

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Wellentheoretische Raumakustik	5
2.1	Wichtige Größen und ihre SI-Einheiten	5
2.1.1	Wichtige SI-Einheiten in der Akustik	5
2.1.2	Die Pseudomaßeinheiten Neper und Dezibel	11
2.2	Herleitung der Wellengleichung	18
2.2.1	Adiabatische Zustandsgleichung des idealen Gases.....	18
2.2.2	Die EULERSchen Bewegungsgleichungen (dynamischen Grundgleichungen)	19
2.2.3	Die Kontinuitätsgleichung.....	20
2.2.4	Aufstellen der Wellengleichungen - Helmholtzgleichung	21
2.3	Lösung der Wellengleichung.....	25
2.3.1	Lösung für die ebene Welle in x -Richtung.....	25
2.3.1.1	Freie Schallausbreitung	25
2.3.1.2	Die schallharte Wand (Totalreflexion).....	30
2.3.1.3	Der Mediumswechsel (Teilreflexion, Transmission).....	33
2.3.1.4	Absorber unmittelbar vor einer schallharten Wand (Reflexion, Transmission, Absorption).....	37
2.3.1.5	KUNDTsches Rohr	38
2.3.2	Eigenmoden eines Quaderhauses	48
2.3.3	Lösung der Wellengleichung für die Kugelwelle.....	58
3	Statistische Raumakustik	71
3.1	Nachhall	71
3.1.1	Äquivalente Absorptionsfläche	73
3.1.2	Nachhalldauer und Nachhallzeit.....	75
3.1.3	SABINESche Nachhallzeitformel.....	77
3.1.4	EYRINGSche Nachhallzeitformel	82
3.1.5	Hallradius	84
3.1.6	Verkürzung des Nachhalls.....	87
3.1.7	Verlängerung des Nachhalls.....	87
3.2	Diffuse Schallreflexion	89

4	Geometrische Raumakustik	91
4.1	Die geometrischen Gesetze der Schallausbreitung	91
4.2	FRESNELSche Zonen	95
4.3	Ebene Spiegelung	97
4.4	Echo	100
4.5	Lenkung des Schalls	100
5	Raumakustische Gütemaße	111
5.1	Allgemeines zur Bestimmung der Gütemaße	111
5.2	Nachhall	113
5.2.1	Nachhallzeit (T_N , decay time)	113
5.2.2	Anfangsnachhallzeit (EDT , early decay time)	113
5.2.3	Bassverhältnis (BR , bass ratio)	114
5.3	Deutlichkeit bei Sprache	115
5.3.1	Deutlichkeitsgrad nach THIELE (D_{50})	115
5.3.2	Deutlichkeitsmaß (C_{50})	115
5.3.3	Schwerpunktszeit (t_G , centre time)	115
5.3.4	Silbenverständlichkeit	116
5.3.5	Artikulationsverlust (Al_{cons} , articulation loss of consonants)	119
5.3.6	Sprachübertragungsindex (STI, RASTI)	121
5.3.7	Common Intelligibility Scale (CIS)	127
5.4	Durchsichtigkeit bei Musik	128
5.4.1	Klarheitsmaß	128
5.5	Raumeindruck bei Musik	129
5.5.1	Hallmaß	129
5.5.2	Seitenschallgrad, Seitenschallmaß (LF , lateral energy fraction)	129
5.5.3	Raumeindrucksmaß	130
5.6	Lautstärke	132
5.6.1	Schalldruckpegelminderung	132
5.6.2	Stärkemaß (strength factor)	132
6	Schallabsorber	133
6.1	Poröse Absorber	133
6.1.1	Herstellung und Struktur	133
6.1.2	Absorberparameter	135
6.2	Lochabsorber	146
6.3	Plattenabsorber	148
6.4	Praktische Beispiele für Absorber	149

Durchströmt der Schall mit der Schnelle v eine ortsfeste *Querschnittfläche* A_Q , so fließt durch diese der Schallfluss $q = v \cdot A_Q$. Das kann zum Beispiel ein Rohr sein. Ändert sich der Rohrquerschnitt A_Q , so bleibt der Schallfluss q konstant, da sich die Querschnittfläche A_Q und die Schnelle v im entgegengesetzten Verhältnis verändern. Damit einher geht der Übergang von der Schallfelddomäne in die akustische Domäne bzw. von der Schallfeldimpedanz $Z = \frac{p}{v} = \frac{F}{A_M \cdot v} \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}^3} \right]$ auf die akustische Impedanz $Z_a = \frac{p}{q} = \frac{F}{A_M \cdot v \cdot A_Q} = \frac{p}{v \cdot A_Q} \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}^5} \right]$.

2.1.2 Die Pseudomaßeinheiten Neper und Dezibel

Der Umgang mit den logarithmischen Pseudomaßeinheiten *Neper* und *Bel* bzw. *Dezibel* (auch Pseudomaß oder Hilfsmaßeinheit genannt) gehört zum „Grundwortschatz“ einer technisch-wissenschaftlichen Ausbildung. Aus der Sicht der Akustik wird hier als Wiederholung ein kurzer Überblick über die Grundlagen der logarithmischen Pseudomaßeinheiten gegeben und anhand des Dämpfungskoeffizienten das Thema vertieft.¹

Logarithmische Verhältnisse

Logarithmische Verhältnisse sind durch das Verhältnis von zwei Leistungsgrößen oder zwei Feldgrößen definiert. Dazu zählen *Pegel* und *Maße*. Nur zu deren Kennzeichnung dürfen die Pseudomaßeinheiten *Neper* [Np] und *Bel* [B] bzw. *Dezibel* [dB] verwendet werden.

Warum logarithmische Verhältnisse?

In der Akustik liegt der Hauptgrund für die Verwendung von logarithmischen Verhältnissen im Weber-Fechner-Gesetz² begründet, das besagt, dass bei einem exponentiellen Anstieg einer physikalischen Reizstärke (Schalldruck) die dazugehörige Empfindung durch das Sinnesorgan (Lautstärkewahrnehmung) nur linear anwächst. Drückt man also eine Reizgröße als logarithmisches Verhältnis aus, so ergeben sich Werte mit sehr guter Proportionalität zur Empfindung durch das Sinnesorgan. Dies gilt u.a. für die Lautstärkewahrnehmung beim Ohr und die Helligkeitswahrnehmung beim Auge.

Pegel und Maße

Pegel sind logarithmische Verhältnisse mit einer *festen Bezugsgröße*. Als Formelzeichen ist L (für *level*) üblich. In der Regel wird das Wort „-pegel“ als Endung eines zusammengesetzten Wortes verwendet, das die Größe näher beschreibt.

¹ Weitere Quellen:

Wikipedia mit Suchbegriff: *Bel, Dezibel, Neper, Logarithmischen Größe, Hilfsmaßeinheiten*
<http://www.sengpielaudio.com/Rechner-neper.htm>
 [DIN EN 60027-3], [DIN 5493]

² Benannt nach dem Physiologen Ernst Heinrich Weber (1795-1878) und dem Psychologen und Physiker Gustav Theodor Fechner (1801-1887). Beide gemeinsam gelten als die Begründer der Psychophysik.

Beispiel für Feldgröße: Schalldruckpegel $L = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$ dB³

(mit dem Bezugsschalldruck $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$)

Beispiel für Leistungsgröße: Schalleistungspegel $L = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right)$ [dB]

(mit der Bezugsleistung $P_0 = 1 [\text{pW}] = 10^{-12} [\text{W}]$)

Wird von zwei Pegeln mit derselben Bezugsgröße die Differenz gebildet, so hängt die Pegeldifferenz nicht mehr von der Bezugsgröße ab. Für das Beispiel der Differenz von zwei Leistungspegeln ergibt sich:

$$\Delta L = L_2 - L_1 = 10 \lg \frac{P_2}{P_0} [\text{dB}] - 10 \lg \frac{P_1}{P_0} [\text{dB}] = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_0} \cdot \frac{P_0}{P_1} \right) [\text{dB}] = 10 \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right) [\text{dB}]$$

Obwohl die Leistungspegeldifferenz ebenfalls in Dezibel angegeben wird, ist die Größe ΔL kein Leistungspegel, sondern ein Leistungsmaß (siehe nächster Absatz), da die Größe im Nenner des logarithmierten Verhältnisses keine feste Bezugsgröße ist. Gelegentlich wird für ΔL auch die veraltete jedoch irreführende Bezeichnung „relativer Pegel“ verwendet.

Maße sind logarithmische Verhältnisse bei denen die Bezugsgröße *kein fester Wert* ist. Sie werden für die Beschreibung von Eigenschaften eines als Zweiter betrachteten Systems verwendet, beispielsweise eines Verstärkers. In der Regel wird das Wort „-maß“ als Endung eines zusammengesetzten Wortes verwendet, das die Größe näher beschreibt.

Beispiel für Feldgrößen: Spannungsdämpfungsmaß $A_U = 20 \cdot \lg \left| \frac{U_1}{U_2} \right|$ [dB]

(U_1 ... Eingangsspannung, U_2 ... Ausgangsspannung)

Beispiel für Leistungsgrößen: Schalldämmmaß $R = 10 \cdot \lg \frac{I_1}{I_2}$ [dB]

(I_1 ... einfallende Schallintensität, I_2 ... durchgelassene Schallintensität)

Neper

Das Neper [Np] ist für *logarithmische Verhältnisse von Feldgrößen* definiert und basiert auf dem *natürlichen Logarithmus*. Es ist eine Pseudomaßeinheit für die dimensionslosen, logarithmischen Größen Pegel und Maß bei elektrischen und akustischen Schwingungen benannt nach dem schottischen Mathematiker und Naturgelehrten John Napier (1550-1617), dessen Name latinisiert Neper lautet.

Beispiel: $L = \ln \frac{p}{p_0}$ [Np] L ... Schalldruckpegel in [Np], p_0 ... Bezugsschalldruck

³ Zum Faktor „20“ in dieser Gleichung siehe Abschnitt *Pegel von Leistungsgrößen und Feldgrößen* Seite 13.

Bel bzw. Dezibel

Das Bel [B] bzw. Dezibel [dB] ist für *logarithmische Verhältnisse von Leistungsgrößen* definiert und basiert auf dem *Logarithmus zur Basis 10*, wobei $1 \text{ [B]} = 10 \text{ [dB]}$ (in Analogie zu $1 \text{ [m]} = 10 \text{ [dm]}$). Es ist eine Pseudomaßeinheit für die dimensionslosen, logarithmischen Größen Pegel und Maß bei elektrischen und akustischen Schwingungen, benannt nach dem britischen und später US-amerikanischen Sprechtherapeut, Erfinder und Großunternehmer Alexander Graham Bell (1847-1922).

Beispiel: $L = \lg \frac{P}{P_0} \text{ [B]}$ $L \dots$ Leistungspegel in [B], $P_0 \dots$ Bezugsleistung

bzw. $L = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{ [dB]}$ $L \dots$ Leistungspegel in [dB], $P_0 \dots$ Bezugsleistung

Pegel von Leistungsgrößen und Feldgrößen

Definitionsgemäß ist das Bel bzw. Dezibel die Pseudomaßeinheit für logarithmische Verhältnisse von Leistungsgrößen und Neper die Pseudomaßeinheit für logarithmische Verhältnisse von Feldgrößen wie der elektrischen Spannung oder dem Schalldruck.

Das Quadrat des Effektivwertes einer Feldgröße F ist in einem linearen System proportional zur Leistungsgröße P und umgekehrt ist die Feldgröße F proportional zur Quadratwurzel der Leistungsgröße P . Es gilt also: $F^2 \sim P$ bzw. $F \sim \sqrt{P}$.

