

Berechnung des Schallpegels in Büros und Korridoren

(Dieser Artikel ist eine Vorauskabe)

1.	Inhaltsangabe:.....	2
2.	Erkenntnis:	3
2.1.	Schallpegelverteilung	3
2.2.	Hindernisse im Schallweg	3
3.	Auswertung:	4
3.1.	nicht-kubischer Raum „Büro 1“	4
3.2.	nicht-kubischer Raum „Büro 2“	6
3.3.	nicht-kubischer Raum „Korridor“	8
3.4.	nicht-kubischer Raum „Expedit“	10
3.5.	nicht-kubischer Raum „Gang Boltzmann“	11
4.	Berechnungsverfahren:	12
4.1.	Berechnung der Nachhallzeiten	12
4.2.	Berechnung Abnahme des Schallpegels	14

1. Inhaltsangabe:

Grund für diesen Artikel war die beobachtete Tatsache, dass für nicht-kubische Räume¹ Simulationen keine befriedigenden Ergebnisse liefern. Vielfach wird dies mit falschen Absorptionsdaten erklärt, was aber, auch wenn gemessene Nachhallzeiten eingegeben werden, nichts am unrichtigen Ergebnis ändert. Alleiniges Hauptaugenmerk wird in diesem Artikel auf die Berechenbarkeit der Schallausbreitung in nicht kubischen Räumen gelegt. Mit diesem Wissen können Lautsprecher ökonomisch besser als bisher gesetzt werden, da die Abstände zwischen den Lautsprechern hinsichtlich Abnahme des Schallpegels und Gleichmäßigkeit des Schallfeldes auch rechnerisch in Simulationen erfasst werden können.

Bei den meisten Verfahren zur Vorhersage der Schallausbreitung wird auf die Berechnung nach Hopkins Stryker zurückgegriffen. In mehreren Tests hat sich herausgestellt, dass dieses Verfahren nur für annähernd kubische Räume² passend ist, jedoch bei nicht-kubischen Räumen falsche Ergebnisse liefert.

Grund ist, dass das Berechnungsverfahren nach Hopkins Stryker ein statistisch ausgewogenes „diffuses“ Nachhallfeld voraussetzt.

Auch die Berechnungen der Nachhallzeit RT_{60} nach der Sabine'schen³ Nachhallgleichung oder Eyring⁴ oder der Fitzroy⁵ Methode setzen ebenfalls ein ausgewogenes „diffuses“ Nachhallfeld voraus.

Untersuchungen in nicht-kubischen Räumen haben ergeben, dass Nachhallzeiten im Bereich von 250 Hz bis 8 kHz sich im Bereich von unter 500 ms bewegen, ohne gleichmäßiges Nachhallfeld, alleine bestehend aus frühen und einzelnen Reflexionen und (fallweise) Moden. Aus diesen Gründen ist die Messung einer Nachhallzeit RT_{60} eine irreführende Maßnahme.

Bei Recherchen nach einem besseren Verfahren zur Optimierung der Berechnung der Schallausbreitung in nicht-kubischen Räumen konnte eine Näherungsformel gefunden werden, die die abweichenden Verhältnisse gut abbildet. Es handelt sich um die Näherung nach Theodore J. Schultz, einem Bostoner Akustiker.

Die nachfolgenden Auswertungen sollen zeigen, wie passend die Näherung nach Theodore J. Schultz auf nicht-kubische Räume angewendet werden kann.

¹ nicht-kubische Räume sind Räume mit Seitenverhältnis von L x B x H von etwa >3:1:1 (z. B. Korridore) oder >3:>3:1 (z. B. Büroräume)

² kubische Räume sind Räume mit Seitenverhältnis von L x B x H bis zu etwa <3:1:1

³ Wallace Clement Sabine (1889 bis 1919)

⁴ Norris Eyring (um 1930)

Siehe auch: J. Acoust. Soc. Am. Vol. 58 No. 3 pp 643-655, September 1975 und Don Davis & Eugene Patronis Jr. Sound System Engineering 3rd ed. page 156

⁵ Dariel Fitzroy (1898 bis 1977)

2. Erkenntnis:

2.1. *Schallpegelverteilung*

Die Auswertungen zeigen in den Diagrammen die gute Näherung durch Schultz.
Für die Projektierung von Lautsprechern in nicht-kubischen Räumen gilt:

- ein Deckenraster von 5 m bis maximal 7 m bei einer Raumhöhe von bis zu 3 m ist ausreichend, wenn Pegelschwankungen von maximal 6 dB akzeptiert sind. Bei Vorgabe geringerer Pegelschwankungen sind die Abstände auf unter 5 m anzusetzen.
Bedingung: der geforderte Mindestschallpegel (z. B. 85 dBA) direkt unter dem Lautsprecher muss um mindestens 6 dB überschritten werden.

Für einen Raum von 15 m x 8 m sind daher von der Schallpegelverteilung 2 bis maximal 3 Lautsprecher ausreichend.

Bei Redundanzforderung eines maximalen Pegelverlustes von 10 dB bei Ausfall eines Lautsprecherkreises wird dieser Raum auch noch mit einem Lautsprecher hinreichend versorgt, auch dann, wenn der Lautsprecher nicht mittig, sondern asymmetrisch in einem „Raumdrittel“ angeordnet ist.

- die Sprachverständlichkeit sinkt auch bei Deckenrastern von <7 m nicht unter die Mindestforderung⁶ eines STI von 0,5

2.2. *Hindernisse im Schallweg*

Im Zuge der Auswertungen wurde auch untersucht, wie Hindernisse oder „Streukörper“⁷ in englisch „fittings“ im Schallweg die Ausbreitung des Schalls beeinflussen.

