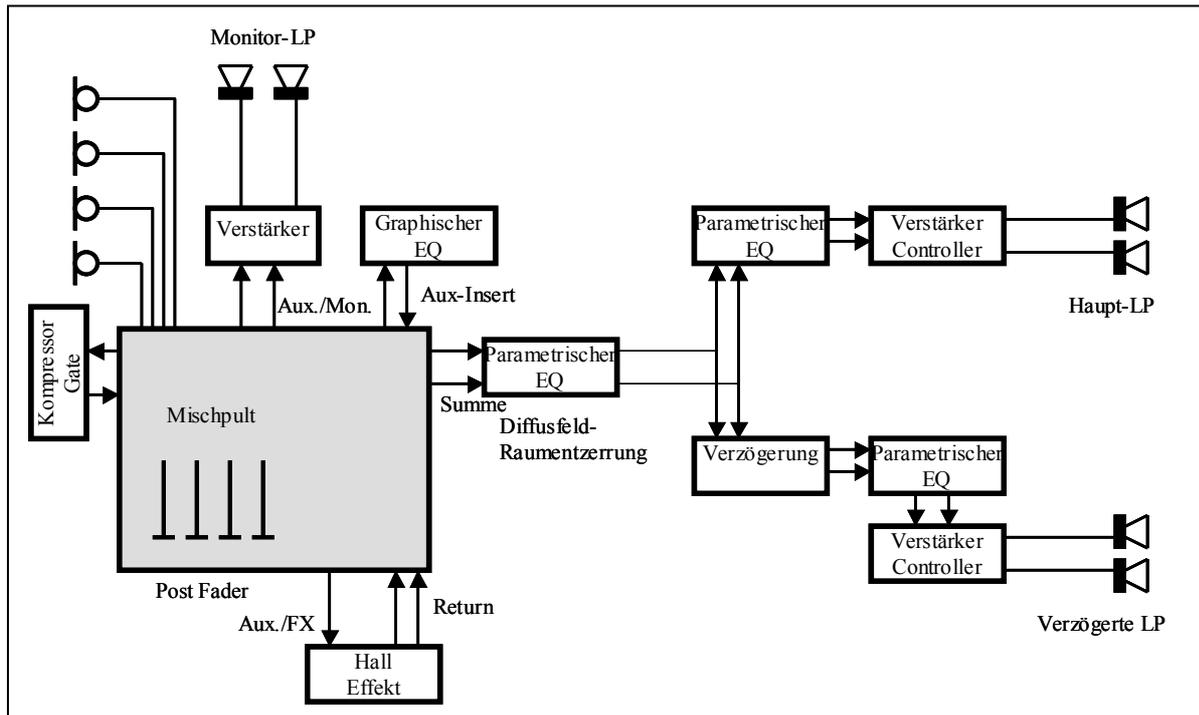
Weiterhin wird der Pegel der zweiten Lautsprecherfront eingestellt.

#### 4. Klangliche Optimierung

Zum Schluss erfolgt die klangliche Optimierung der Anlage über breitbandige EQ. Sprachbeschallung unterscheidet sich von Musikbeschallung nur dadurch, dass Musik mehr Tieftonanteil hat. Es ist nicht unbedingt ein Subwoofer notwendig, auch Ivan Rebroff singt nicht tiefer als 95 Hz.

Ansteckmikrofone sollten immer Kugelcharakteristik haben, da sie unempfindlich gegenüber Kleidungsrascheln sind.

Prinzipielle Signalverschaltung bei dezentraler Beschallung:



Das Mischpult zum Abstimmen der Beschallungsanlage steht im Beschallungsraum. Vielfach werden die Signale für die Musiker (Monitor-Lautsprecher) auf einem separaten Mischpult abgemischt und auch für die Übertragung per Radio oder Fernsehen erfolgt in einem separaten Raum eine weitere Abmischung.

### 8.7 Akustische Rückkopplung

Da das verstärkte Lautsprechersignal in abgeschwächter Form auch auf die Mikrofone und damit erneut in die Verstärkerkette gelangen kann, kann es zu einer Anregung der Verstärkeranlage kommen. Neben der üblichen Raumübertragungsfunktion  $\bar{G}(\omega)$  gibt es die mit  $G(\omega)$  bezeichnete Übertragungsfunktion zwischen Lautsprecher und Mikrofon.  $S(\omega)$  und  $S'(\omega)$  seien die Spektren des vom Redner erzeugten bzw. des beim Zuhörer am Punkt P ankommenden Signals. Als  $V$  wird die elektrische Verstärkung des Mikrofonsignals bezeichnet. Für den im Blockschaltbild dargestellten Rückkopplungskreis erhält man die Formel für ein rückgekoppeltes System:

$$S' = \bar{G} (VS + V^2GS + V^3G^2S + \dots) = \frac{V\bar{G}}{1 - VG} S$$

Die durch akustische Rückkopplung modifizierte Raumübertragungsfunktion lautet damit:

$$G'(\omega) = \frac{S'(\omega)}{S(\omega)} = \frac{V\bar{G}(\omega)}{1 - VG(\omega)}$$