Damit ist es möglich einerseits logarithmische Verhältnisse von Leistungsgrößen in [Np] anzugeben und andererseits – was sehr häufig anzutreffen ist – logarithmische Verhältnisse von Feldgrößen in [B] bzw. [dB] auszudrücken.

Leistungspegel L_P in [Np]: $L_P = \ln \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P_0}} \text{ [Np]} = \ln \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ [Np]} = \frac{1}{2} \ln \frac{P}{P_0} \text{ [Np]}$

Spannungspegel L_U in [dB]: $L_U = 10 \cdot \lg \frac{U_1^2 \cdot R}{U_0^2 \cdot R} \text{ [dB]} = 10 \cdot \lg \left(\frac{U_1}{U_0} \right)^2 \text{ [dB]} = 20 \cdot \lg \frac{U_1}{U_0} \text{ [dB]}$

Der Faktor 2 bei der Darstellung von Pegeln von Feldgrößen in [dB] kommt also daher, dass das Quadrat des Effektivwertes einer Feldgröße F^2 in einem linearen System proportional zur Leistungsgröße P ist.

Historische Entwicklung von Neper und Dezibel

Die ISO (*International Organization for Standardization*) hat 1973 das Neper als die mit dem SI-Einheitensystem kohärente Größe beschlossen. In der Praxis herrscht jedoch international die Verwendung des Dezibel vor, insbesondere seit die ITU (*International Telecommunication Union*), die zwar beide Pseudomaßeinheiten anerkennt, 1968 entschieden hat, ausschließlich das Dezibel zu verwenden. Ein wichtiger Grund für diese Entscheidung dürfte mit der Tatsache zu tun haben, dass die Änderung des Schalldrucks um 1 [dB] im Bereich des gerade noch wahrnehmbaren Lautstärkeunterschieds, also im Bereich der Wahrnehmbarkeitsschwelle liegt.

Ein weiterer Grund für die Vorherrschaft des Dezibels sind sicherlich die handlicheren Zahlenwerte im praktischen Gebrauch. So bedeutet eine Verdoppelung einer Leistungsgröße eine Änderung um 3 [dB] und eine Verzehnfachung eine Änderung um 10 [dB] bzw. eine Verdoppelung einer Spannung (Feldgröße) eine Änderung von 6 [dB] und die Verzehnfachung eine Änderung von 20 [dB].

Um einem allzu häufigen Missverständnis vorzubeugen: eine Pegeländerung ist nicht getrennt für z. B. Spannung und Leistung zu bestimmen. Es gelten dieselben Pegeländerungen. So bedeutet eine Änderung um 6 [dB] eine Verdoppelung der Spannung und das bedeutet ja typisch eine Vervierfachung der Leistung (zweimal Verdoppelung = 3 + 3 = 6 [dB]) siehe dazu auch Abb. 2.3.

Umrechnung von Neper in Dezibel

Da $\ln x$ und $\lg x$ über einen fixen Faktor zusammenhängen⁴, ergibt sich auch ein fixer Faktor bei der Umrechnung von [Np] in [dB] und umgekehrt. Dabei kommt nochmals zum Tragen, dass [Np] für logarithmische Verhältnisse von Feldgrößen definiert ist und [dB] für logarithmische Verhältnisse von Leistungsgrößen. Für die Umrechnung von [dB] in [Np] ergibt sich:

$$\underbrace{\ln \frac{F_2}{F_1}}_{\text{Np-Wert}} [\text{Np}] = \left| \text{mit } \ln x = \ln 10 \cdot \lg x \right| = \ln 10 \cdot \lg \frac{F_2}{F_1} [\text{Np}] = \underbrace{\frac{\ln 10}{20}}_{0,1151} \left[\frac{\text{Np}}{\text{dB}} \right] \cdot \underbrace{20 \lg \frac{F_2}{F_1}}_{\text{dB-Wert}} [\text{dB}]$$

$$\text{Np-Wert} [\text{Np}] = 0,1151 \left[\frac{\text{Np}}{\text{dB}} \right] \cdot \text{dB-Wert} [\text{dB}] \quad (2.2)$$

Umrechnung von [Np] in [dB]:

$$\underbrace{10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1}}_{\text{dB-Wert}} [\text{dB}] = \left| \text{mit } \lg x = \lg e \cdot \ln x \right| = 10 \cdot \lg e \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} [\text{dB}] = \underbrace{\frac{20}{\ln 10}}_{8,686} \left[\frac{\text{dB}}{\text{Np}} \right] \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \ln \frac{P_2}{P_1}}_{\text{Np-Wert}} [\text{Np}]$$

$$\text{dB-Wert} [\text{dB}] = 8,686 \left[\frac{\text{dB}}{\text{Np}} \right] \cdot \text{Np-Wert} [\text{Np}] \quad (2.3)$$

Zu beachten ist, dass der Umrechnungsfaktor für die Pseudomaßeinheiten als Dimension den Quotienten der beiden Pseudomaßeinheiten [Np/dB] bzw. [dB/Np] haben muss.

Abb. 2.3 zeigt den Zusammenhang der Bel- bzw. Dezibel-Skala mit der Neper-Skala und den linearen Verhältnisswerten, die für den Vergleich logarithmisch aufgetragen sein müssen. Es ist noch einmal schön zusehen, dass der Übergang von der [Np]- auf die [dB]-Skala mit dem Übergang von Feldgrößenverhältnissen zu Leistungsgrößenverhältnissen verbunden ist und daher der quadratische Zusammenhang zwischen Feldgrößen und Leistungsgrößen zu berücksichtigen ist. Deshalb müssen die linearen Verhältnisswerte bei den Leistungsgrößen (oberste Skala) das Quadrat der linearen Verhältnisswerte bei den Feldgrößen (unterste Skala) sein.

⁴ $\ln x = \ln 10 \cdot \lg x = 2,3 \cdot \lg x$ bzw. $\lg x = \lg e \cdot \ln x = 0,434 \cdot \ln x$ wobei gilt: $1/2,3 = 0,434$

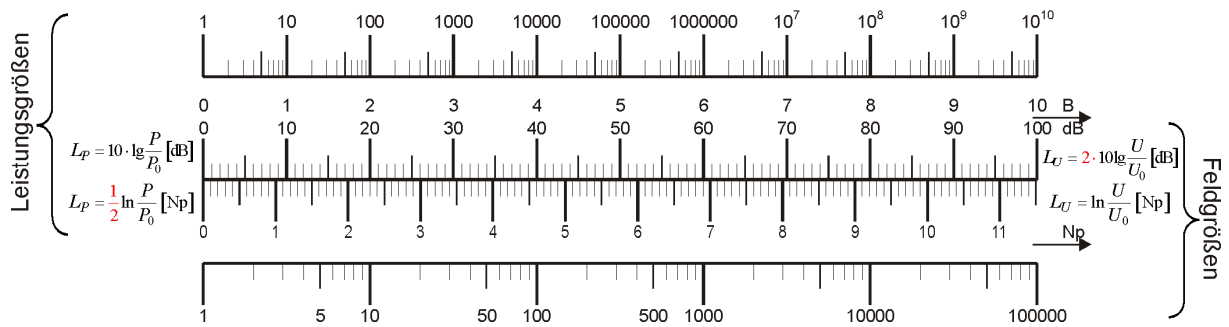


Abb. 2.3: Bel-, Dezibel- und Neper-Skalen und die linearen Verhältnisswerte

Vertiefung zu den Pseudomaßeinheiten anhand vom Dämpfungskoeffizienten

Bei vielen Einschwing- und Ausschwingvorgängen bzw. Dämpfungsvorgängen in der Natur lassen sich die Feldgrößen (z.B. Strom, Spannung, Schalldruck) durch einer e-Funktion beschreiben.

Beispiele: der Nachhall als Abnahme des Schalldruckeffektivwerts: $\tilde{p}(t) = \tilde{p}_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ (2.4)

Dämpfung des Schalldrucks bei der Ausbreitung in Luft: $p(x) = p_0 \cdot e^{-\mu x}$ (2.5)

Die weitere Betrachtung erfolgt anhand der Dämpfung des Schalldrucks bei der Ausbreitung in Luft (vgl. dazu auch Kapitel 3.1.3 ab Seite 79).

Die den Verlauf des Schalldrucks bestimmende Größe ist der Dämpfungskoeffizient μ mit der Dimension [1/m], der die Abnahme des Schalldrucks mit fortlaufender Ausbreitung beschreibt.

Absolut gesehen ist die Dämpfung am Anfang der Ausbreitung sehr groß und wird mit zunehmendem Weg immer kleiner. Nimmt man $p_0 = 1$ [Pa] und für den Dämpfungskoeffizienten den fiktiven Wert $\mu = 0,3$ [1/m] an (der wesentlich größer ist als in der Realität), so nimmt der Schalldruck nach einem Meter Ausbreitung auf 0,74 [Pa] ab, er wird also um 0,26 [Pa] gedämpft (siehe Abb. 2.4). Nach 10 m Ausbreitung erfolgt die Dämpfung lediglich noch von 0,05 auf 0,037 [Pa], also um 0,013 [Pa]. Absolut betrachtet ändert sich die Schalldruckabnahme laufend.

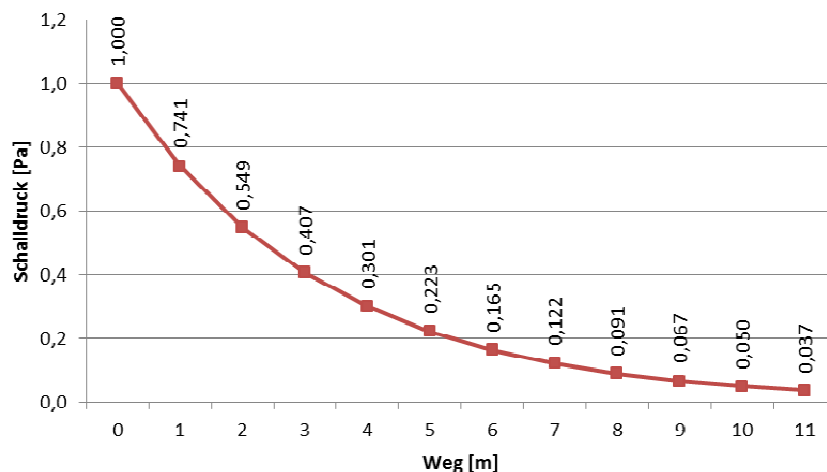


Abb. 2.4: Dämpfungsverlauf $e^{-0,3x}$

Bei relativer Betrachtung bleibt die Schalldruckabnahme jedoch immer gleich groß und sie lässt sich auf eine gleichbleibende e-Potenz zurückführen.

$$\text{Für den ersten Meter gilt: } \frac{p_0 \cdot e^{-0,3[1/m] \cdot 0[m]}}{p_0 \cdot e^{-0,3[1/m] \cdot 1[m]}} = e^{-0,3 \cdot 0 + 0,3 \cdot 1} = e^{0,3} = 1,35$$

$$\text{und ebenso gilt nach 10 Metern: } \frac{p_0 \cdot e^{-0,3[1/m] \cdot 10[m]}}{p_0 \cdot e^{-0,3[1/m] \cdot 11[m]}} = e^{-0,3 \cdot 10 + 0,3 \cdot 11} = e^{0,3} = 1,35.$$

Man könnte den Vorgang auch so beschreiben, dass eine relative Schalldruckabnahme um den Faktor 1,35 je Meter = 1,35 [1/m] erfolgt. Vorteil der relativen Betrachtung ist, dass dieser Faktor für den gesamten Kurvenverlauf gleich bleibt. Berücksichtigt man nun noch das Weber-Fechner-Gesetz und bildet den Logarithmus von diesem konstanten Faktor für die Druckabnahme, so erhält man einen Wert mit guter Proportionalität zur Lautstärkeabnahme.