Bei der Versuchsanordnung „nicht kubischer Raum Büro 2“ wird untersucht, wie ein massives, schweres Hindernis von 4,8 m Länge, 0,45 m Tiefe und 2,3 m Höhe bei einer Raumhöhe von 2,9 m und Raumbreite von 7,8 m wirken. Dieses Hindernis mit 79% Reduzierung an Durchfluss in direkter Linie zur Schallausbreitung und insgesamt 48% im Verhältnis zum Raumquerschnitt reduziert den Pegel um etwa 5 dB ohne Auswirkungen auf die Sprachverständlichkeit. Es zeigt sich, dass solche „Streukörper“ im Schallweg, die Räume nicht völlig voneinander trennen, die Ausbreitung des Schalls nur gering behindern. Vorteil ist, dass aufgrund solcher Aufbauten keine zusätzlichen Lautsprecher installiert werden müssen. Nachteil ist, dass solche Aufbauten zum Zweck eines „Schallschutzes“ fast unwirksam sind, da diese die Ausbreitung des Schalls in Räumen nahezu nicht reduzieren.

⁶ diese Mindestforderung von STI >0,5 entsprechend CIS >0,7 wird beispielsweise von TRVB S 158 in Österreich, der VDE0833-4 in Deutschland, der BS5839 part 8 in UK verlangt.
⁷ VDI 3760 Berechnung und Messung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen
ISO 14257 Measurement and parametric description of spatial sound distribution curves in workrooms for evaluation of their acoustical performance

3. Auswertung:

3.1. nicht-kubischer Raum „Büro 1“

das Diagramm **Fig. 3.1-1** zeigt die Abnahme des Schallpegels gerechnet nach den unterschiedlichen Methoden. Abmessung 10 m x 5 m x 2,5 m, RT_{60} etwa 0,46 s. Diagramm **Fig. 3.1-2** zeigt die gemessene Abnahme. In diesem Zusammenhang wurde auch die Sprachverständlichkeit gemessen und im Diagrammen **Fig. 3.1-3** dargestellt.