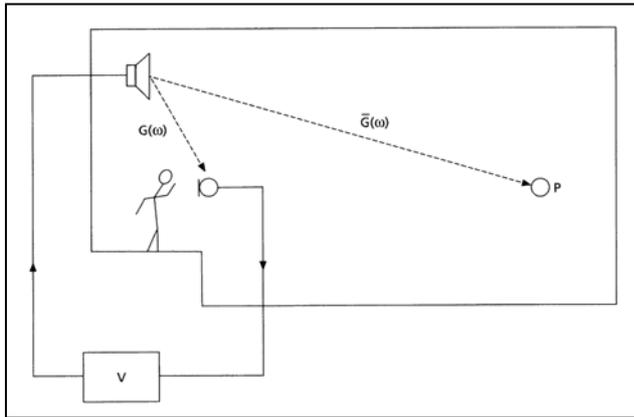
Das Produkt  $VG$  wird als Schleifenverstärkung bezeichnet. Ist es klein gegen 1, dann unterscheidet sich die modifizierte Übertragungsfunktion  $G'$  nur wenig von der natürlichen Übertragungsfunktion  $G$ . Macht man aber die Verstärkung so hoch, dass die Schleifenverstärkung merkbare Werte annimmt, dann treten Unterschiede zwischen beiden Übertragungsfunktionen deutlich hervor. Mit zunehmender Verstärkung  $V$  wächst aus einem Maximum im Spektrum eine immer größere Spitze hervor, die zu einer Verfälschung des Spektrums und zu dem bekannten Pfeifen führt.

Zusätzlich wird das Signal halliger, da es bei seinen wiederholten Umläufen in der Rückkopplungsschleife immer langsamer abklingt. Sobald die Schleifenverstärkung bei einer Frequenz den Wert 1 erreicht, wird die Anlage instabil und es tritt Selbstanregung der Anlage ein. Die Stabilitätsgrenze liegt also bei:

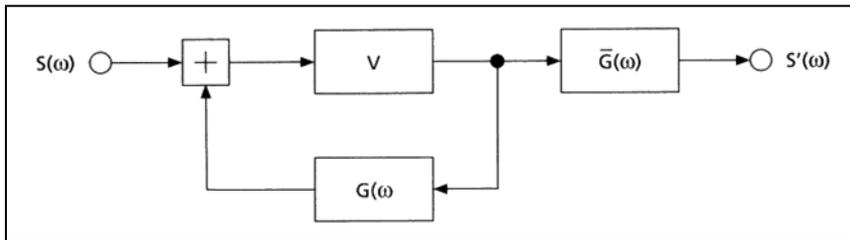
$$V|G|_{\max} = 1$$

Die durch die Rückkopplung verursachte Klangverfärbung bleibt unmerklich, solange die Verstärkung bei Sprache um 5 dB und bei Musik um 12 dB unter der Stabilitätsgrenze bleibt.

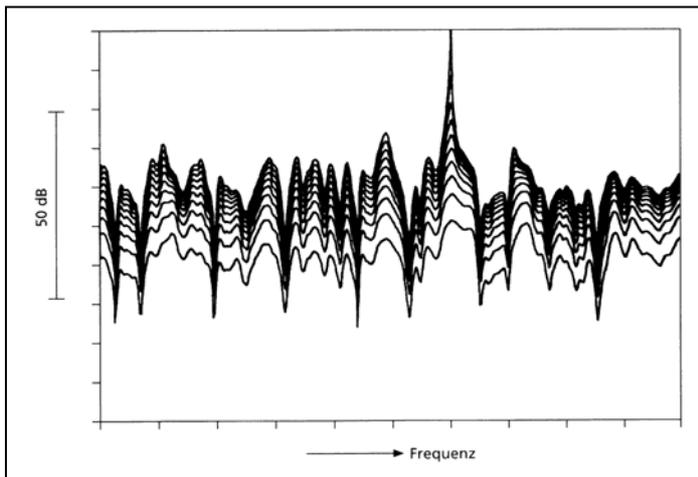
Akustische Rückkopplung in einem Raum:



Blockschaltbild der Rückkopplung:



