

# Raumakustische Grundlagen

---

Die Raumakustik kann durch unterschiedliche theoretische Ansatzmodelle beschrieben werden, die sich durch den beschreibenden Frequenzbereich und Beobachtungszeitraum unterscheiden. Demnach könne folgende Theorien unterschieden werden:

- Wellentheoretische Raumakustik
- Geometrische Raumakustik
- Statistische Raumakustik

Die Raumparameter, die für die Beschallungstechnik von essentieller Bedeutung sind, werden größtenteils von der Raumübertragungsfunktion und vom Verlauf der Nachhallzeit abgeleitet. Daher wird hier im folgenden die statistische Raumakustik bemüht um aussagekräftige objektive Parameter zur qualitativen Beschreibung der subjektiven Empfindungen zu finden.

Die „Schröderfrequenz“

$$f_{\text{schroeder}} \approx 2000 \sqrt{\frac{T_N}{V}}$$

wobei T die Nachhallzeit und V das Raumvolumen ist

ist jene Grenzfrequenz, die angibt, ab welchen Frequenzbereich die Beschreibung des Schallfeldes durch statistische Parameter aussagekräftig und zulässig ist.

- Statistische Raumakustik

Bei dem Modell der geometrischen Raumakustik steigt mit fortschreitendem Beobachtungszeitraum die Komplexität, da sich die Anzahl der Spiegelquellen drastisch erhöht.<sup>1</sup> Die in allen Schallstrahlen steckende Gesamtenergie wird sich im Idealfall in alle Raumgebiete und Richtungen gleichmäßig verteilen. Über das Schallfeld können keine exakten Aussagen gemacht werden. Das Schallfeld wird diffus, d.h. die Energiedichte ist im Raum gleichverteilt. Hier geht man zur statistischen Raumakustik über. Diese beschäftigt sich vor allem mit dem Zeitverlauf von Schallfeldparametern in Räumen, wobei die geometrische Form des Raumes außer Acht gelassen wird. Zwei wesentliche Größen sind u.a. die Nachhallzeit  $T_N$  und der Hallradius  $r_H$ , auf die hier näher eingegangen wird.

---

<sup>1</sup> Vergleicht man dies mit der wellentheoretischen Raumakustik, so werden hier mit steigendem Beobachtungszeitraum die Eigenfrequenzen immer dichter, wodurch ihre Aussagekraft sinkt.

- **Die Nachhallzeit**

Betrachtet man ein Wellenpaket mit der Anfangsenergie  $\Delta W$ , das sich im Raum ausbreitet, so wird die Energie nach jeder Reflexion abnehmen. Nach einer Reflexion beträgt sie  $\Delta W(1-\alpha)$ . Die Anzahl der Reflexionen eines Wellenpaketes wird als mittlere Stoßzahl  $n$  bezeichnet.

$$n = \frac{A \cdot c}{4V} \quad [1/s]$$

$\Delta W$	Energie am Anfang
$\Delta W(1-\alpha)$	Energie nach einer Reflexion
$\Delta W = (1-\alpha)^n = (1-\alpha)^{\frac{A \cdot c \cdot t}{4V}}$	Energie nach $nt$ Reflexionen

$A$	Fläche
$V$	Volumen
$c$	Schallgeschwindigkeit

Wird die zur Zeit  $t = 0$  vorhandene Energiedichte mit  $E_0$  bezeichnet, so fällt die Schallenergiedichte mit der Zeit  $t$  nach folgender Gesetzmäßigkeit ab.<sup>1</sup>

$$E(t) = E_0 \cdot (1-\alpha)^{\frac{A \cdot c \cdot t}{4V}} = E_0 e^{\frac{A \cdot c \cdot \ln(1-\alpha) \cdot t}{4V}}$$

Die Nachhallzeit ist nun als jene Zeit definiert, innerhalb der die Energie auf den millionsten bzw. der Schalldruck auf den tausendsten Teil abklingt. Dies entspricht einer Abnahme um 60 dB .

$$\frac{E}{E_0} = 10^{-6} = e^{\frac{A \cdot c \cdot \ln(1-\alpha) \cdot t}{4V}}$$

$$\ln(10^{-6}) \cdot 4V = A \cdot c \cdot \ln(1-\alpha) \cdot t$$

$$t = T_N = \frac{\ln(10^{-6}) \cdot 4V}{A \cdot c \cdot \ln(1-\alpha)} = 13.82 \cdot \frac{4V}{-A \cdot c \cdot \ln(1-\alpha)}$$

Setzt man für die Schallgeschwindigkeit  $c = 344 \text{ m/s}$  ein, so erhält man die