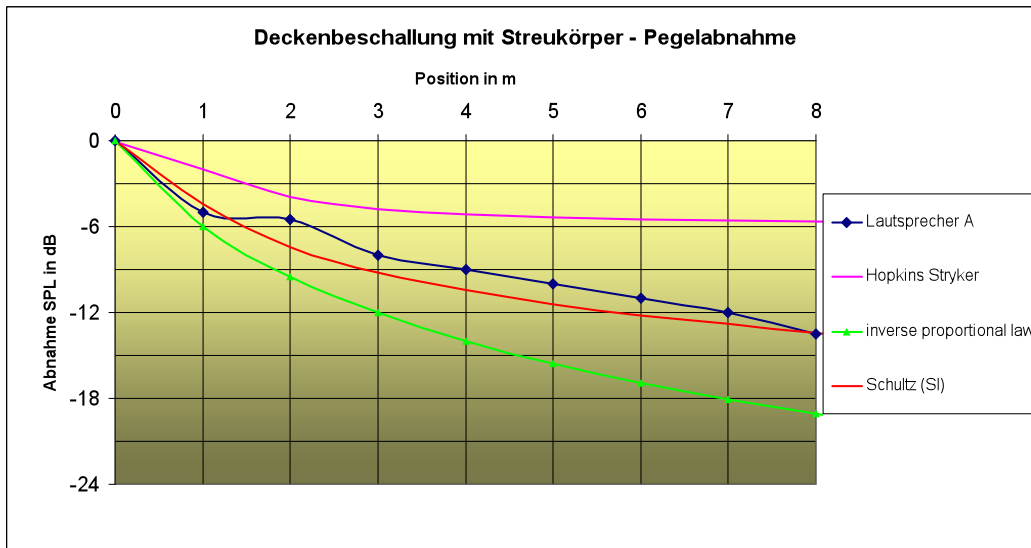


Fig. 3.1-1

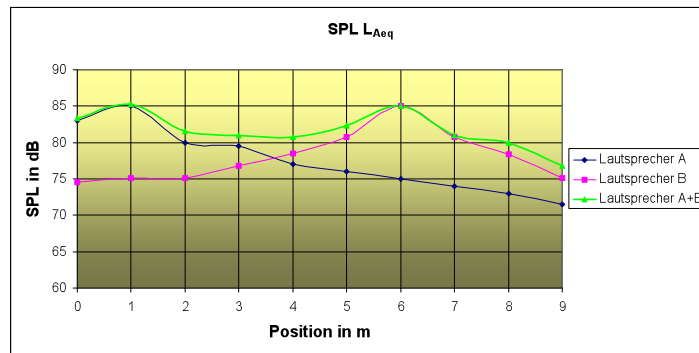


Fig. 3.1-2

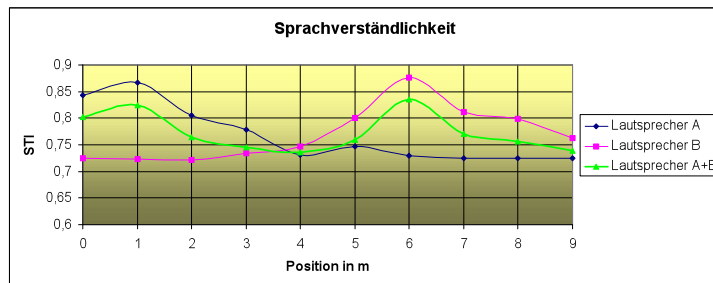
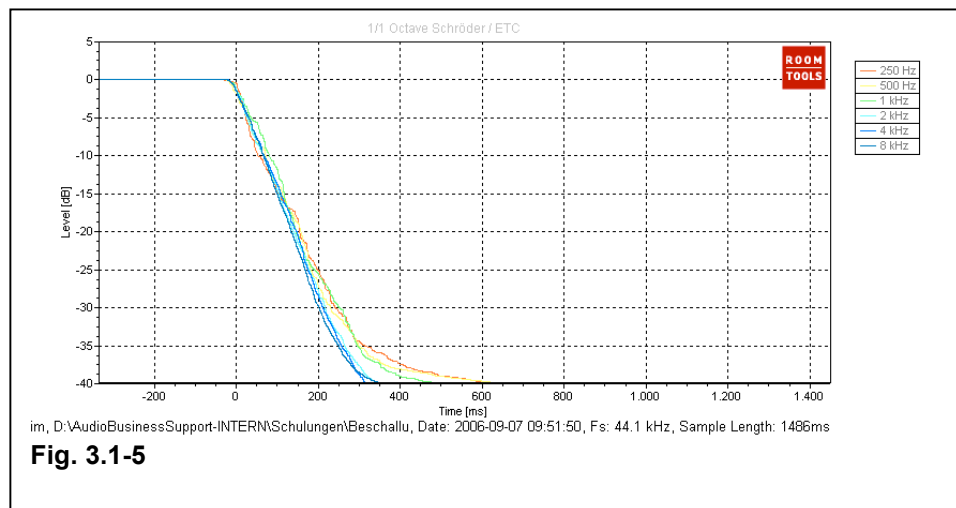
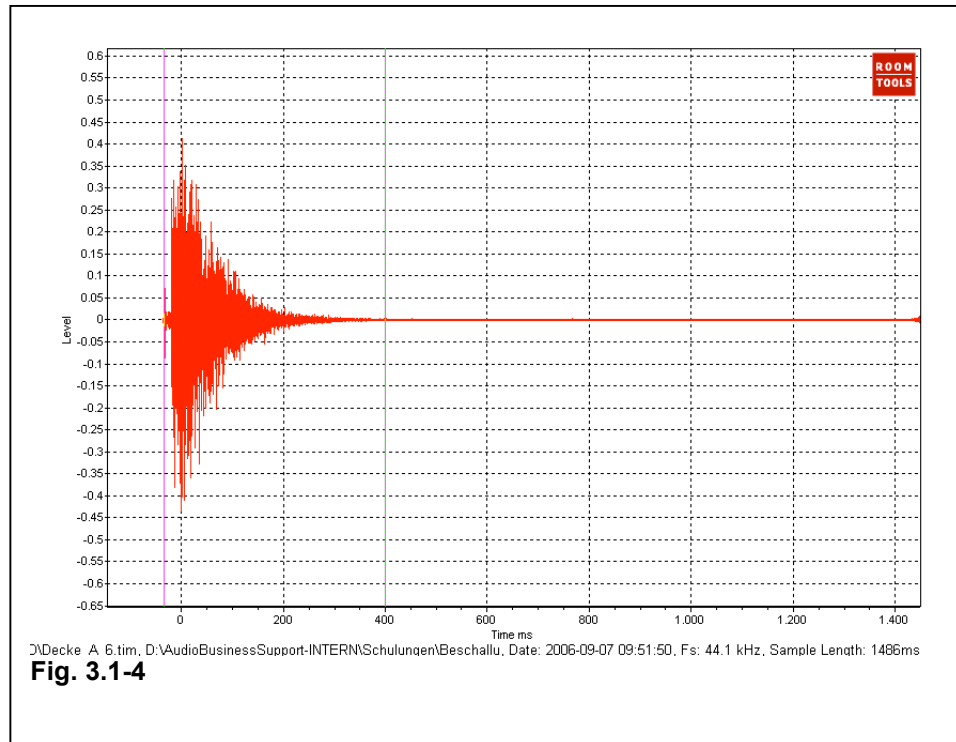


Fig. 3.1-3

Diagramm **Fig. 3.1-4** zeigt die Raumimpulsantwort
Diagramm **Fig. 3.1-5** zeigt die Nachhallzeiten in den Oktavbändern zwischen 250 Hz und 8 kHz



3.2. nicht-kubischer Raum „Büro 2“

das Diagramm **Fig. 3.2-1** zeigt die Abnahme des Schallpegels gerechnet nach den unterschiedlichen Methoden. Abmessung 15 m x 8 m x 2,9 m, RT_{60} etwa 0,42 s
 Diagramm **Fig. 3.2-2** zeigt die gemessene Abnahme. In diesem Zusammenhang wurde auch die Sprachverständlichkeit gemessen und im Diagramm **Fig. 3.2-3** dargestellt.