Da der relative Faktor der Schalldruckabnahme immer eine e-Potenz ergibt, liegt es auf der Hand, bei der Logarithmierung den natürlichen Logarithmus anzuwenden:

$$\ln \left(\frac{p_0 \cdot e^{-0,3[1/m] \cdot 0[m]}}{p_0 \cdot e^{-0,3[1/m] \cdot 1[m]}} \right) = \ln e^{0,3} = 0,3 \left[\frac{\text{Np}}{\text{m}} \right]$$

$$\text{bzw. allgemein: } \ln \left(\frac{p_0 \cdot e^{-\mu[1/m] \cdot 0[m]}}{p_0 \cdot e^{-\mu[1/m] \cdot 1[m]}} \right) = \ln e^{\mu} = \mu \left[\frac{\text{Np}}{\text{m}} \right]$$

Damit hat man als einzige Kenngröße für die Beschreibung des Dämpfungsverlaufs der Feldgröße Schalldruck den Dämpfungskoeffizienten μ mit der Dimension [Np/m]. Dieser Dämpfungskoeffizient müsste nach der genauen Sprachregelung als Dämpfungsmaß bezeichnet werden, da der Bezugswert (= Nenner des Bruchs) keine feste Größe ist⁵.

Was ist die korrekte Dimension des Dämpfungskoeffizienten?

Das soll anhand eines Blicks in die ISO 9613-1 Norm (Dämpfung von Schall bei der Freiluftausbreitung aufgrund der klimatischen Gegebenheiten) geklärt werden. Dort findet folgender Ansatz für die Schalldruckabnahme Verwendung:

$$p(x) = p_0 \cdot e^{-0,1151 \cdot \alpha x} \quad (2.6)$$

Als Dimension für den Dämpfungskoeffizienten α ⁶ wird [dB/m] angegeben. In dieser Norm wird also gemäß der auf Seite 13 erwähnten Vorgabe⁷ durch die ITU, dass ausschließlich das Dezibel verwendet werden soll, die Dämpfung in [dB/m] angegeben. Grundsätzlich ist jedoch der Dämpfungskoeffizient in Gl. 2.6 immer mit [Np/m] anzugeben. Damit besteht die Notwendigkeit, den Dämpfungskoeffizienten α , der in [dB/m] gegeben ist, für die Verwendung in Gl. 2.6 in den Dämpfungskoeffizienten μ mit [Np/m] umzurechnen, wobei entsprechend der Neper-Dezibel Umrechnung in Gl. 2.2 gilt:

$$\text{Np-Wert [Np]} = 0,1151 \left[\frac{\text{Np}}{\text{dB}} \right] \cdot \text{dB-Wert [dB]} \text{ bzw. } \mu \left[\frac{\text{Np}}{\text{m}} \right] = 0,1151 \left[\frac{\text{Np}}{\text{dB}} \right] \cdot \alpha \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right] \quad (2.7)$$

⁵ Siehe Abschnitt *Pegel und Maße*, Seite 11

⁶ In Anlehnung an die ISO 9613-1 Norm wird ausschließlich in diesem Abschnitt das Formelzeichen α für den Dämpfungskoeffizienten verwendet. Im restlichen Skriptum steht α für den Absorptionsgrad.

⁷ Siehe Abschnitt *Historische Entwicklung von Neper und Dezibel*, Seite 13

Damit ist einerseits der Faktor 0,1151 [Np/dB] im Exponenten in der Gleichung für die Schalldruckabnahme in der ISO 9613-1 geklärt und andererseits auch die Frage nach der Dimension des Dämpfungskoeffizienten in Gl. 2.6 beantwortet: korrekterweise ist der Dämpfungskoeffizient für Feldgrößen immer mit [Np/m] anzugeben, und muss für die Verwendung in Gl. 2.6 in [Np/m] umgerechnet werden, da α in [dB/m] vorliegt.

Die Pseudomaßeinheiten [Np] und [dB] sind als logarithmische Verhältnisse nach dem SI-Einheitensystem dimensionslos. In Bezug auf die Dimension kann man also schreiben: [Np] = [1] und [dB] = [1]. Daher findet man in der Literatur für den Dämpfungskoeffizienten häufig auch die Dimensionsangabe [1/m], wie sie auch am Beginn dieses Abschnitts verwendet wurde. Damit wird eine Unschärfe offensichtlich, die wenig Auswirkungen hat, solange nur die allgemeine Formel betrachtet wird (siehe z. B. Gl 2.5). Da ist es ausreichend zu wissen, dass es sich um einen Dämpfungskoeffizienten mit [1/m] handelt, der den Exponenten der e-Funktion dimensionslos macht.

Sobald aber eine konkrete Berechnung nach Gl. 2.6 ansteht, kommt man um diese Unschärfe nicht mehr herum und muss den Dämpfungskoeffizienten in [Np/m] verwenden oder sofern der Dämpfungskoeffizient in [dB/m] angegeben ist, diesen entsprechend Gl. 2.7 in [Np/m] umrechnen. Für die Berechnung der Dämpfung entlang einer Wegstrecke von x Metern spielt es aus praktischer Sicht jedoch keine Rolle, ob der Dämpfungskoeffizient als μ in [Np/m] oder als α in [dB/m] angegeben ist. Man erhält lediglich einmal als Ergebnis für die Dämpfung μx [Np] und im anderen Fall αx [dB], die wieder entsprechend der Neper-Dezibel-Umrechnung ineinander umgerechnet werden können.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass neben dem Schalldruck-Dämpfungskoeffizienten μ in [Np/m] in der Literatur häufig auch ein Energiedämpfungskoeffizient m zu finden ist, der den energetischen Abfall beschreibt (siehe Kapitel 3.1.3, Gl. 3.15, Seite 79). Wegen des quadratischen Zusammenhangs zwischen Feldgrößen und Energiegrößen ergibt sich $m = 2\mu$. Damit ergäbe sich die Dimension für m ebenfalls mit [Np/m].

Auch hier soll mit einem Blick in die EN ISO 354 Norm (Messung der Schallabsorption in Hallräumen) dieser Zusammenhang näher untersucht werden: Für die Berechnung von m ist dort angegeben, dass man diesen Luftabsorptionskoeffizienten in [1/m]⁸ aus dem in der ISO 9613-1 angegebenen Dämpfungskoeffizienten α [dB/m] nach folgender Formel erhält:

$$m = \frac{\alpha}{10 \lg e} \quad (2.8)$$

Ruft man sich den in Gl. 2.7 angegebenen, aus der ISO 9613-1 bekannten Zusammenhang in Erinnerung, dass

$$\mu \left[\frac{\text{Np}}{\text{m}} \right] = 0,1151 \left[\frac{\text{Np}}{\text{dB}} \right] \cdot \alpha \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right] = \frac{\ln 10}{20} \left[\frac{\text{Np}}{\text{dB}} \right] \cdot \alpha \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right]$$

so ergibt sich für den in Gl. 2.8 angeführten Energiedämpfungskoeffizienten m aus der EN ISO 354:

⁸ Die Norm ist hier sehr unscharf: sie sagt weder, dass es sich um einen Energiedämpfungskoeffizienten handelt, noch direkt, ob der Dämpfungskoeffizient in Np/m oder dB/m angegeben ist.

$$m = \frac{\alpha}{10 \lg e} \left[\frac{\text{Np}}{\text{m}} \right] = \frac{\ln 10}{10} \cdot \alpha \left[\frac{\text{Np}}{\text{m}} \right] = 2 \cdot \frac{\ln 10}{20} \left[\frac{\text{Np}}{\text{dB}} \right] \cdot \alpha \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right] = 2\mu \left[\frac{\text{Np}}{\text{m}} \right]$$

Somit ergibt sich bei genauer Betrachtung der EN ISO 354, dass der Energiedämpfungs-koeffizient m das doppelte des Schalldruck-Dämpfungskoeffizienten μ ist und beide die gleiche Dimension [Np/m] haben.

2.2 Herleitung der Wellengleichung

Tritt an einer Stelle eines elastischen Mediums eine Druckänderung auf, so erfahren die der Aktionsstelle angrenzenden Mediumteilchen Verschiebungen, welche ihrerseits dann wieder auf die benachbarten weiteren Mediumteilchen wirken. Die Druckänderungen breiten sich im Medium als eine fortschreitende Welle aus. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit wird als Schallgeschwindigkeit c , die Schwinggeschwindigkeit der Teilchen um ihre Ruhelage als Schallschnelle \bar{v} bezeichnet.

Im Folgenden werden ausgehend von den physikalischen Grundgesetzen die Wellengleichungen für die Schallausbreitung hergeleitet.

2.2.1 Adiabatische Zustandsgleichung des idealen Gases

Eine der 3 Adiabategleichungen [griech.: $a \cong$ nicht, $dia \cong$ durch, $batisch$ (von $bainein$) \cong gehen, d.h. nichtdurchgängig für Wärmeenergie bzw. kein Wärmeaustausch mit der Umgebung; $dQ = 0$] (auch POISSONSche Gleichungen) lautet (Herleitung und grundlegende Zusammenhänge siehe Anhang A)

$$p \cdot V^\kappa = \text{const.} \quad (2.9)$$

$$p \cdot V^\kappa = p_{\bar{=}} \cdot V_{\bar{=}}^\kappa$$

$$p = p_{\bar{=}} \cdot V_{\bar{=}}^{-\kappa} \quad \text{also} \quad p = f(V)$$

Da in der Akustik mit den physikalischen Größen Druck und Dichte, und nicht, wie in der Thermodynamik, mit den Größen Druck und Volumen gerechnet wird, schreibt man:

$$\rho = \frac{m_{\bar{=}}}{V} \quad \Rightarrow \quad V = \frac{m_{\bar{=}}}{\rho} \quad \text{bzw.} \quad V_{\bar{=}} = \frac{m_{\bar{=}}}{\rho_{\bar{=}}} \quad (m = \text{const.})$$

$$p = p_{\bar{=}} \cdot \rho_{\bar{=}}^{-\kappa} \cdot \rho^\kappa \quad \text{also} \quad p = f(\rho)$$

$$\frac{dp}{d\rho} = p_{\bar{=}} \cdot \rho_{\bar{=}}^{-\kappa} \cdot \kappa \cdot \rho^{\kappa-1}$$

$$p = p_{\bar{=}} + p_{\approx} \quad \rho = \rho_{\bar{=}} + \rho_{\approx}$$

Einfluss der Dissipation

Neben der Absorption der Schallwellen an Wänden und Gegenständen, hat in *größeren Räumen* und bei *höheren Frequenzen* die während der Ausbreitung im Raum stattfindende Dissipation (= Dämpfung der Schallwelle durch die Luft, Luftabsorption) einen merklichen Einfluss auf die Nachhallzeit.