---

<sup>1</sup>  $(1-\alpha)^x = e^{x \cdot \ln(1-\alpha)}$

Nachhallzeit nach Eyring

$$T_N = 0.161 \cdot \left[ \frac{s}{m} \right] \frac{V}{-A \cdot \ln(1 - \alpha)}$$

Für kleine bzw. mittlere Schallabsorptionsgrade kann  $\ln(1 - \alpha)$  durch  $-\alpha$  angenähert werden. Dies führt zur

Nachhallzeit nach Sabine

$$T_N = 0.161 \cdot \frac{V}{\alpha A}$$

Die Nachhallzeit ist einer der ältesten und wichtigsten Parameter bei der akustischen Beurteilung von Räumen.

Messung der Nachhallzeit

Die Messung der Nachhallzeit kann durch Anregung des Raumes mit schmalbandigen Signalen oder kurzen, breitbandigen Impulsen und anschließende Auswertung des Abklingvorgangs erfolgen. Ebenso kann breitbandiges rosa Rauschen verwendet werden. Aus dem aufgezeichneten Schallpegel nimmt man meist einen  $-30\text{dB}$  Abfall (von  $-5$  bis  $-35$  dB) und verdoppelt die gemessene Zeit.

Ist die Impulsantwort bekannt, so kann man durch Rückwärtsintegration der quadrierten Raumimpulsantwort (Schröder- Rückwärtsintegration) die Nachhallzeit bestimmen.

$$r^2(t) = \text{const} \cdot \int_t^{\infty} h(\tau)^2 d\tau$$

Diese Methode ist frei von statistischen Nebeneffekten, liefert allerdings keine frequenzselektive Aussage über die Nachhallzeit, die beim Design elektroakustischer Systeme von Bedeutung sein kann. Zur frequenzselektiven Messung wird in jedem Oktav- oder Terzband durch Rückwärtsintegration der quadrierten Raumimpulsantwort die Abklingkurve bestimmt und ausgewertet.

- **Hallradius**

In einem Raum kann das Schallfeld durch das Direktschallfeld und das Diffusschallfeld beschrieben werden. Das Direktschallfeld kann man näherungsweise durch die Kugelwellenausbreitung beschreiben, d.h. die Energie sinkt mit dem Quadrat des Abstandes zur Schallquelle.

$$E_{Dir} = \frac{P}{4\pi \cdot r^2 \cdot c}$$

Die Diffusschallenergie (=stationäre Energiedichte) bildet sich, wenn nach Anklingen des Schalls im Raum die von der Schallquelle abgestrahlte Energie gleich der von den Wänden absorbierten Energie ist. Sie sinkt also mit steigendem Absorptionsgrad. Im Grenzfall des schallarmen Raumes gibt es praktisch keine Diffusschallenergie.

$$E_{Diff} = \frac{4P}{4 \cdot c \cdot \alpha}$$

Der Hallradius ist nun jener Abstand, bei dem die Direktschallenergie und die Diffusschallenergie gleich groß sind (siehe Abbildung. 1.1).

$$E_{Dir} = E_{Diff} \quad \frac{4P}{4 \cdot c \cdot \alpha} = \frac{P}{4\pi \cdot r^2 \cdot c} \rightarrow r_H = \sqrt{\frac{\alpha A}{16\pi}}$$

Der Hallradius nimmt mit dem Raumvolumen zu und verringert sich mit zunehmender Nachhallzeit  $T_N$ .

$$r_H = 0.057 \sqrt{\frac{V}{T_N}}$$

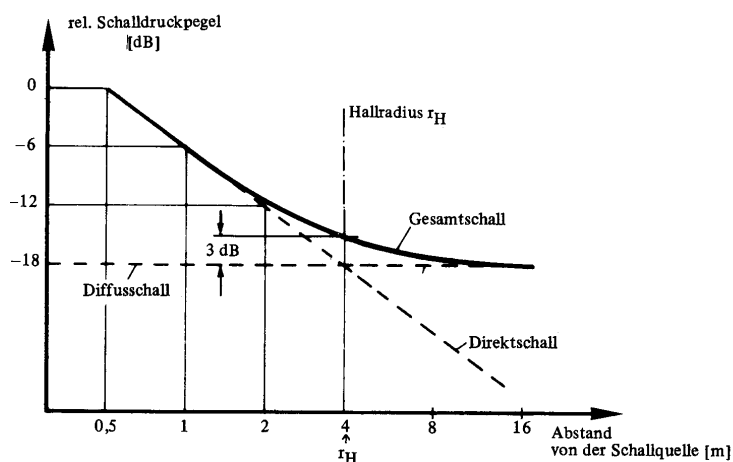


Abb. 1.1: Die Überlagerung von Direkt- und Diffusschall, Hallradius  $r_H$ , vgl. [Dickreiter, 1997]