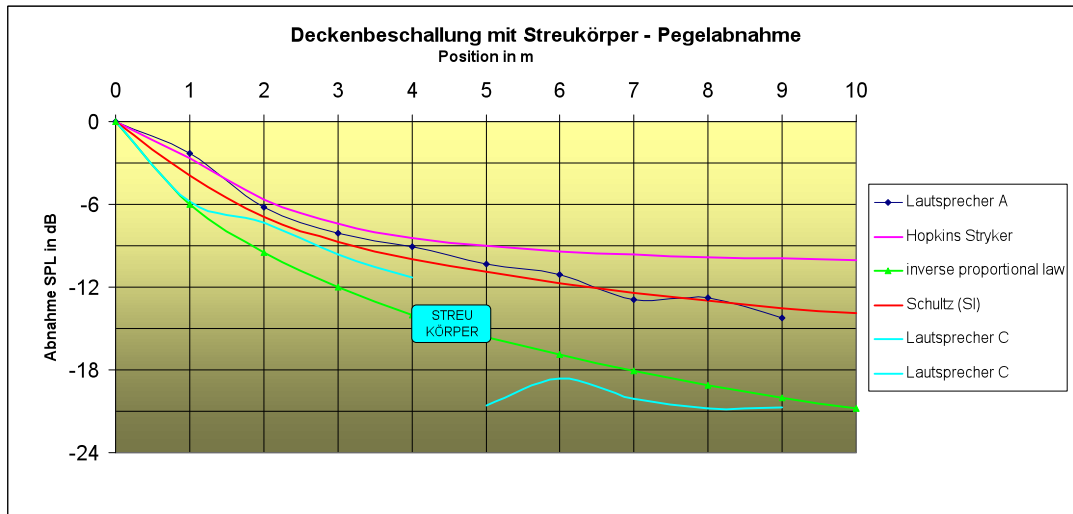


Fig. 3.2-1

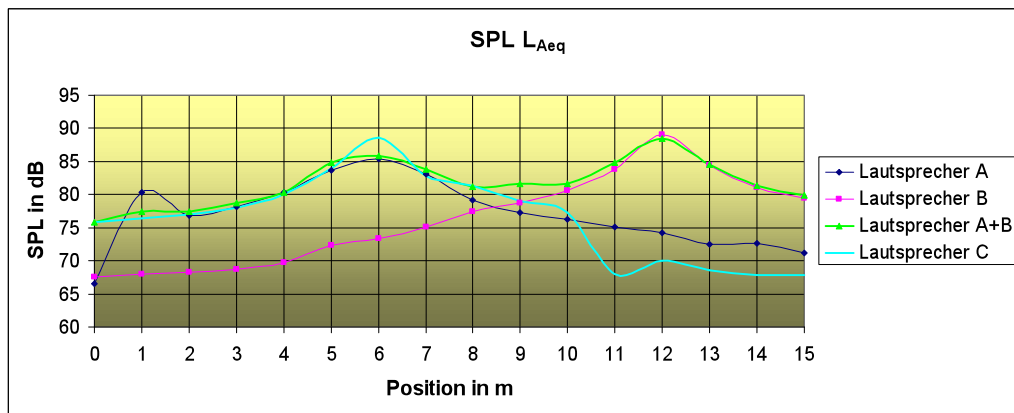


Fig. 3.2-2

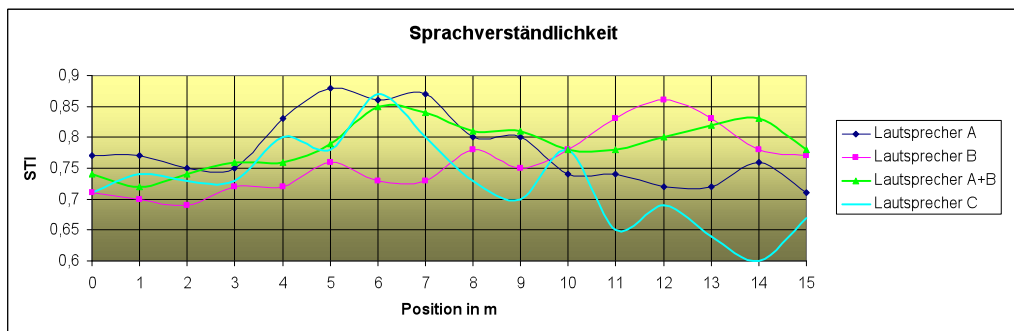
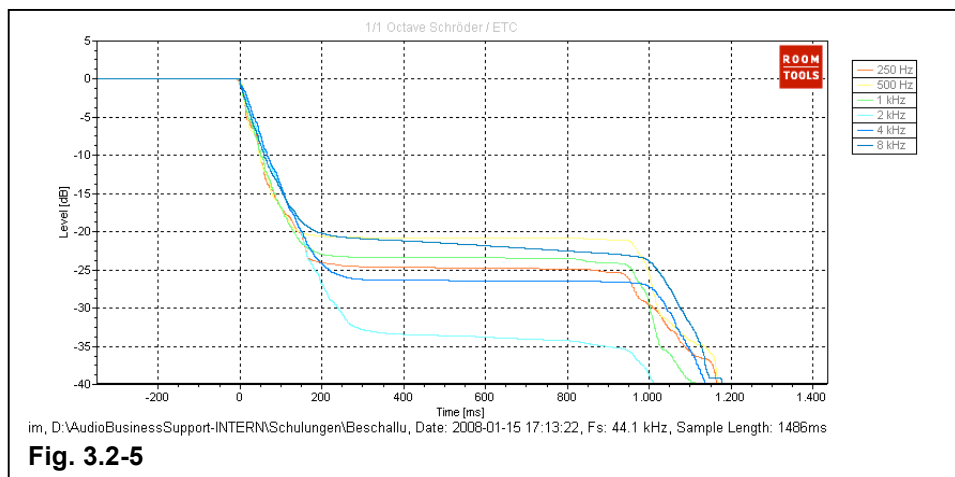
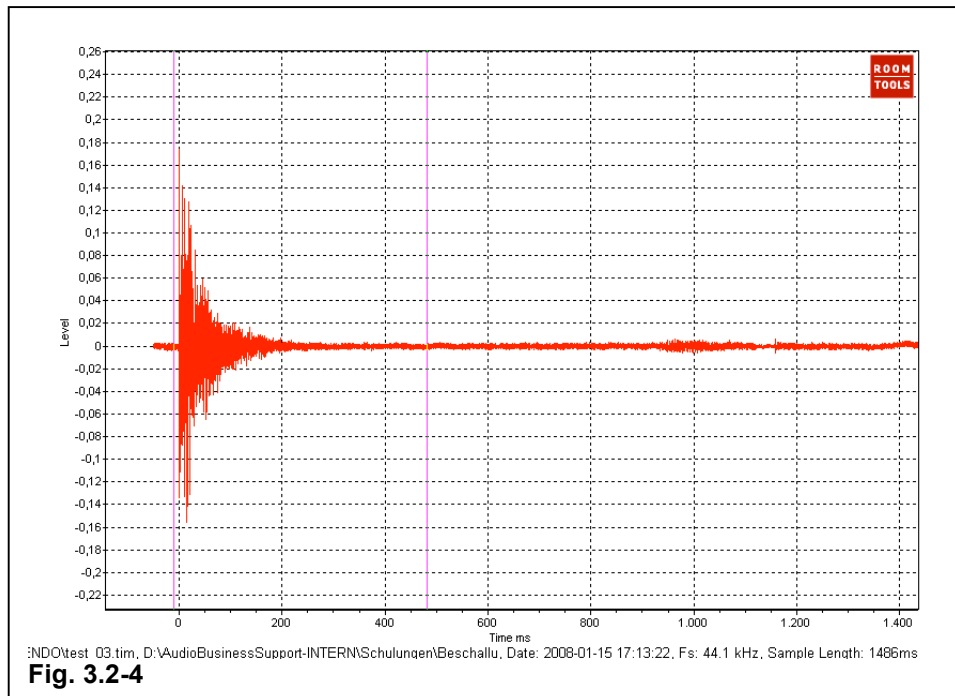