Der Schalldruck bzw. die Intensität in einer Welle wird während der Ausbreitung im Raum auf dem Wege x gemäß der folgenden Beziehungen gedämpft:

$$p(x) = p_0 \cdot e^{-\mu x} \qquad I(x) = I_0 \cdot e^{-2\mu x} \qquad I(x) = I_0 \cdot e^{-m x}$$

$$\mu = F(f, \vartheta, \varphi) \dots \dots \dots \text{Dämpfungskoeffizient der Luft in } \left[\frac{1}{\text{m}} \right]$$

$$\vartheta \dots \dots \dots \text{Temperatur } [^{\circ}\text{C}]$$

$$\varphi \dots \dots \dots \text{relative Luftfeuchtigkeit } [\%]$$

$$m \dots \dots \dots \text{Energiedämpfungskoeffizient der Luft in } \left[\frac{1}{\text{m}} \right]$$

Der Zusammenhang zwischen Dämpfungskoeffizient μ für den Schalldruck und Energiedämpfungskoeffizienten m ergibt sich damit als $m = 2\mu$. In der Literatur sind beide Größen zu finden und eine Verwechslung ist zu vermeiden. Hier wird mit dem Dämpfungskoeffizient μ für den Schalldruck weitergerechnet.⁹

Das zeitliche Abklingen der Intensität aufgrund der Luftdämpfung ergibt sich als:

$$I(t) = I_0 \cdot e^{-2\mu ct} = I_0 \cdot 10^{-2\mu ct \log e} \qquad (3.15)$$

Vergleichen wir den Intensitätsabfall aufgrund der Luftdämpfung andererseits mit dem Abfall entsprechend der Nachhallzeitdefinition in Gl. (3.9):

$$I(t) = I_0 \cdot 10^{-\frac{6t}{T}}$$

so folgt für den Grenzfall der Nachhallzeit, den diese bei verlustfreien Reflexionen nur aufgrund der Dissipation während der Ausbreitung annehmen würde:

$$2 \cdot \mu \cdot c \cdot t \cdot \log e = \frac{6t}{T_3} \qquad T_3 = \frac{3}{\mu \cdot c \cdot \log e} = \frac{6,9}{\mu \cdot c} = \frac{0,02}{\mu}$$

$$T_3 = 0,161 \left[\frac{\text{s}}{\text{m}} \right] \cdot \frac{V}{A_{ges,3}} \Rightarrow A_{ges,3} = 0,161 \left[\frac{\text{s}}{\text{m}} \right] \cdot \frac{V}{T_3} = 8 \cdot \mu \cdot V = 4 \cdot m \cdot V$$

Die Dämpfung durch die Ausbreitung in Luft lässt sich also durch eine äquivalente Absorptionsfläche $A_{ges,3}$ bzw. einer fiktiv daraus berechneten Nachhallzeit T_3 darstellen. Da

⁹ Grundlegendes zum Dämpfungskoeffizienten siehe Kapitel 2.1.2 (Seite 15)

$A_{ges,3} = 8 \cdot \mu \cdot V$ bzw. $4 \cdot m \cdot V$ von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit abhängig ist, wird dieser Term auch klimatischer Einfluss genannt.

Für den Dämpfungskoeffizienten μ gibt es im Bereich der raumakustisch interessierenden Daten für die relative Feuchtigkeit φ zwischen 30% und 80% bei 20°C und den Frequenzbereich unter 10 kHz eine Näherungsformel (siehe VO „Technische Akustik“):

$$\mu(f, 20^\circ\text{C}, \varphi) = 85 \cdot 10^{-10} \frac{f^2}{\varphi} \left[\frac{\text{Np}}{\text{m}} \right] \Rightarrow \boxed{T_3 = 2,4 \cdot 10^6 \frac{\varphi}{f^2}} \quad (3.16)$$

oder über den Umrechnungsfaktor¹⁰ [dB-Wert] = [Np-Wert] · 20 · log(e) = [Np-Wert] · 8,686 :

$$\mu(f, 20^\circ\text{C}, \varphi) = 74 \cdot 10^{-9} \frac{f^2}{\varphi} \left[\frac{\text{dB}}{\text{m}} \right] = 74 \cdot 10^{-6} \frac{f^2}{\varphi} \left[\frac{\text{dB}}{\text{km}} \right]$$

Zusammenfassung der Einflüsse

Treten alle drei Ursachen für Schallabsorption auf, so addieren sich die entsprechenden äquivalenten Absorptionsflächen:

$$\boxed{T = 0,161 \left[\frac{\text{s}}{\text{m}} \right] \cdot \frac{V}{A_{ges,1} + A_{ges,2} + A_{ges,3}}} \quad (3.17)$$

Sind die aus den äquivalenten Absorptionsflächen berechneten Teilnachhallzeiten bekannt, so ergibt sich der Kehrwert der resultierende Gesamtnachhallzeit als Summe der Kehrwerte der Einzelnachhallzeiten:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3} \quad (3.18)$$

Beispiel

Der Einfluss der Luftdämpfung auf die Nachhallzeit lässt sich sehr anschaulich am Beispiel eines Hallraums zeigen. Gegeben sind die Abmessungen und der Absorptionsgrad $\alpha(f)$:

$$l = 7,3 \text{ m}; b = 6,3 \text{ m}; h = 4,4 \text{ m}; V = 202 \text{ m}^3; S = 212 \text{ m}^2$$

Nach Gl. (3.11) ergibt sich aus den Raumabmessungen und dem Absorptionsgrad $\alpha(f)$ die frequenzabhängige Nachhallzeit $T_1(f)$ aufgrund der Raumboberfläche:

Frequenz [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
alpha	0,007	0,010	0,015	0,017	0,018	0,018	0,019	0,021	0,024	0,026	0,026	0,026	0,028	0,028	0,030	0,031	0,034	0,030	0,027	0,028	0,021
T1 [s]	21,0	15,0	10,0	8,8	8,6	8,3	8,2	7,41	6,31	5,95	5,95	5,86	5,48	5,40	5,13	4,96	4,50	5,08	5,60	5,54	7,20

Wie für einen Hallraum zu erwarten, sind die Nachhallzeiten T_1 aufgrund der Raumboberfläche sehr hoch und bleiben ab ca. 630 Hz in etwa konstant.

¹⁰ Grundlegendes zu Neper und Dezibel siehe Kapitel 2.1.2 (Seite 13)

Nach Gl. 3.16 lässt sich die Nachhallzeit $T_3(f)$ aufgrund des klimatischen Einflusses der Luft z.B. für eine relative Feuchtigkeit von $\varphi = 40\%$, $\varphi = 60\%$ bzw. $\varphi = 80\%$ berechnen:

Frequenz [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
T3(40%) [s]	9600	6144	3750	2400	1536	967	600	384	242	150	96	61	38	24	15	9,7	6,0	3,8	2,4	1,5	0,96
T3(60%) [s]	14400	9216	5625	3600	2304	1451	900	576	363	225	144	92	56	36	23	15	9,0	5,8	3,6	2,3	1,44
T3(80%) [s]	19200	12288	7500	4800	3072	1935	1200	768	484	300	192	123	75	48	31	19,3	12,0	7,7	4,8	3,0	1,92

Die Werte für T_3 zeigen sehr schön die $1/f^2$ -Abhängigkeit, was bei tiefen Frequenzen zu sehr hohen Werten von mehreren 1000 s und bei hohen Frequenzen zu Werten im Bereich von einigen Sekunden führt, und die lineare Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit.

Über die Umformung von Gl. 3.18 lässt sich die Gesamtnachhallzeit T berechnen:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_3} \quad \Rightarrow \quad T = \frac{T_1 \cdot T_3}{T_1 + T_3}$$

Frequenz [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000
T(40%) [s]	21,0	15,0	10,0	8,8	8,6	8,3	8,1	7,3	6,2	5,7	5,6	5,3	4,8	4,4	3,8	3,3	2,6	2,2	1,7	1,2	0,8
T(60%) [s]	21,0	15,0	10,0	8,8	8,6	8,3	8,1	7,3	6,2	5,8	5,7	5,5	5,0	4,7	4,2	3,7	3,0	2,7	2,2	1,6	1,2
T(80%) [s]	21,0	15,0	10,0	8,8	8,6	8,3	8,1	7,3	6,2	5,8	5,8	5,6	5,1	4,9	4,4	4,0	3,3	3,1	2,6	1,9	1,5

Abb. 3.5 zeigt die zugehörigen Kurvenverläufe. Bis etwa 1000 Hz ist die Nachhallzeit praktisch ausschließlich durch die Raumbofläche (T_1) bestimmt und ab 1000 Hz zeigt sich mehr und mehr der dämpfende Einfluss durch die Luft (T_3), der ab ca. 5000 Hz überwiegend die Nachhallzeit bestimmt.

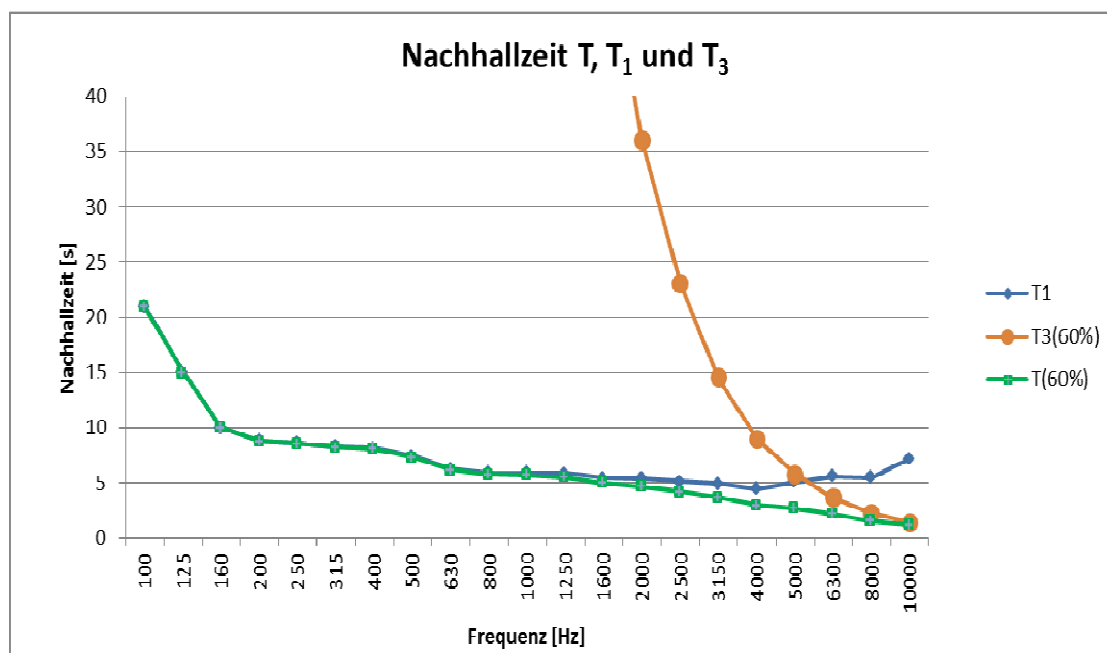


Abb. 3.5: Verlauf der Nachhallzeit T_1 (Raumbofläche), T_3 bei 60% Luftfeuchtigkeit und der daraus resultierenden Gesamtnachhallzeit T für einen Hallraum

Conclusio: Bei hohen Frequenzen ist also durch die Luftdämpfung für die maximal mögliche Nachhallzeit durch T_3 eine natürliche Schranke gegeben, die nicht überschritten werden kann!

3.1.4 EYRINGsche Nachhallzeitformel

Anstelle der Bildung von Energiebilanzen (SABINE) beruht die Herleitung der Nachhallzeit nach EYRING auf der „Verfolgung des mittleren Strahlenschicksals“. Es werden Schallenergiegedichtepakete ΔE betrachtet, die sich strahlenförmig von der Quelle ausbreiten und jeweils nach einer *mittleren freien Weglänge* l_m an den Wänden reflektiert werden. Dabei wird Schall absorbiert und die Energiedichte des Wellenpaketes sinkt nach der ersten Reflexion auf $\Delta E \cdot (1 - \overline{\alpha_m})$. Mit der *mittleren Stoßzahl* n (Anzahl der Reflexionen pro Sekunde) ergibt sich nach der Zeit t die Energiedichte des Wellenpaketes zu $\Delta E \cdot (1 - \overline{\alpha_m})^{n \cdot t}$.