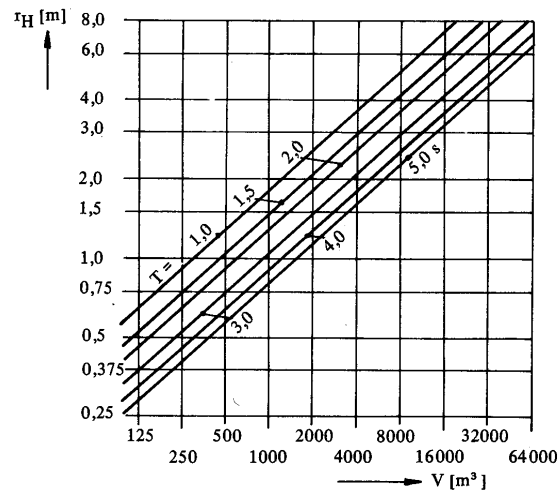


Abb. 1.2: Hallradius  $r_H$  abhängig vom Raumvolumen  $V$  und der Nachhallzeit  $T_N$ , vgl. [Dickreiter, 1997]

## Kenngrößen zur Beurteilung der Raumakustik und deren Wahrnehmung

---

Im folgenden werden die unterschiedlichen Termini angesprochen, mit Hilfe derer eine Einschätzung einer Sprach- bzw. Musikwiedergabe erfolgt. Dabei kann es sein, dass ein und derselbe Begriff je nach Literatur eine unterschiedliche Bedeutung hat. Die Begriffserklärungen stützen sich dabei auf [Beranek], wobei sie aus aktueller Literatur mit Ergänzungen versehen sind. Einige dieser Kenngrößen sind neben den akustischen Faktoren auch von musikalischen abhängig, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen wird. In Anschluss an die Begriffsbestimmungen wird die Messung (falls möglich) beschrieben.

- **Begriffserklärungen**

Nachhall, Nachhallzeit

Engl.: Reverberation oder liveness

Nachklingen eines Schalls nach Beendigung der Schallanregung. Die Nachhallzeit ist die Dauer der Wahrnehmbarkeit des Nachhalls. Sie kann einerseits durch eine Vergrößerung des Raumvolumens, andererseits durch Reduktion der gesamten Raumabsorption erhöht werden. 'Liveness' ist in erster Linie mit den Nachhallzeiten bei mittleren und hohen Frequenzen verknüpft, etwa ab 350 Hz.

## Running Reverberation

Für Musik mit wenigen langen Pausen ist nicht der gesamte Hallabfall hörbar. Hier wird der Halleindruck von dem ersten hörbaren Teil des Abfalls bestimmt. Dies wird 'running reverberation' genannt.

## Raumeindruck

Mit der Entwicklung von dreidimensionalen Audio Systemen hat die Beschreibung der Qualität des entstehenden Raumeindrucks an Bedeutung gewonnen. Dabei haben sich zwei zentrale Begriffe gebildet: Die Einfallsweite (ASW) und die Einhüllung (LEV).

### Einfallsweite

Engl.: Spaciousness: apparent source width (ASW)

Früher wurde 'spacious' mit ASW gleichgesetzt. In [Griesinger, 3] bezieht Griesinger ASW jedoch nur auf die Schallquellenverbreiterung, und nicht auf 'spaciousness'. 'Spaciousness' ist für ihn gleichbedeutend mit 'envelopment' (Einhüllung). Räumlichkeit entsteht, wenn der Zuhörer den Eindruck hat, dass die gespielte Musik aus einer größeren räumlichen Breite als der visuelle Eindruck kommt.

### Einhüllung

Engl.: Spaciousness: listener envelopment (LEV)

LEV wird dann am höchsten bewertet, wenn der Nachhall am Zuhörerohr gleichmäßig aus allen Richtungen zu kommen scheint.

In [Ahnert, Steffen] findet sich folgende Definition: „Empfindung des Zusammenwirkens von Schallquellen mit ihrer räumlichen Umgebung einschließlich der Einbeziehung des Hörers darin.“ Sie bildet sich aus folgenden Parametern: Raumgrößeneindruck, Räumlichkeit, Halligkeit und Gleichverteilung des Raumschalls. Räumlichkeit entspricht hier ASW.

### Klarheit

Engl.: Clarity

Bezeichnet das Ausmaß, zu welchem die einzelnen akustischen Bestandteile einer musikalischen Darbietung diskret wahrgenommen werden. Die Klarheit hängt dabei sowohl von den raumakustischen Qualitäten des Saales, als auch von den musikalischen Faktoren und dem Können der Musiker ab.