Fig. 3.2-3

Diagramm **Fig. 3.2-4** zeigt die Raumimpulsantwort
 Diagramm **Fig. 3.2-5** zeigt die Nachhallzeiten in den Oktavbändern zwischen 250 Hz und 8 kHz



3.3. nicht-kubischer Raum „Korridor“

das Diagramm **Fig. 3.3-1** zeigt die Abnahme des Schallpegels gerechnet nach den unterschiedlichen Methoden. Abmessung 18 m x 1,5 m x 2,9 m, RT_{60} etwa 0,66 s
 Diagramm **Fig. 3.3-1** zeigt die gemessene Abnahme. In diesem Zusammenhang wurde auch die Sprachverständlichkeit gemessen und im Diagramm **Fig. 3.3-3** dargestellt.

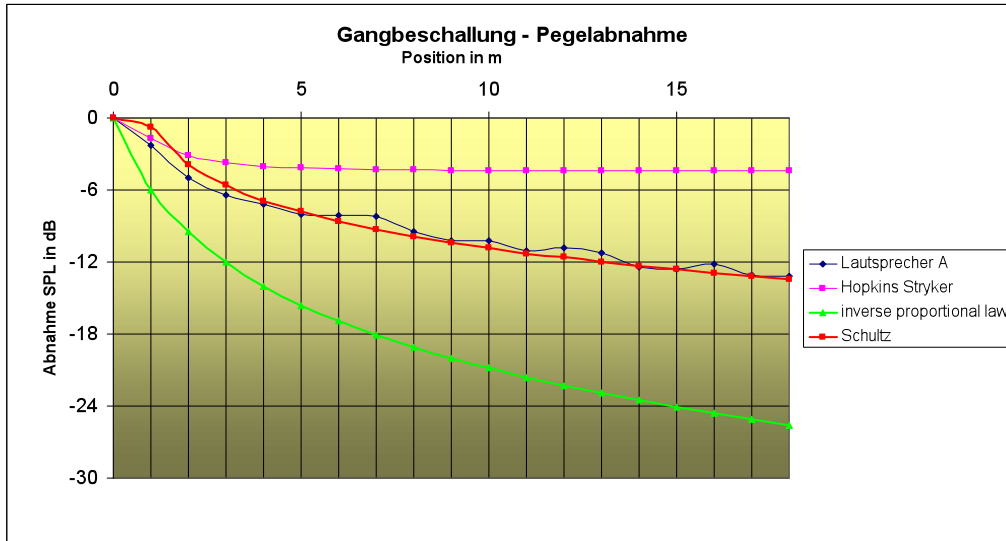


Fig. 3.3-1

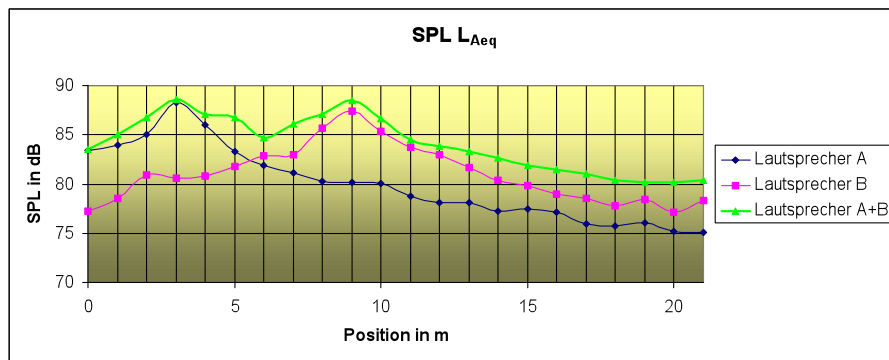


Fig. 3.3-2

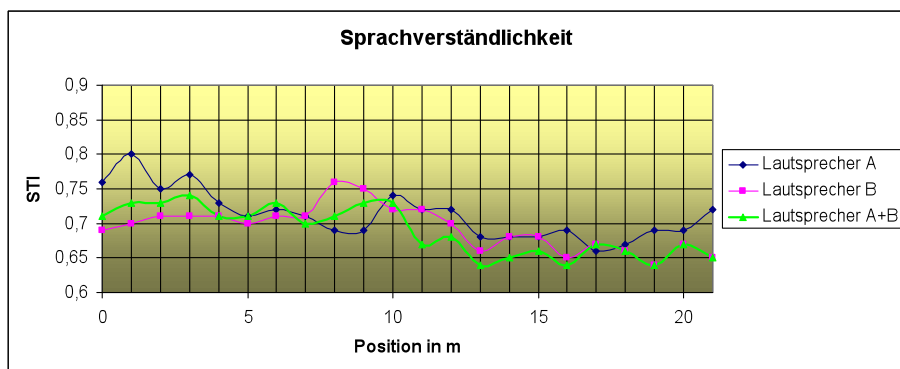
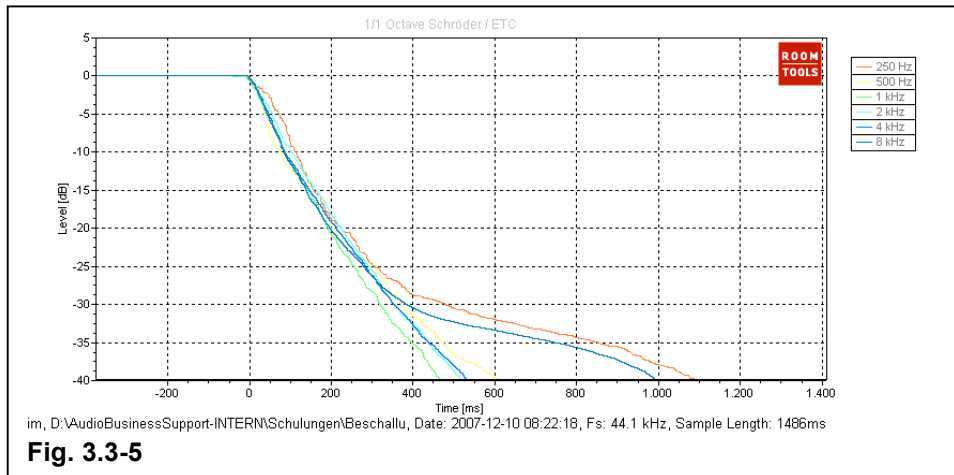
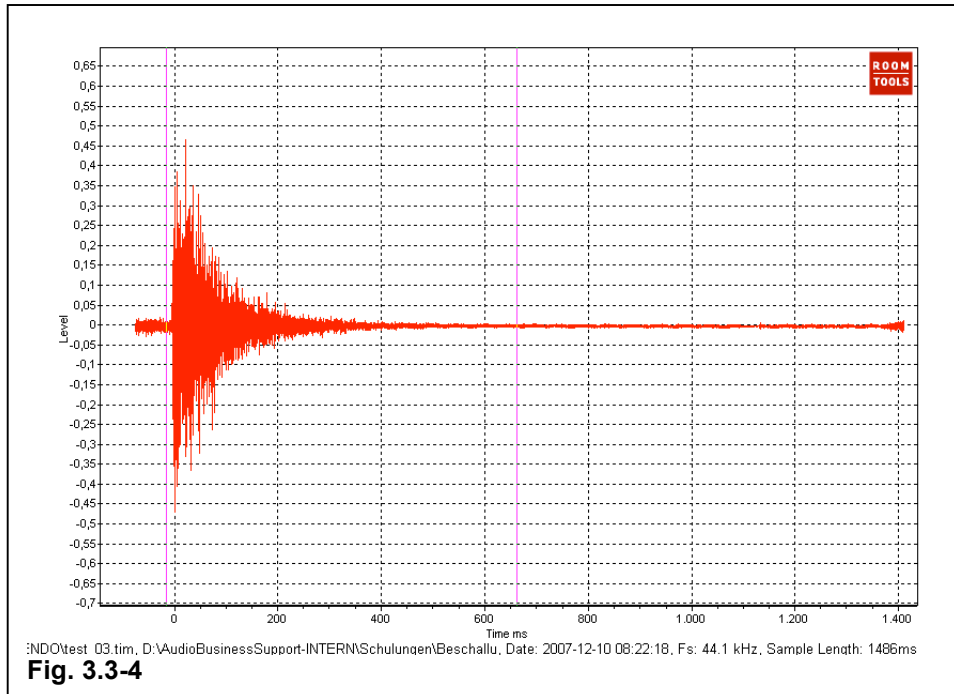


Fig. 3.3-3

Diagramm **Fig. 3.3-3** zeigt die Raumimpulsantwort