Mittlere freie Weglänge und mittlere Stoßzahl

Wenn man die logarithmisch bewertete Energiedichte in einem individuellen Schallstrahl während des Nachhalls über der Zeit oder der ihr proportionalen Laufstrecke aufzeichnet, erhält man statt einer kontinuierlichen Nachhallgeraden eine Treppe, deren Stufen im allgemeinen sowohl verschiedene Höhen (unterschiedliche Absorptionsfähigkeit der einzelnen Wandflächen und Einfallswinkelabhängigkeit des Schluckgrades) als auch verschiedene Längen (verschieden „freie Weglängen“) aufweisen (siehe Abb. 3.6 links).

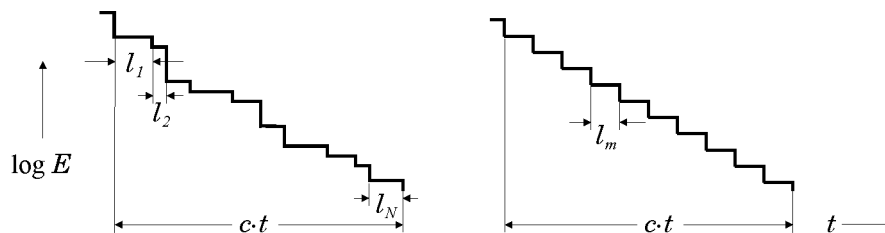


Abb. 3.6: Stufenweiser Energiedichteabfall eines „Schallstrahles“ [CREMER 1, S.168]

Bei einer genügend großen Zahl N von Reflexionen kommen in der Beobachtungszeit t alle möglichen Größenordnungen der freien Weglänge (ihrer jeweiligen Wahrscheinlichkeit entsprechend) so häufig vor, dass man eine „mittlere freie Weglänge“ definieren kann (siehe Abb. 3.6 rechts):

$$l_m = \frac{c \cdot t}{N}$$

Bei einem anderen Strahl mag zwar wohl die Verteilung der Stufen eine völlig andere sein, wenn aber alle Strahlen in der gleichen Beobachtungszeit dieselbe Zahl an Reflexionen erfahren, so ist ihnen auch dieselbe mittlere Weglänge zuzuordnen.

Durch Einführung des über die verschiedenen Wandflächenarten und Einfallswinkel gemittelten Absorptionsgrades $\overline{\alpha_m}$ [siehe Gl.(3.4)] ersetzte Eyring also die ungleichförmige Treppe in Abb. 3.6 links, durch eine solche mit gleichen Stufen bei gleicher mittlerer Neigung (Abb. 3.6 rechts). Außerdem näherte er den stufenweisen Abfall durch einen kontinuierlichen im Sinne der Dgl. (3.5) an. Mit dem prozentualen Energieverlust $\overline{\alpha_m}$ an jeder Stufe (= Reflexion) und

$$n = \frac{N}{t} = \frac{c}{l_m}$$

Bedeutung ist, können gute Kenntnisse der raumakustischen Zusammenhänge bei einem aufnahmetechnischen Troubleshooting sehr hilfreich sein.

3.1.6 Verkürzung des Nachhalls

Liegt die Nachhallzeit nicht im optimalen Bereich, so kann sie durch raumakustische Maßnahmen verändert werden (siehe Kap. 7).

Die Nachhallzeit kann durch das zusätzliche Aufbringen von Schallabsorbern verkleinert werden. Der Zusammenhang zwischen Aufwand an Dämmmaterial und erreichbarer Verkürzung der Nachhallzeit ist nicht linear, d.h. 2 mal soviel Dämmmaterial bringt keine Verdoppelung der Nachhallzeitreduktion.

Neben den in Kap. 6 angeführten Absorberarten stellt das Publikum einen wesentlichen Schallabsorber dar, der frequenzabhängig ist und von der Sitzdichte abhängt.

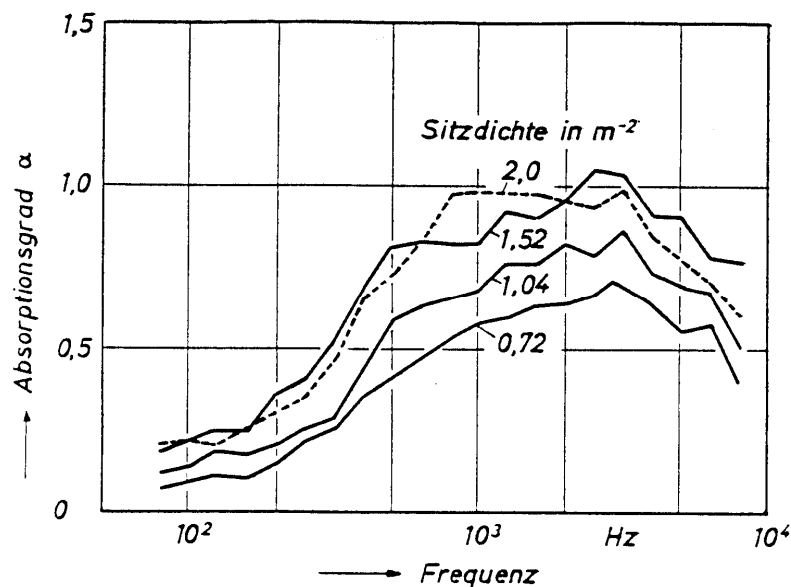


Abb. 3.9: Schallabsorptionsgrad von Publikum als Funktion der Frequenz für verschiedene Sitzdichten [NEUMANN, S.71]

3.1.7 Verlängerung des Nachhalls

Die Verlängerung von Nachhall ist gerade in jüngster Vergangenheit zu einem wichtigen und eleganten Instrument geworden, insbesondere dort, wo eine variable akustische Umgebung für verschiedene Verwendungszwecke gewünscht wird (Sprache, Musik etc). Solche nachhallzeitverlängernden Systeme werden üblicherweise als Acoustic Enhancement System bezeichnet, oft findet man auch Begriffe wie Sound Architecture oder variable Klangarchitektur.

Voraussetzung für den Einsatz solcher Systeme ist eine relativ trockene Raumakustik. Grundsätzlich bestehen solche Systeme aus mehreren im Raum verteilten Mikrofonen und Lautsprechern, die über eine mehr oder weniger komplexe Signalaufbereitung und Signalverteilung miteinander verbunden sind. Geschichtlich gehen solche Systeme – zunächst in reiner Analogtechnik – zurück bis in die 50iger Jahre des letzten Jahrhunderts. Deutlich

interessanter und viel flexibler sind die auf Digitaltechnik basierenden Systeme. Die Acoustic Enhancement Systeme lassen sich vom Ansatz her in zwei Gruppen einteilen:

- In Line Systeme (Synthesis of Soundfield [S-SF]): dabei wird der Direktschall im Bühnenbereich aufgenommen und daraus synthetische Reflexionen berechnet, die dem Schallfeld über Lautsprecher zugeführt werden. Grundsätzlich findet hier keine Schleifenbildung für das Signal statt bzw. ist diese vernachlässigbar (Abb. 3.10 links).
- Regenerative Systeme (Assistance of Soundfield [A-SF]): dabei wird über Mikrofone das originale Raumschallfeld – also nicht der Direktschall – aufgenommen, entsprechend verzögert bzw. aufbereitet und über Lautsprecher dem Schallfeld zugeführt. Eine Schleifenbildung für das Signal ist hier Teil des Systemansatzes (Abb. 3.10 rechts).

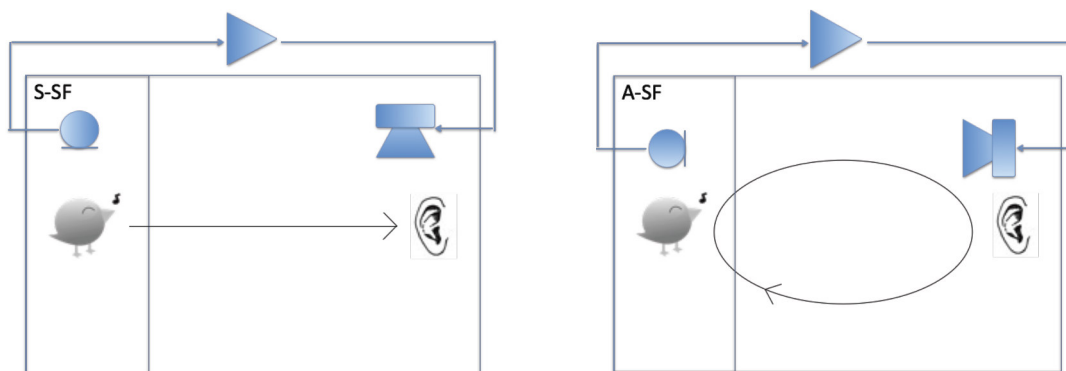


Abb. 3.10: Links: In Line System: Reflexionen werden aus Direktschall berechnet, nahezu ohne Schleifenbildung; **rechts:** regeneratives System: Reflexionen werden aus dem Raumschallfeld berechnet, Schleifenbildung ist Teil des Systemansatzes [GILLAN, BAKKER, S. 58]

Der Hauptunterschied liegt also einerseits darin, wo die Systeme das Signal für die Verlängerung des Nachhalls aufnehmen (Direktschall oder Raumschall) und andererseits in der Schleifenbildung, die im einen Fall (S-SF) nahezu vermieden wird und im anderen Fall (A-SF) Teil des Ansatzes ist. Die Nachteile dieser Systeme lagen zumeist in einer Verfärbung des Nachhalls bis hin zu einer Neigung zur Rückkoppelung. Zur Minimierung der Nachteile wurden auf der zeitlichen Ebene in die Algorithmen zeitvariante Parameter eingebaut und auf der räumlichen Ebene viele voneinander unabhängige Kanäle verwendet, über die sich die klangliche Verfärbung quasi „herausmittelt“.

Die Weiterentwicklung von Hybridsystemen, die sowohl den Direktschall als auch das originale Raumschallfeld für die Gewinnung der künstlichen Reflexionen verwenden, hat den Vorteil, dass mit deutlich weniger Kanälen ein sehr gutes Ergebnis erzielt werden kann. Ein solches System von der Firma Meyer Sound befindet sich im Mumuth der KUG, bestehend aus 24 gleichmäßig im Raum verteilten Mikrofonen, 64 Lautsprechern an den Wänden in 4,5 m Höhe und 8 Subbässen an der Decke. Für die synthetische Nachhallverlängerung gibt es im Bühnenbereich zusätzliche Lautsprecher und Mikrofone.

Eine interessante Weiterentwicklung der Fa. Rohde-BeSB ist die variable Klangarchitektur mit dem Virtual Acoustic Processor (Abb. 3.11), die einen nahtlosen Übergang von der Nachhallzeitverlängerung zu 3D-Audio darstellt. Neben allen Möglichkeiten eines Hybridsystems bietet dieses System zusätzlich die Möglichkeit, den Lautsprechersignalen die Raumimpulsantworten berühmter Konzertsäle aufzuprägen und somit die Akustik dieser Konzertsäle zu simulieren. Das funktioniert u. a. dort sehr gut, wo es kein primäres Raumschallfeld gibt, wie z. B. bei Open Air Events.