Spektrale Veränderung eines rückgekoppelten Signals:



Zur Vermeidung der akustischen Rückkopplung muss  $G(\omega)$  betragsmäßig möglichst klein sein, was durch eine entsprechende Ausrichtung der gerichtet arbeitenden Lautsprecher und Mikrofone erreicht werden kann. Eine Reduzierung der Signalfrequenzen bei den Raumresonanzen führt zu einer weiteren Stabilität der Beschallungsanlage. Eine weitere Möglichkeit liegt in der elektrischen Verschiebung des Spektrums um einige Hertz, da dann die Maxima nicht mehr genau bei gleichen Frequenzen liegen, sondern u. U. durch die starke frequenzabhängige Raumübertragungsfunktion in Frequenzminima fallen oder zumindest etwas abgeschwächt werden. Der praktisch erzielbare Zugewinn an stabiler Verstärkung liegt hierin bei 4-6 dB.

## Maßnahmen zur Rückkopplungsverringerung:

- Richtcharakteristiken von Mikrofon und Lautsprecher
- Mikrofon und Lautsprecher jeweils in Empfindlichkeitsminimum legen
- Keine reflektierende Flächen anstrahlen
- Ebener Frequenzgang von Mikrofon und Lautsprecher
- Ebener Übertragungsfrequenzgang der Anlage
- Geringer Mikrofonabstand, um Verstärkung gering zu halten
- Tiefe Frequenzen unter 200 Hz abdämpfen wegen Kugelstrahlverhalten der Lautsprecher
- Nichtbesprochene Mikrofone abschalten, automatische Abschaltung durch voice gates
- Frequenzversetzung
- Geringe Nachhallzeit, Nachhallzeithalbwertung → 3 dB weniger Diffusschall → 3 dB Rückkopplungsreserve

## Literatur:

Das Skript enthält Auszüge und Grafiken aus nachfolgenden Büchern.

- Birkner Ch., Surround, PPVMedien-Verlag, 2002  
Conrad J.-F., Lexikon Beschallung, PPVMedien-Verlag, 2004  
Cremer L. et al., Technische Akustik, Springer-Verlag 2003  
D'Appolito, Lautsprecher-Messtechnik, Elektor-Verlag, 2005  
Dickason V., Lautsprecherbau, Elektor-Verlag, 2005  
Dickreiter M. Mikrofon-Aufnahmetechnik, Hirzel-Verlag, 2003  
Dickreiter M., Handbuch der Tonstudioteknik, Band 1, Saur-Verlag, 2008  
Dickreiter M., Handbuch der Tonstudioteknik, Band 2, Saur-Verlag, 2008  
Friesecke A., Metering, PPVMedien-Verlag, 2003  
Görne T., Tontechnik, Hanser-Verlag, 2008  
Görne T. et al., Monitoring, PPVMedien-Verlag, 2004  
Henn H. et al., Ingenieurakustik, Vieweg-Verlag, 2008  
Hömberg M., Recording Basics, PPVMedien-Verlag 2003  
Hömberg M., Taschenlexikon Studio – Band 1, PPVMedien-Verlag, 2001  
Hömberg M., Taschenlexikon Studio – Band 2, PPVMedien-Verlag, 2001  
Kremer M., Audite!, CD, Bergische Universität Wuppertal, 1999  
Kuttruff H., Akustik, Hirzel-Verlag, 2004  
Maute D., Technische Akustik und Lärmschutz, Hanser-Verlag, 2006  
Meyer J., Akustik, PPVMedien-Verlag, 2004  
Müller G. et al., Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer-Verlag, 2004  
Raffaseder H., Audiodesign, Hanser-Verlag, 2010  
Römer R. et al., Lautsprecher, Elektor-Verlag, 1989  
Pawera N., Mikrofonpraxis, PPVMedien-Verlag, 2004  
Schwamkrug G., Lautsprecher-Boxen, Elektor-Verlag, 1989  
Strickel A., Faszination Gehör, PPVMedien-Verlag, 2003  
Terhardt E., Akustische Kommunikation, Springer-Verlag, 1998  
Veit I., Technische Akustik, Vogel-Verlag, 2005  
Zölzer U., Digitale Audiosignalverarbeitung, Teubner-Verlag, 2005  
Zwicker E., Zollner M., Elektroakustik, Springer-Verlag, 2003  
Zwicker E., Fastl H., Psychoacoustics, Springer-Verlag, 2010  
Zwicker E., Psychoakustik, Springer-Verlag, 1982

Die Weiterverbreitung des Skripts außerhalb des Vorlesungsbetriebes ist nicht erlaubt.