## Intimität

Engl.: Intimacy oder presence

Eine Halle wird als akustisch intim bezeichnet, wenn die darin gespielte Musik den Eindruck erweckt, dass die Halle klein sei. In der Sprache der Tontechniker wird dies „Präsenz“ genannt.

## Wärme

Engl.: Warmth

Wärme wird in der Musik durch die Lebendigkeit des Basses bzw. die Fülle der Basstöne (zw. 75 und 350 Hz) in Relation zu den mittleren Frequenzen (350-1400Hz) definiert. Sind die Bässe zu dominant oder die hohen Frequenzen zu stark gedämpft, wird ein Saal von Musikern gerne als „dunkel“ (‘dark’) bezeichnet.<sup>1</sup>

## Lautstärke

Engl.: Loudness

Dieser Parameter wird durch die Leistung der Schallquelle (W), die Distanz zum Zuhörer (r) und den Raumabsorptionsgrad bestimmt.<sup>2</sup> Der Raumabsorptionsgrad ist dabei erheblich größer, wenn der Saal besetzt ist.

## Flimmern

Engl.: Acoustic glare

Frühen Reflexionen mit einer harten Klangqualität können entsprechend dem optischen Flimmern ein akustisches Flimmern erzeugen. Verhindert wird akustisches Flimmern durch kleinformatige Unregelmäßigkeiten auf den Oberflächen oder geeignete Krümmungen (vgl. akustisches Barock).

## Brillanz

Engl.: Brilliance

Ein klarer und heller Klang wird als brillant bezeichnet. Bei einem brillanten Klang sind die höheren Frequenzen dominant und klingen langsam ab. Das heißt, dass die hohen Frequenzen praktisch nur durch die Luftabsorption geschwächt werden.

---

<sup>1</sup> Ein Anstieg der Nachhallzeit zu tiefen Frequenzen ist in Räumen für Musikdarbietungen erwünscht, da dies die geringere Empfindlichkeit des Gehörs bei tiefen Frequenzen ausgleicht.

<sup>2</sup> Vgl. Intensität Kap. 5.4.4

## Balance

Engl.: Balance

Die akustische Balance ist unausgewogen, wenn das Bühnenhaus oder andere Oberflächen in der Nähe der Musiker bestimmte Bereiche hervorhebt oder die Solisten nicht ausreichend unterstützt. Im Opernhaus ergibt sich die Balance zwischen Sängern und dem Orchester durch das Bühnendesign, bühnennahe Reflektorflächen für frühe Reflexionen und die Form des Orchestergrabens.

## Abstimmung

Engl.: Blend

Die Abstimmung ist definiert als die Mischung der Klänge der einzelnen Instrumente zu einem harmonischen Ganzen. Die Abstimmung hängt neben der Aufstellung des Orchesters sehr stark von schallreflektierenden Flächen in der Nähe der Bühne und vom Bühnenhaus ab.

## Zusammenspiel

Engl.: Ensemble

Das Zusammenspiel eines Orchesters hängt auch davon ab, ob die einzelnen Musiker das Spiel ihrer Kollegen hören können. Schallreflektierende Oberflächen sollen den Schall von einer Seite der Bühne zu der anderen Seite befördern. Ist kein ausgewogenes Zusammenspiel gegeben, so leidet darunter auch die Balance.

## Unverzögliche Antwort

Engl.: Immediacy of response (attack)

Vom Standpunkt der Musiker aus soll die Halle den Musikern das Gefühl geben, dass die Halle unmittelbar auf einen Ton reagiert. Die 'Immediacy of response' hängt mit der Art und Weise zusammen, in der die ersten Reflexionen aus der Halle die Ohren der Musiker erreichen. Falls die Reflexionen zu spät kommen, werden sie als störende Echos empfunden, falls sie nur aus dem unmittelbar umgebenden Bühnenbereich gehört werden, wird der Musiker die Akustik der Halle nicht wahrnehmen können.

## Textur

Engl.: Texture

Textur ist der subjektive Eindruck, den ein Zuhörer aus dem Muster, in dem die Sequenzen der frühen Reflexionen sein Ohr erreichen, ableitet. In einer ausgezeichneten Halle folgen die frühen Reflexionen dem Direktschall in einer mehr oder weniger uniformen Abfolge. Gute Textur erfordert eine große Anzahl an frühen Reflexionen, gleichförmig, aber nicht exakt

voneinander getrennt, und vor allem ohne einzelne Reflexionen, die die anderen dominieren (eine sehr starke Reflexion verdeckt kurz darauffolgende schwächere Reflexionen).