 Diagramm **Fig. 3.3-5** zeigt die Nachhallzeiten in den Oktavbändern zwischen 250 Hz und 8 kHz



3.4. nicht-kubischer Raum „Expedit“

die **Tabelle 3.4-1** zeigt die Abnahme des Schallpegels nach Messung und gerechnet nach den unterschiedlichen Methoden. Abmessung 19 m x 6 m x 3 m, RT_{60} etwa 0,5 s
Das Diagramm *Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.* zeigt die gemessene Abnahme. In diesem Zusammenhang wurde

Tabelle 3.4-1

Entfernung in m	Pegelabnahme in dB			
	Messung dB(A)	ULYSSES L_t	Hopkins-Stryker	Schultz
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,9	6,9	2,7	4,6
2	2,8	9,8	6,0	7,6
3	4,2	14,4	8,1	9,3
4	6,8	17,4	9,3	10,6
5	8,4	20,1	10,1	11,6
6	8,6	21,7	10,6	12,4
7	11,6	23,6	10,9	13,0
8	12,8	24,9	11,1	13,6
9	14,9	26,4	11,3	14,1
10	15,7	27,2	11,4	14,6
11	15,4	28,3	11,5	15,0
12	16,0	28,9	11,6	15,4
13	17,0	29,9	11,7	15,7
14	17,3	30,5	11,7	16,0
15	18,0	31,1	11,8	16,3