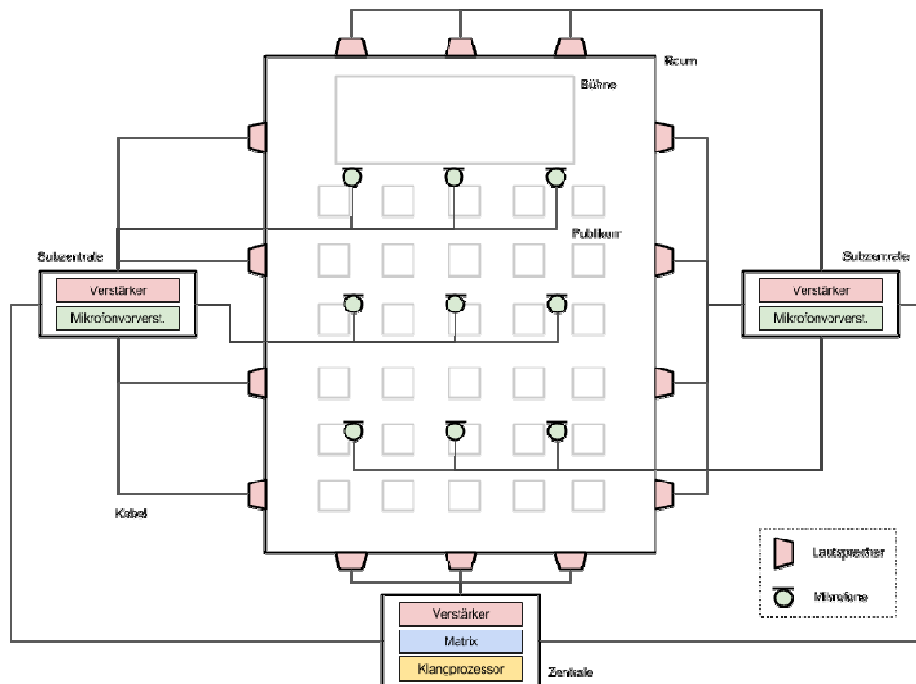


Abb. 3.11: Skizze für eine „variable Klangarchitektur“ in einem typischen Veranstaltungsraum [ROHDE]

Allen Systemen gemeinsam ist die Möglichkeit, über Setups sehr einfach zwischen verschiedenen akustischen Umgebungen umschalten zu können. Damit ist diese Technik vermehrt auch für viele Mehrzweckräume interessant, um für jeden Anwendungsfall eine optimale Raumakustik zur Verfügung zu haben.

3.2 Diffuse Schallreflexion

Diffuse Schallreflexion wird durch möglichst dichte Reflexionsmuster erreicht. Bei zu starker Raummodenbildung werden Streukörper (Halbkugeln, Halbzylinder, Pyramiden) eingebaut, um ein diffuses Schallfeld zu bekommen → „akustischer Barock“ (= Auflösung von Oberflächen). Ziel ist es, eine Gleichverteilung der Reflexionen in alle Richtungen zu erhalten.

Modellversuch zur Wirkung der Strukturierung einer ebenen Fläche:

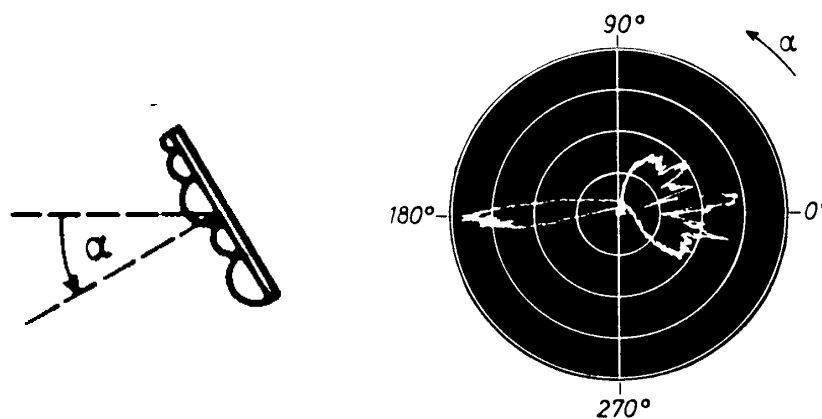


Abb. 3.12: Richtdiagramm der rückgestreuten Welle (Amplitude) einer durch aufgeklebte Halbzylinder aufgelösten Fläche; links geometrische Reflexionen an der glatten Rückseite, rechts diffuse Streuung an der durch aufgeklebte Halbzylinder aufgelösten Vorderseite [NEUMANN, S.79]

5.3.6 Sprachübertragungsindex (STI, RASTI)

Die bisher besprochenen Gütemaße sind aus dem Zeit-Energie-Verlauf abgeleitet und berücksichtigen in erster Linie die Eigenheiten der Hörwahrnehmung. Besonderheiten des Quellsignals bleiben weitgehend unberücksichtigt.

Der Sprachübertragungsindex STI wird durch eine Messmethode ermittelt, die speziell für die Sprachübertragung entwickelt wurde und als Quellsignal ein „sprachähnliches“ Signal verwendet. Dabei kann sowohl die „natürliche“ Akustik eines Raumes vermessen werden, als auch eine gesamte Übertragungsstrecke bestehend aus elektroakustischer Verstärkungsanlage in einer gegebenen raumakustischen Umgebung. Entscheidend ist dabei, dass das bei der STI-Messmethode verwendete Quellsignal einerseits die bei Sprache gegebene Zeit-Energie-Verteilung nachbildet und andererseits analytisch leicht erzeugbar ist.

Wie lässt sich Sprache modellieren?

Abb. 5.10 a) zeigt das gemittelte Langzeitspektrum von Sprachsignalen. Damit ist der mittlere spektrale Inhalt der Sprache bekannt. Der zeitliche Verlauf von Sprache lässt sich in Phoneme (Konsonanten, Vokale, ...), Silben, Wörter und Phrasen gliedern, deren zeitlich-energetischer Verlauf für eine gut verständliche Sprachübertragung erhalten bleiben muss. Untersuchungen über die zeitliche Dauer dieser Sprachelemente liefern Werte von 80 ms für die kurzen Explosivlaute bis zu 1,6 s für die langen Laute, bzw. umgerechnet in Frequenzen 12,5 Hz bis 0,63 Hz.

Sprache lässt sich daher sehr gut modellieren als ein breitbandiges Rauschsignal im Bereich zwischen 125 Hz und 8 kHz mit einer spektralen Gewichtung wie Abb. 5.10 a), das von den typischen „Phonemfrequenzen“ $F = 0,63$ Hz bis 12,5 Hz moduliert wird. Für die messtechnische Nachbildung eines solchen Sprachsignals nimmt man nun für die breitbandigen Anteile gewichtetes Oktavbandrauschen von 125 Hz bis 8 kHz (= 7 Oktavbänder) und moduliert jedes dieser Oktavbänder mit den „Phonemfrequenzen“ F von 0,63 Hz bis 12,5 Hz im Terzbandabstand (= 14 Terzen). Insgesamt erhält man so $14 \times 7 = 98$ Quellsignale (siehe Abb. 5.10 b).

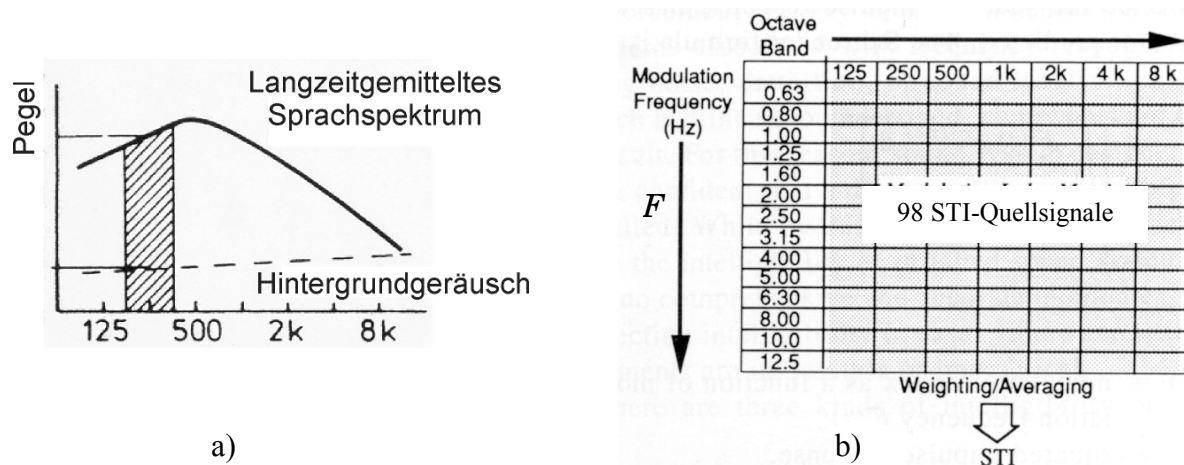


Abb. 5.10: a) gemitteltetes Langzeitspektrum von Sprachsignalen
b) für den Sprachübertragungsindex STI verwendete Oktavbänder und Modulationsfrequenzen F

Was passiert mit Sprache bei der Übertragung?

Breitet sich deutlich gesprochene Sprache in einem Raum aus, so gibt es im Wesentlichen zwei verständlichkeitsmindernde Faktoren. Der eine ist das Hintergrundgeräusch, das der Sprache überlagert wird, der zweite ist das diffuse Schallfeld – der Nachhall –, der durch den Raum selber hervorgerufen wird und sich ebenfalls dem Sprachsignal überlagert.

Wählt man nun am Eingang eines Systems (= Mund des Sprechers) ein mit 100% moduliertes „Sprachspektrum“, so wird durch das Hinzufügen von Hintergrundgeräusch bzw. Nachhall am Ort des Empfängers (= Ausgang des Systems) der Modulationsgrad geringer sein (siehe Abb. 5.11).

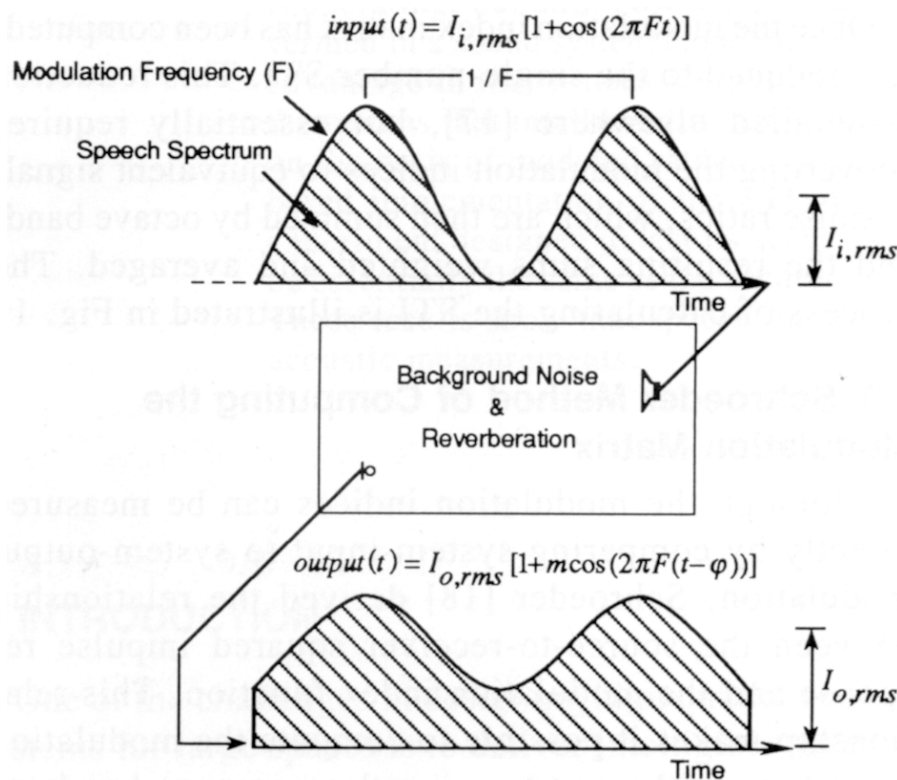


Abb. 5.11: Die Verringerung des Modulationsgrades durch Hintergrundgeräusch und Nachhall

Aus der Abnahme des Modulationsgrades werden für alle 98 STI-Messsignale die Modulationsübertragungsfaktoren $m(F, O)$ ermittelt. Anschließend wird für jedes Oktavband O der Mittelwert über alle 14 $m(F, O)$ -Werte gebildet. Die so erhaltenen 7 $m(F, O)$ -Mittelwerte je Oktavband werden durch eine gewichtete Mittelung zum STI zusammengefasst. Die Gewichtung orientiert sich einerseits an der Amplitude des gemittelten Sprachspektrums (vgl. Abb. 5.10 a), andererseits an den Kurven gleicher Lautstärke.