### Echofreiheit

Engl.: Freedom from echo<sup>1</sup>

Sehr hohe oder fokussierende Deckenflächen können Echos hervorrufen. Sie können auch aus langen, hohen und gekrümmten Rückwandflächen kommen, deren Brennpunkt auf oder nahe der Bühne liegt. Die Neigung zu störender Echobildung ist in Sälen mit kurzen Nachhallzeiten größer als in solchen mit langen Nachhallzeiten.

### Störeffekte auf die Klangqualität

Engl.: 'Extraneous effects on tonal quality'

Die Klangqualität kann durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst werden, z.B. durch Rasseln in einer metallischen Oberfläche, durch das Mitschwingen von Lüftungs-Rohrleitungen bei gewissen Frequenzen etc.. Kleinformatige Unebenheiten auf glatten Oberflächen können diese Effekte vermindern.

Ein anderer Störeffekt ist jener der Schallquellenverschiebung ('shift of source'). Eine spezielle schallreflektierende Fläche fokussiert einen beträchtlichen Schallanteil auf einen bestimmten Teil der Zuhörer. Dort scheint der Schall aus dieser Fläche zu kommen und nicht aus dem Orchester.

### Gleichmäßigkeit

Engl.: Uniformity of sound

Angestrebt wird eine gleichmäßige Klangqualität in der gesamten Halle. Die Qualität leidet, wenn Teile der Halle einer minderwertigen Akustik ausgesetzt sind, z.B. unter einem tiefen überhängenden Balkon oder wenn in bestimmten Bereichen Reflexionen Echos produzieren, oder die musikalische Information nur verschwommen mit einem Mangel an Klarheit gehört wird. Ziel eines elektroakustischen Systems kann es nun z.B. sein, eine gleichmäßige Klangqualität in der gesamten Halle zu erzeugen.

## • Objektive Bestimmung der Hörparameter (Messung)

Studien<sup>1</sup> ab den 60er Jahren haben schließlich zu den Gütemaßen geführt, die nun in richtiger Kombination in hohem Maße ein subjektives Empfinden einer akustischen Raumqualität beschreiben können.

---

<sup>1</sup> Starke Reflexionen, die ca. 50ms nach dem Direktschall eintreffen werden als Echo bezeichnet

Die Gütemaße werden aus den Energiebetrachtungen hergeleitet. Dazu wird die Raumimpulsantwort gemessen und ihre Energie zu verschiedenen Zeiten betrachtet. Je nach Gütemaß ergeben sich andere Integrationsgrenzen. Ein Schwerpunkt liegt in dieser Arbeit bei der Beurteilung von Räumen für musikalische Darbietungen, weshalb die Gütemaße für Sprache nur überblicksmäßig dargestellt werden und auf die Abbildung von Diagrammen, die zu deren Ermittlung erforderlich sind, verzichtet wird.

- **Gütemaße für Räumlichkeit**

IACF, IACCA, IACCE und IACCL

Die Interaurale Kreuzkorrelations-Funktion (IACF) ist ein binaurales Maß für die unterschiedlichen Schalldrücke an den Ohren (L...linkes Ohr, R...rechtes Ohr), die durch eine Quelle auf der Bühne hervorgerufen werden. Der maximal mögliche Wert ist 1.  $\tau$  nimmt Werte zwischen  $-1$  und  $1$  ms ein.

$$IACF_t(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\left( \int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$p(t)$ ...Schalldruck

Wird der Maximalwert genommen, erhält man den Kreuzkorrelationskoeffizienten.

$$IACC_t = \max |IACF(\tau)| \quad \text{für } -1 < \tau < 1$$

Unterschiedliche Integrationsgrenzen legen dabei fest, ob es sich um ein Maß für ASW oder LEV handelt.

$IACC_A$ :	von $t_1 = 0$ bis $t_2 = 1000ms$	
$IACC_{E(early)}$ :	von $t_1 = 0$ bis $t_2 = 80ms$	ASW
$IACC_{L(ate)}$	von $t_1 = 80$ bis $t_2 = 1000ms$	LEV

---

<sup>1</sup> Vgl. [Barron, Marshall], [Ando], [Yamamoto, Zuzuki], [Kimura], [Gade], [Vian, Pelorsen], [Beranek] und [Griesinger 2-4 u. 6]