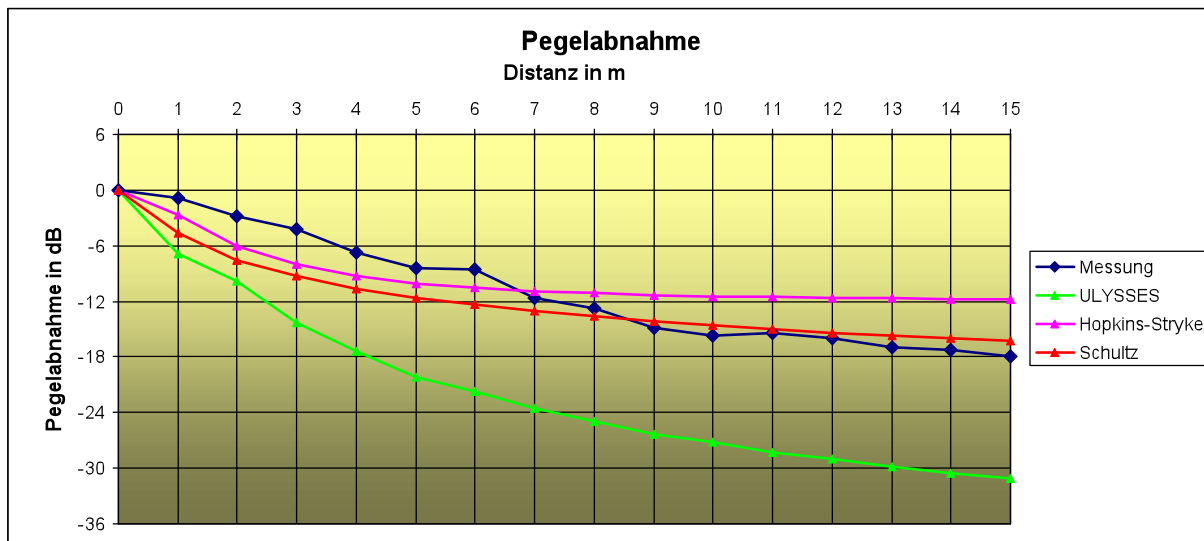


Fig. 3.4-1

3.5. nicht-kubischer Raum „Gang Boltzmann“

die **Tabelle 3.5-1** zeigt die Abnahme des Schallpegels nach Messung und gerechnet nach den unterschiedlichen Methoden. Abmessung 21 m x 1,3 m x 3 m, RT_{60} etwa 0,5 s
Das Diagramm **Figure 3.5-1** zeigt die gemessene Abnahme. In diesem Zusammenhang wurde

Tabelle 3.5-1

Entfernung in m	Pegelabnahme in dB			
	Messung dB(A)	ULYSSES L_t	Hopkins-Stryker	Schultz
0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	1,1	4,3	2,6	1,5
2	3,2	6,0	5,3	4,5
3	4,4	6,3	6,9	6,2
4	5,2	6,4	7,7	7,5
5	6	6,4	8,2	8,5
6	6,8	6,4	8,5	9,3
7	7,0	6,4	8,7	9,9
8	8,8	6,4	8,9	10,5
9	9,4	6,4	8,9	11,0
10	10,4	6,4	9,0	11,5
11	11,3	6,4	9,1	11,9
12	11,8	6,4	9,1	12,3
13	12,6	6,4	9,1	12,6
14	13,6	6,4	9,2	12,9
15	14,4	6,4	9,2	13,2
16	15,0	6,4	9,2	13,5
17	15,8	6,4	9,2	13,8
18	16,8	6,4	9,2	14,0
19	17,3	6,4	9,2	14,3
20	18,4	6,4	9,2	14,5
21	20,5	6,4	9,3	14,7

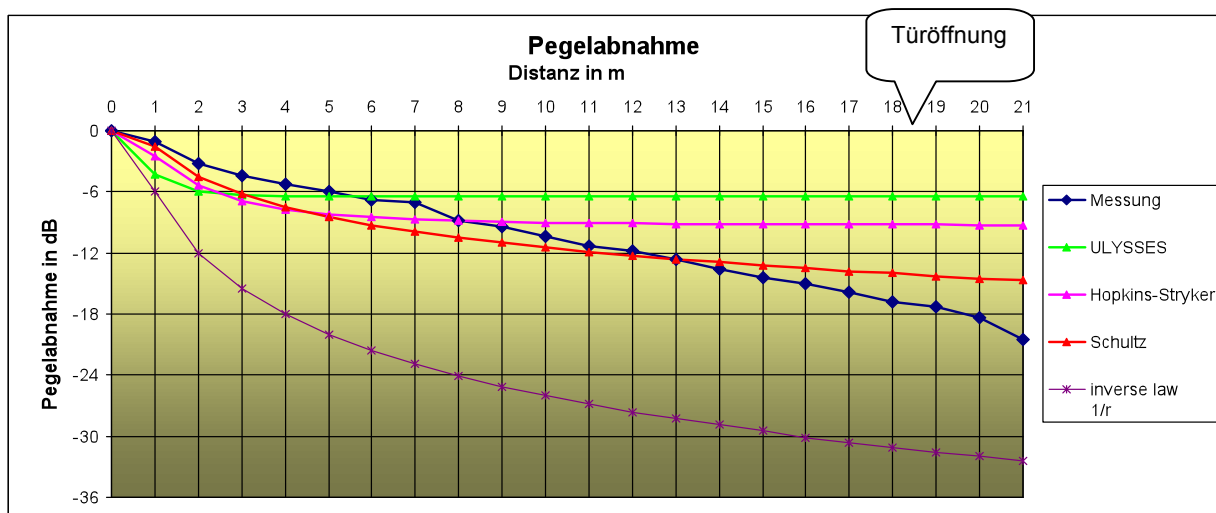


Figure 3.5-1

4. Berechnungsverfahren:

4.1. Berechnung der Nachhallzeiten

4.1.1. Sabine'sche Nachhallgleichung

Die Sabine'sche Formel (**Formel 4.1.1-1**) ist eine empirisch ermittelte Formel vor allem für größere Nachhallzeiten mit dem Nachteil, dass die Nachhallzeit bei vollständiger Absorption ($\bar{a}=1$) nicht 0 wird.