Abb. 5.12 zeigt ein fiktives Beispiel für den Einfluss von Nachhallzeit und Hintergrundgeräusch auf den Modulationsübertragungsfaktor $m(F, O)$. Dabei wird von einem idealen exponentiellen Nachhallverlauf ausgegangen mit Nachhallzeiten T und S/N-Werten, wie sie in der Tabelle in der Abbildung angegeben sind. Damit ergibt sich für $m(F, O)$ in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz der dargestellte Verlauf.

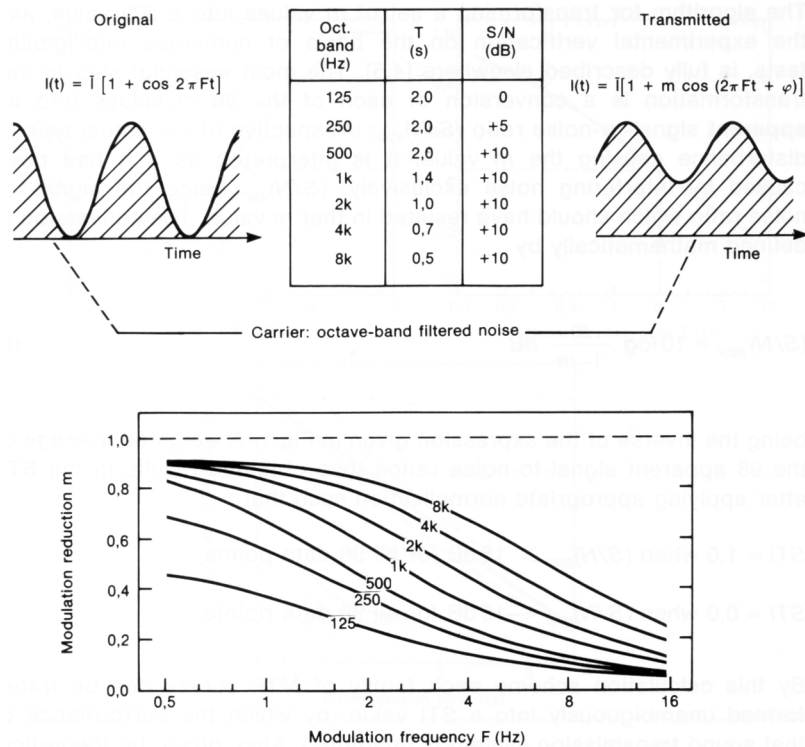


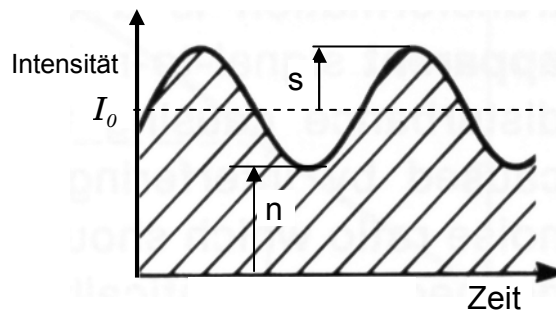
Abb. 5.12: fiktives Beispiel für den Einfluss von Nachhallzeit und Signal-Stör-Abstand auf den Modulationsübertragungsfaktor $m(F)$ in Abhängigkeit vom Oktavbandrauschen [RASTI, S. 7]

Berechnung von $m(F)$ aus der Raumimpulsantwort $h(t)$

Die Messung der Modulationsübertragungsfaktoren $m(F)$ ist aufgrund der 98 Messsignale, mit denen der zu prüfende Raum sequenziell beschallt werden muss, sehr zeitaufwendig. Eine elegante und sehr rasche Methode ist die Berechnung der Modulationsübertragungsfaktoren $m(F)$ aus der oktavbandgefilterten Raumimpulsantwort $h(t)$ nach Schröder, die heute bei der Bestimmung des STI fast ausschließlich Verwendung findet.

$$m(F) = \left| \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j2\pi Ft} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \right|$$

Entsprechend dieser Gleichung ist $m(F)$ die Fouriertransformierte der quadrierten Impulsantwort, die mit der Gesamtenergie der Impulsantwort (= Nenner) normiert wird. Damit lassen sich sehr einfach die Modulationsübertragungsfaktoren $m(F)$ wie in Abb. 5.12 unten dargestellt aus der Raumimpulsantwort berechnen, ohne dass die aufwendigen 98 STI-Messsignale verwendet werden müssen.

Berechnung des STI aus den Modulationsübertragungsfaktoren $m(F)$ **Abb. 5.13:** Signal-Stör-Abstand von $m(F)$ [RHODE, S.108]

In Abb. 5.13 ist noch einmal das modulierte Oktavbandrauschen am Systemausgang mit der durch Nachhall und Grundgeräusch reduzierten Modulation aus Abb. 5.11 unten bzw. Abb. 5.12 rechts oben dargestellt, für das nun der Signal-Störabstand bestimmt wird. Dazu wird das Signal zerlegt gedacht in eine sinusförmige Modulationskomponente mit der Amplitude s (= Signalkomponente), zu der eine konstante Signalkomponente mit der Intensität n (= Hintergrundgeräusch, Nachhall) addiert wird. Das gesamte Signal I hat also die mittlere Intensität I_0 . Somit kann man, wie bei der Amplitudenmodulation, schreiben:

$$I(t) = I_0(F) \cdot \left[1 + \frac{s(F)}{I_0(F)} \cdot \sin(2\pi F \cdot t) \right] \quad \text{mit } m(F) = \frac{s(F)}{I_0(F)}$$

Der Modulationsübertragungsfaktor $m(F)$ entspricht also dem Modulationsindex bei der Amplitudenmodulation. Aus Abb. 5.13 ist leicht ersichtlich, dass $I_0(F) = s(F) + n$ ist. Somit ergibt sich

$$m(F) = \frac{s(F)}{s(F) + n} = \frac{1}{1 + \frac{n}{s(F)}} \quad \text{bzw.} \quad \frac{s(F)}{n} = \frac{m(F)}{1 - m(F)}$$

womit sich das Signal-Stör-Verhältnis eines modulierten Oktavbandrauschens über den Modulationsübertragungsfaktor $m(F)$ ausdrücken lässt. Der Logarithmus davon liefert den Signal-Stör-Abstand X_i in dB:

$$X_i = 10 \cdot \lg\left(\frac{s_i}{n}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{m_i}{1 - m_i}\right) \quad \text{dB} \quad (5.1)$$

Ein ganz zentraler Punkt der STI-Methode besteht nun darin, dass der Signal-Stör-Abstand auf den Bereich von -15 dB bis 15 dB begrenzt wird und linear auf die Sprachverständlichkeit skaliert wird. Die Begrenzung des Signal-Stör-Abstands ist deshalb plausibel, weil für Werte kleiner -15 dB der Modulationsübertragungsfaktor mit $m = 0,03$ so gering ist, dass die Sprache völlig unverständlich wird (Abb. 5.14 links). Bei einem Signal-Stör-Abstand von +15 dB, was einem Modulationsübertragungsfaktor von $m = 0,97$ entspricht, bewirkt eine Vergrößerung der Modulation keine Verbesserung der Verständlichkeit mehr (Abb. 5.14 rechts). Daher können die X_i -Werte für den Signal-Stör-Abstand auf ± 15 dB begrenzt werden.

$$X_i > 15 \text{ dB} \rightarrow X_i = 15 \text{ dB} \hat{=} m = 0,97 \quad \text{bzw.} \quad X_i < -15 \text{ dB} \rightarrow X_i = -15 \text{ dB} \hat{=} m = 0,03$$

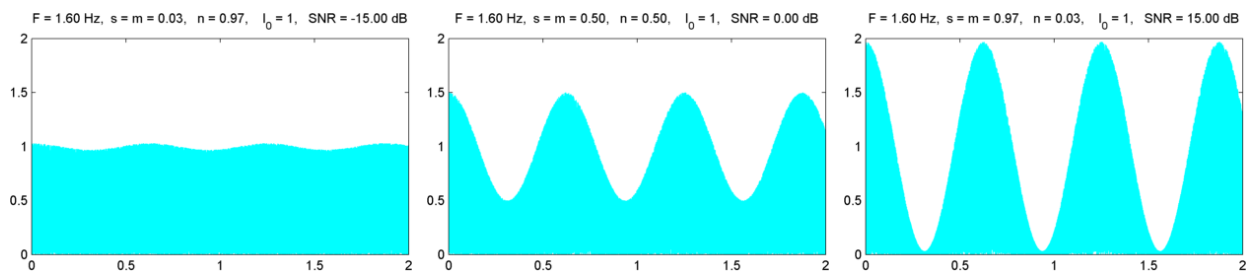


Abb. 5.14: Signal-Störabstand von -15 / 0 / 15 dB für $m(F) = 0,03 / 0,5 / 0,97$ bei $F = 1,6$ Hz

Danach wird der Signal-Stör-Abstand von -15 dB bis 15 dB, der in einem weiten Bereich näherungsweise linear verläuft, nach folgender Gleichung auf den Übertragungsindex TI_i mit dem Wertebereich von 0 bis 1 umgerechnet (Abb. 5.15):

$$TI_i = \frac{X_i + 15 \text{ dB}}{30 \text{ dB}} \quad \text{d.h. bei } X_i = -15 \text{ dB} \rightarrow TI_i = 0 \text{ bzw. } X_i = +15 \text{ dB} \rightarrow TI_i = 1$$

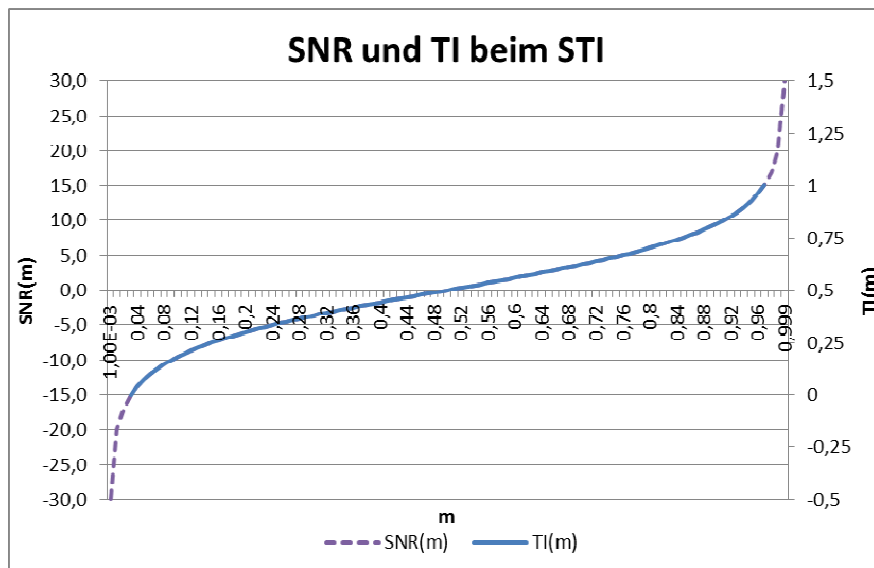


Abb. 5.15: Signal-Störabstand und lineare Umrechnung auf den Übertragungsindex TI