## Seitenschallgrad (LF)

Der Seitenschallgrad (Lateral fraction – LF) beschreibt die Stärke der seitlichen Reflexionen. Die seitlichen Reflexionen werden mit einem Mikrofon mit Achtercharakteristik gemessen und ins Verhältnis zum Ausgang eines Kugelmikrofons gesetzt. Bildet man vom Seitenschallgrad den Logarithmus zur Basis 10, so erhält man das Seitenschallmaß. Oft wird der Seitenschallgrad mit Räumlichkeit in Verbindung gebracht.

$$LF = \frac{\int_0^{80ms} p_{\infty}^2(t) dt}{\int_0^{80ms} p^2(t) dt} \quad (\text{siehe}^1)$$

Griesinger widmet sich in [Griesinger, 3] sehr ausführlich der Messung von 'envelopment' (= 'spaciousness')<sup>2</sup>. Er stimmt darin überein, dass IACC<sub>E</sub> und LF ein Maß für ASW sind. Allerdings könnten sie keine Aussage über LEV treffen. Gerade dieses LEV ist für ihn von entscheidender Bedeutung zur Beschreibung von „Räumlichkeit“. Eine gute Möglichkeit zur Messung von 'envelopment' sei der von Bradley und Souloudre (vgl. [Bradley, Souloudre ]) vorgeschlagene Seitliche Hallgrad (lateral hall gain), allerdings mit veränderten Integrationsgrenzen (160ms statt 80ms).

## Lateral Hall Gain (LG)

$$LG = \frac{\int_0^{\infty} v_{\text{seitlich}10m}(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} p_{\text{gesamtdirekt}10m}(t)^2 dt} \quad \text{bzw.} \quad LG = \frac{\int_0^{\infty} v_{\text{seitlich}10m}(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} p_{\text{gesamtdirekt}10m}(t)^2 dt}$$

$v$  ... Schallschnelle

Der Gesamtschalldruck wird hier in einem reflexionsarmen Raum mit einem Kugelmikrofon in Abstand von 10m zur Schallquelle gemessen, die Schallschnelle mit einem Achtermikrofon.

---

<sup>1</sup> Die untere Integrationsgrenze von 5ms wird gewählt, um den Direktschallanteil mit Sicherheit ausschließen zu können.

<sup>2</sup> Griesinger unterscheidet dabei 3 unterschiedliche Arten von envelopment: Continuous Spatial Impression (CSI), Early Spatial Impression (ESI) (das eigentlich nicht einhüllend ist) und Background Spatial Impression (BSI). Auf diese wird in 2.3.3 eingegangen.

## Inter Aural Difference (IAD)

Ist der Unterschied in dB zwischen dem Quadrat eines gefilterten Differenzsignals eines Kunstkopfes und der Summe der Quadrate der zwei unterschiedlichen Ohrsignale des Kunstkopfes. Die Filterung soll das Absinken der Signaldifferenz in einem Diffusfeld unter 300 Hz ausgleichen.

IAD wird dabei in Oktavbändern berechnet. Das Ergebnis gibt als Funktion der Zeit und Frequenz an, aus welcher Richtung die in einem Raum reflektierte Energie kommt.

$$IAD(t) = 10 \log \left( \frac{(eq(L(t) - R(t)))^2}{L(t)^2 + R(t)^2} \right)$$

## Anfangsnachhallzeit (EDT)

Die EDT ('Early Decay Time') ist eine genauere Charakterisierung der Nachhallzeit. Da der Anfangsteil des Abklingvorganges im allgemeinen besser wahrgenommen wird als der gesamte 60 dB Abfall der Nachhallzeit, dominiert er auch den subjektiv empfundenen Nachhall. Die Anfangsnachhallzeit wird nun bestimmt, indem man einen Abfall von 0 auf -10dB misst und diesen anschließend auf -60dB extrapoliert (unterschiedliche Raummoden, die die entsprechende Steigung des Abfalls bewirken werden vernachlässigt).

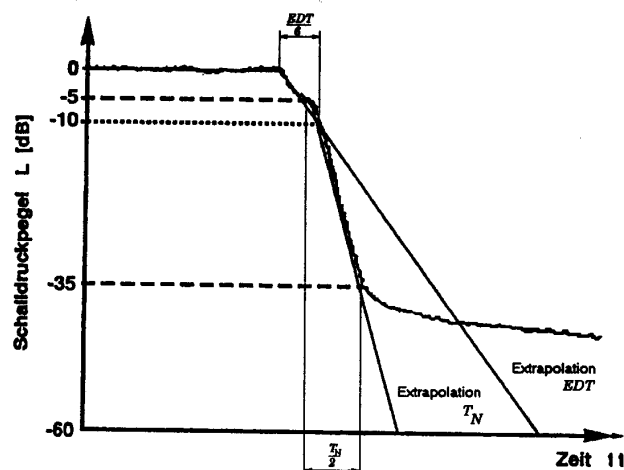


Abb. 1.3.: Nachhallzeit  $T_N$  und Anfangsnachhallzeit EDT, vgl. [Fasold, Seite 141]

Um aus der Anfangsnachhallzeit auch räumliche Eigenschaften ableiten zu können, schlägt Griesinger in [Griesinger, 3] eine neue Meßmethode vor, und zwar die seitliche Frühe Abfallzeit (LEDT).

## Lateral Early Decay Time (LEDT)

Gemessen wird die LEDT, indem man eine Linie vom Peak der Rückwärtsintegration des Schalldrucks zum Punkt der Rückwärtsintegration der IAD bei 350ms zieht. Der Abfall dieser Linie entspricht der LEDT.

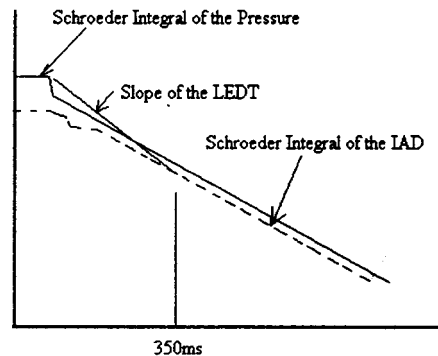


Abb. 1.4: LEDT, vgl. [Griesinger, 3]

## Running Reverberation (RR160)

$$RR160 = \frac{\int_0^{320ms} p^2(t) dt}{\int_0^{160ms} p^2(t) dt}$$

Ist ein Maß für die Stärke des Halles, den Musiker hören während sie spielen (Vgl. 2.1.2).

- **Stärke-Maß G**

Dient zur Bewertung der Lautstärke und gibt die Energiedichte an, die bei einer gegebenen Sendeleistung einer Schallquelle vorhanden ist. Der Nenner bezeichnet die Bezugsschalleistung, die bei freier Schallausbreitung in 10 m Abstand von der Quelle ermittelt wird. G liegt idealerweise zwischen 0 und 10 dB.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{t_2} p^2(x) dt}{\int_0^{t_2} p^2(rs) dt}$$

- **Baß Verhältnis (BR)**

$$BR = \frac{T_{N125Hz} + T_{N250Hz}}{T_{N500Hz} + T_{N1000Hz}}$$

$T_N$  bezeichnet die Nachhallzeiten bei den angegebenen Frequenzen.

- **Gütemaße für Sprache**

### Silbenverständlichkeit

In Räumen, die für Sprachdarbietungen verwendet werden, ist eine hohe Sprachverständlichkeit erwünscht. Ein Maß dafür ist die Silbenverständlichkeit, bei der auch eine subjektive Beurteilung der Verständlichkeit durch Testpersonen erfolgen kann. Dazu werden Logatome<sup>1</sup> vor den Testpersonen deutlich vorgesprochen. Das Verhältnis der richtig verstandenen Logatome zu den verlesenen entspricht der Silbenverständlichkeit. Gute Werte liegen zwischen 90 und 96%.

$$I_S = 96 \cdot k_F \cdot k_N \cdot k_C \quad [\%] \quad \text{Silbenverständlichkeit}$$

$k_F$	Silbenverständlichkeitsfaktor <sup>2</sup>	$k_F = k_{ft} \cdot k_{fh} \leq 1$
$k_N$	Lautstärkefaktor ( $k_N \sim 0.9$ ) <sup>3</sup>	$k_N \leq 1$
$k_C$	Verständlichkeitsfaktor	$k_C \leq 1$

$k_F$  und  $k_N$  werden aus Diagrammen entnommen,  $k_C$  berechnet sich aus dem Deutlichkeitsmaß  $C_{50}$ .

$$k_C = \sqrt[5]{\frac{1}{1 + 10^{-\frac{C_{50}}{10dB}}}}$$

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

Das Klarheitsmaß beschreibt die Durchsichtigkeit zeitlich aufeinander folgender Töne bei Musik. Es gibt das Verhältnis der eintreffenden Energie bis 80ms zur Energie, die nach 80ms kommt, an. Sein Pendant für die Sprache ist das Deutlichkeitsmaß.

$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} \qquad C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50} p^2(t) dt}{\int_{50}^{\infty} p^2(t) dt}$$

$C_{50}$  sollte größer als 0dB sein, für 2dB ist die Verständlichkeit sehr gut.

<sup>1</sup> Dies sind einsilbige Wörter, die einzeln und im Zusammenhang keinen logischen Sinn geben, eine logische Ergänzung durch die Testperson also unmöglich ist.