Der Mittelwert der Übertragungsindizes TI_i im n -ten Oktavband ergibt den Oktavübertragungsindex OTI_n für die n -te Oktave:

$$OTI_n = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} TI_i \quad \text{mit } n = 1, 2, \dots, 7$$

Aus den Oktavübertragungsindizes OTI_n wird schließlich der STI wie folgt berechnet:

$$STI = \sum_{n=1}^7 \alpha_n OTI_n - \sum_{n=1}^6 \beta_n \sqrt{OTI_n \cdot OTI_{n+1}} \quad (5.2)$$

wobei die in Tabelle 5.1 angegebenen, experimentell bestimmten Gewichtungsfaktoren α_n und β_n für männliche und weibliche Sprache verwendet werden:

Frequenz [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\alpha_{\text{männlich}}$	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
$\beta_{\text{männlich}}$	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	0
α_{weiblich}	0	0,117	0,223	0,216	0,328	0,250	0,194
β_{weiblich}	0	0,099	0,066	0,062	0,025	0,076	0

Tabelle 5.1: Gewichtungsfaktoren für männliche und weibliche Sprache nach [IEC 60268-16]

Die zweite Teilsumme mit den β_n -Faktoren in Gl. (5.2) berücksichtigt den Verdeckungseffekt von benachbarten Oktavbändern. Der Wertebereich des STI liegt zwischen 0 und 1 mit der in Abb. 5.16 gegebenen Bewertungsskala:



Abb. 5.16: STI-Bewertungsskala

RASTI (rapid speech transmission index)

Die Messung des STI erfolgt mit 98 verschiedenen Kombinationen aus Modulationsfrequenzen und Oktavbandrauschen. Dies ist in der Praxis relativ aufwendig, wenn man bedenkt, dass oft mehrere Messungen durchgeführt werden, um eine Mittelung durchführen zu können, und das Ergebnis in Echtzeit zur Verfügung stehen soll. Deshalb wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Brüel & Kjaer ein einfacheres Messverfahren entwickelt, das als RASTI-Wert definiert wurde. Statt 98 Messungen werden nur mehr 9 Messungen in 2 Oktavbändern (500 Hz und 2 kHz) durchgeführt, welche für die Sprachverständlichkeit besonders wichtig sind. Dem jeweiligen Oktavband werden dabei alle 4 bzw. 5 Modulationsfrequenzen zugleich aufmoduliert, wodurch sich kurze Messzeiten von typisch 8 bis 10 s ergeben (Abb. 5.17).

Die 9 Modulationsfrequenzen F , die wechselweise dem 2 kHz- bzw. dem 500 Hz-Band zugeordnet werden, lauten:

0,73 Hz	1,02 Hz	1,45 Hz	2,03 Hz	2,90 Hz	4,07 Hz	5,81 Hz	8,14 Hz	11,63 Hz
2 kHz	500 Hz	2 kHz	500 Hz	2 kHz	500 Hz	2 kHz	500 Hz	2 kHz

Für diese Frequenzen wird nun $m(F)$ berechnet. Aus den insgesamt also 9 $m(F)$ werden die oben hergeleiteten Signal-Stör-Abstände X_i berechnet. Der RASTI-Wert errechnet sich nun aus der arithmetischen Mittelung der Signal-Stör-Abstände nach folgender Gleichung:

$$\text{RASTI} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 \frac{X_i + 15}{30} \cdot 100 \quad [\%]$$

80% < RASTI

ausgezeichnete Verständlichkeit

RASTI < 50%

schlechte Verständlichkeit

Die RASTI-Methode schreibt vor, dass die Signal-Stör-Abstände wie beim STI auf ± 15 dB begrenzt werden müssen.

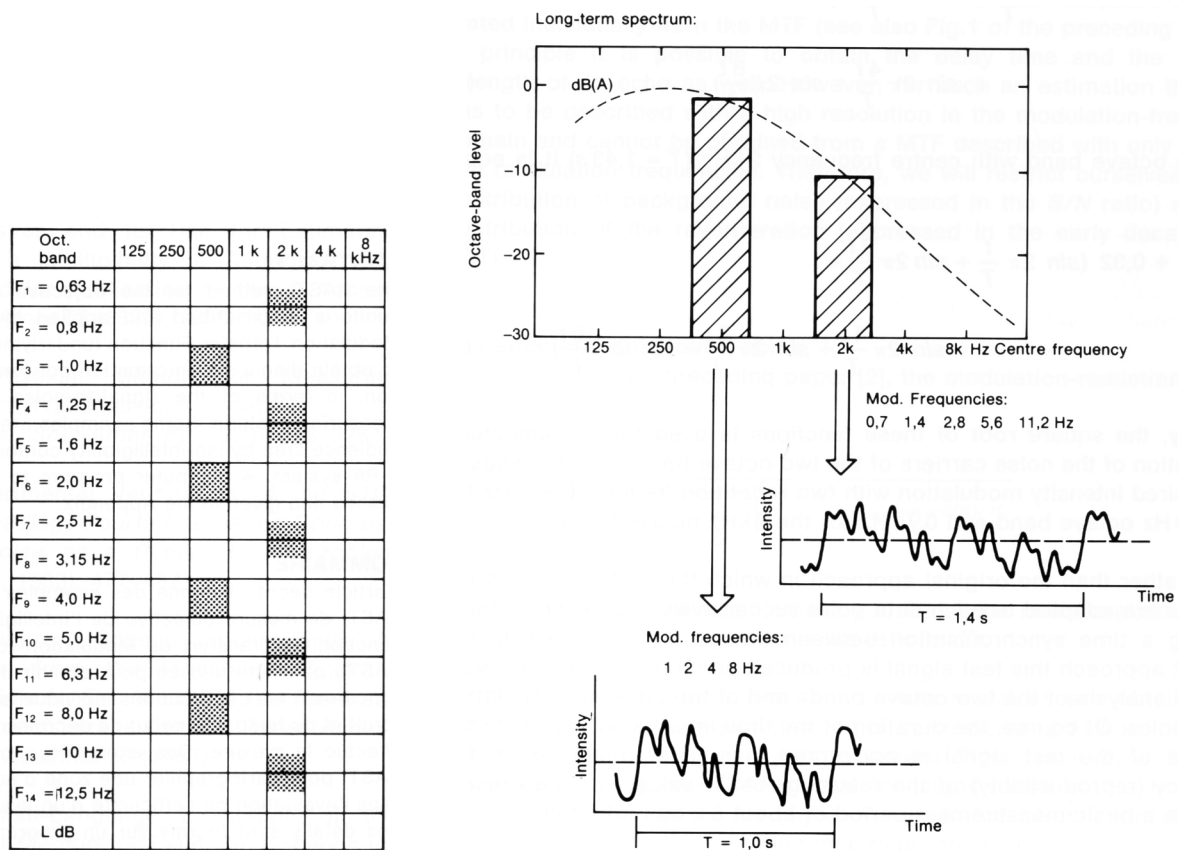


Abb. 5.17: Die bei der RASTI-Messung verwendeten Modulationsfrequenzen und Oktavbandrauschen [RASTI, S. 17]

Das Problem der RASTI-Messung liegt darin, dass der Modulationsübertragungsfaktor nur bei 500 Hz und bei 2 kHz gemessen wird, obwohl bei der Sprachübertragung ein Frequenzbereich von 100 Hz bis 8 kHz von Bedeutung ist. Ein System, das optimale Übertragungseigenschaften bei den beiden Frequenzen aufweist, liefert einen RASTI-Wert von 1 (bzw. 100 %). Daher sollte man RASTI-Messungen mit Vorsicht interpretieren.

5.3.7 Common Intelligibility Scale (CIS)

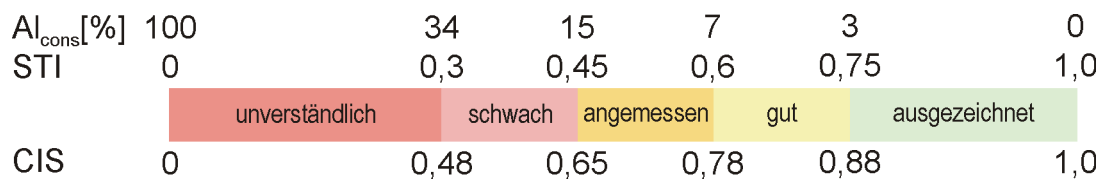
Die Common Intelligibility Scale (CIS) ist eine allgemeine Skala für die Sprachverständlichkeit und kann nicht direkt gemessen werden. CIS stellt einen formelmäßigen Zusammenhang zwischen STI und AI_{cons} dar und kann für die Umrechnung vom STI in den AI_{cons} verwendet werden.

$$CIS = 1 + \log(STI)$$

$$CIS = 1 + \log(0,9482 - 0,1845 * \ln(AL_{cons}))$$

Tabelle 5.2 bzw. Abb. 5.18 zeigen den Zusammenhang zwischen STI, AI_{cons} und CIS – Werten. In der ersten Spalte ist die

	<i>STI</i> – Wert	<i>Al_{cons}</i>	<i>CIS</i> – Wert
Schlecht	0 bis 0,3	> 34 %	< 0,48
Schwach	0,3 bis 0,45	34 % bis 15 %	0,48 bis 0,65
Amgemessen	0,45 bis 0,6	15 % bis 7 %	0,65 bis 0,78
Gut	0,6 bis 0,75	7 % bis 3 %	0,78 bis 0,88
Ausgezeichnet	0,75 bis 1,0	< 3 %	0,88 bis 1,0

Tabelle 5.2: Zusammenhang zwischen *STI*, *Al_{cons}* und *CIS*-WertenAbb. 5.18: Vergleich der *Al_{cons}*-, *STI*-, und *CIS*-Skalen

5.4 Durchsichtigkeit bei Musik

5.4.1 Klarheitsmaß

Das Klarheitsmaß für Musik entspricht dem Deutlichkeitsmaß für Sprache, wobei die Berechnung mit anderen Integrationsgrenzen erfolgt. Es beschreibt die Durchsichtigkeit, d.h. die Erkennbarkeit zeitlich aufeinander folgender Töne (Zeitdurchsichtigkeit) und die Unterscheidbarkeit der verschiedenen Instrumente (Registerdurchsichtigkeit).

$$C_{80} = 10 \cdot \log \frac{W_{0...80}}{W_{80...∞}}$$

0 dB < C_{80} hohe Durchsichtigkeit von Musik
 -3 dB < C_{80} < 0 dB Musik umhüllt Zuhörer

Es bewertet das Verhältnis zwischen der eintreffenden Energie bis 80 ms (fördert die Durchsichtigkeit) und der restlichen Energie. Im Gegensatz zur Sprachverständlichkeit geht es bei der Durchsichtigkeit nicht um einen Grenzbereich, sondern um ein Gebiet optimaler Werte, denn die Durchsichtigkeit darf nicht zu groß werden. Es muss eine Ausgewogenheit zwischen frühen und späten Reflexionen geben. In Konzertsälen ist gefordert, dass möglichst alle Zuhörerplätze ein $C_{80} > 0$ dB aufweisen. Ein $C_{80} > 0$ dB ist mit kleinen Nachhallzeiten einfach erreichbar, jedoch werden größere Nachhallzeiten aufgrund der Räumlichkeit verlangt. Als Kompromiss kann man ein C_{80} bis -3 dB in einzelnen Hörzonen akzeptieren. Eine weitere Möglichkeit ist die Verbesserung der Durchsichtigkeit durch die Erhöhung der frühen Reflexionen mit einer Beschallungsanlage. An dieser Stelle sei erwähnt, dass es bei den Zuhörern