<sup>2</sup> Der Silbenverständlichkeitsfaktor  $k_F$  berücksichtigt eine Bandbreiteneinschränkung, wie sie z.B. durch eine Beschallungsanlage erfolgen kann. Den Faktor  $k_{ft}$  erhält man aus der unteren Grenzfrequenz,  $k_{fh}$  aus der oberen Grenzfrequenz.

<sup>3</sup> Der Faktor  $k_N$  berücksichtigt den Signal-Stör Abstand am Hörerort.

## Artikulationsverlust bei Sprache, $Al_{\text{cons}}$

Der Artikulationsverlust gesprochener Konsonanten ist für die Sprachverständlichkeit in Räumen maßgebend (vgl. [Peutz, 1971] u. [Klein, 1971]). Daraus wurde ein Kriterium zur Bestimmung der Verständlichkeit entwickelt. Voraussetzung für folgende Formel ist, dass der Signal-Stör-Abstand S/N größer als 35dB ist.

$$Al_{\text{cons}} \approx 0.652 \cdot \left( \frac{r_{LH}}{r_R} \right)^2 T_N \quad [\%]$$

$T_N$	Nachhallzeit
$r_{LH}$	Abstand zwischen Schallquelle und Hörer
$r_R \approx \sqrt{\gamma} \cdot r_H$	Richtungsentfernung (= effektiver Hallradius) <sup>1</sup>
$\gamma$	Bündelungsgrad der Schallquelle
$r_H$	Hallradius

Der Artikulationsverlust nimmt mit der Nachhallzeit und dem wachsendem Abstand zwischen Schallquelle und Hörer zu. Elektroakustisch lässt sich die Verständlichkeit durch Einsatz gerichteter Strahler verbessern. Ist  $Al_{\text{cons}} < 2\%$ , so ist ideale Verständlichkeit gegeben, ist  $Al_{\text{cons}} > 20\%$ , so ist die Verständlichkeit unbrauchbar.

## Sprachübertragungsindex RASTI (**rapid speech transmission index**)

Die Grundidee ist hier, dass nicht nur Nachhall und Störgeräusche, sondern auch alle fremden Signalveränderungen, die auf dem Weg zwischen Quelle und Hörer auftreten, die Sprachverständlichkeit herabsetzen.<sup>1</sup> Eine Verschlechterung der Sprachverständlichkeit kann als Abnahme der Modulationsübertragungsfunktion MTF angesehen werden. Beim RASTI Verfahren werden vereinfacht für 9 Modulationsfrequenzen in 2 ausgesuchten Oktavbändern (500 Hz und 2kHz) die Modulationsreduktionsfaktoren  $m(F)$  berechnet.

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi F \cdot T / 13.8)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-(S/N)/10\text{dB}}}$$

$F$	Modulationsfrequenz in Hz
$T_N$	Nachhallzeit in s
$S/N$	Signal-Stör-Verhältnis in dB

---

<sup>1</sup> Musikinstrumente, „Mund“ und Lautsprecher zeigen mit zunehmender Frequenz eine Richtwirkung, die den sogenannten „effektiven Hallradius“ frequenzabhängig vergrößert.

<sup>1</sup> siehe [Ahnert, Steffen]

Mit diesen Werten können die scheinbaren S/N Abstände  $X_i$  berechnet werden, die für den RASTI Wert benötigt werden.

$$X_i = 10 \log \left( \frac{m_i}{1 - m_i} \right) \text{dB}$$

Der RASTI Wert errechnet sich nun aus der arithmetischen Mittelung der scheinbaren Signal Störabstände in einem Frequenzband.

$$\bar{X} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 X_i$$

$$RASTI = \frac{\bar{X} + 15}{30}$$

Ein RASTI Maß größer als 80% ist Zeichen einer ausgezeichneten Verständlichkeit.

## Literatur

[Ahnert, Steffen, 1993]

W. Ahnert, F. Steffen: "Beschallungstechnik – Grundlagen und Praxis", Hirzel, Leipzig 1993.

[Dickreiter, 1997]

M. Dickreiter: "Handbuch der Tonstudioteknik", Sauer Verlag KG, München 1997.

[Griesinger]

D. Griesinger: "Objective measures of spaciousness and envelopment", Homepage-Griesinger

[Klein, 1971]

W. Klein: "Articulation loss of consonants as a basic for the design and judgement of sound reinforcement systems", J. Audio Eng. Soc. 19 (1971) 11, S. 920-922.

[Peutz, 1971]

V. M. A. Peutz: "Articulation lost of constants as a criterion for speech transmission in a room", J. Audio Eng. Soc. 19 (1971) 11, S. 915-919.