$$RT_{60} = K \cdot \frac{V}{S \cdot \bar{a}}$$

RT_{60} = Nachhallzeit in s

V = Volumen m^3

S = Raumfläche

\bar{a} = Absorptionsgrad gemittelt

K = Korrekturfaktor: 0,161=SI; 0,049=imperial

Formel 4.1.1-1

4.1.2. Eyring'sche Nachhallgleichung

Die Eyring'sche Formel (**Formel 4.1.2-1**) ist eine empirisch ermittelte Formel vor allem für mittelgroße Nachhallzeiten. Diese Formel ist eine Weiterentwicklung der Sabine'schen Formel.

$$RT_{60} = \frac{K \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{a})}$$

RT_{60} = Nachhallzeit in s

V = Volumen m^3 oder ft^3

S = Raumfläche in m^2 oder ft^2

\bar{a} = Absorptionsgrad gemittelt

K = Korrekturfaktor: 0,161=SI; 0,049=imperial

Formel 4.1.2-1

4.1.3. Fitzroy'sche Nachhallgleichung

Die Fitzroy'sche Nachhallgleichung (**Formel 4.1.3-1**) berechnet die RT_{60} für die x, y und z Raumflächen die bezüglich Absorption unterschiedlich wirksame Raumfläche. Die untenstehende Formel (**Formel 4.1.3-1**) beinhaltet auch die Luftabsorption Sa_{air}

$$RT_{60} = \frac{s_x}{S} \left(\frac{K_1 \cdot V}{S \cdot a_x + Sa_{air}} \right) + \frac{s_y}{S} \left(\frac{K_1 \cdot V}{S \cdot a_y + Sa_{air}} \right) + \frac{s_z}{S} \left(\frac{K_1 \cdot V}{S \cdot a_z + Sa_{air}} \right)$$

$$Sa_{air} = 4 \cdot V \cdot m$$

RT_{60} = Nachhallzeit in s

V = Volumen m^3 oder ft^3

S = Raumfläche in m^2 oder ft^2

$s_{x,y,z}$ = Raumfläche in m^2 oder ft^2

$a_{x,y,z}$ = Absorptionsgrad

Sa_{air} = äquivalente Schallabsorptionsfläche Luft in m^2

K_1 = Korrekturfaktor: 0,161=SI; 0,049=imperial

m = Energiedämpfungs konstante [$10^{-3}m^{-1}$]

Tabelle 4.1-1: Absorptionseinfluss der Luft bei Schallausbreitung

	Oktav Mittenfrequenz in Hz						
	125	250	500	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
Schallausbreitung im Freien	Schallabsorptionskoeffizient [dB/km]						
Temperatur 10°C relative Luftfeuchte 70%	0,5	1	2	4	8	20	50
Schallausbreitung in Räumen	Energiedämpfungs konstante m [$10^{-3} m^{-1}$]						
Temperatur 20°C relative Luftfeuchte 50%	0	0,075	0,25	0,75	2,5	7,5	25
Beispiel	äquivalente Schallabsorptionsfläche Sa_{air} 4.V.m						
V=1000 m³	0	0,3	1	3	10	30	100

Quelle: W.Fasold / E. Veres Schallschutz+Raumakustik in der Praxis Tabelle 4.10 Seite 102

4.2. Berechnung Abnahme des Schallpegels

4.2.1. Berechnung 1/r inverse proportional law

Schalldruck nimmt umgekehrt proportional mit zunehmenden Abstand r von der Schallquelle ab. Die Amplitude des Schalldrucks nimmt im Freifeld mit $1/r$ der Entfernung von einer punktförmigen Schallquelle ab. Bei doppeltem Abstand ist der Schalldruck p in Pascal halb so groß wie der Anfangswert. Daher die Bezeichnung „reziprokes Abstandsgesetz“ engl. „inverse proportional law“

In der Akustik gilt diese Berechnung ausschließlich für reflexionsarme „schalltote“ Räume oder gleichwertigen Bedingungen wie im Freifeld.

Berechnung der Schallpegelabnahme in dB nach **Formel 4.2.1-1**

$$L_{decr} = 20 \cdot \log r$$

L_{decr} = Pegelabnahme in dB
 r = Distanz Schallquelle zu Hörort in m

Formel 4.2.1-1

4.2.2. Berechnung Hopkins Stryker

Voraussetzung für eine richtige Berechnung nach diesem Modell ist, dass ein ausreichend homogenes Nachhallfeld auftritt, was bei nicht-kubischen Räumen allerdings kaum gegeben ist.

Die Berechnung nach **Formel 4.2.2-1** der Pegelabnahme nach Hopkins Stryker wird mit den Parametern Volumen und wirksamer Raumfläche (Fläche und Absorption) vorgenommen:

$$L_{decr} = 10 \log \left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2} + \frac{4}{S \cdot \bar{a}} \right) + korr$$

L_{decr} = Pegelabnahme

Q = Directivity (1=360°; 2=180°; 4=90°)

r = Distanz Schallquelle zu Hörort in m

S = Raumfläche

\bar{a} = Absorptionsgrad gemittelt

korr = Korrekturwert

Formel 4.2.2-1

Für eine Berechnung muss die Richtcharakteristik Q des Lautsprechers (directivity), die Fläche und die Absorption bekannt sein.

Besonders die Bestimmung der Absorption in einem Raum ist jedoch oft ein unbestimmter Punkt, da die Raummaterialien hinsichtlich der akustischen Eigenschaften meistens nicht bekannt sind.

4.2.3. Berechnung Schultz

Die Berechnung nach **Formel 4.2.3-1** der Pegelabnahme nach Schultz wird allein mit dem Abstand zwischen Schallquelle und Hörort, dem Volumen und Eingabe des interessierenden Oktavbandes vorgenommen.

Beide Parameter sind leicht bestimmbar. Als bestimmende Frequenz wird beispielsweise die Oktavfrequenz herangezogen, die für die Sprachverständlichkeit am wesentlichsten ist, also vorzugsweise das 2 kHz Oktavband.

Die Berechnung erfolgt nach einer Näherungsformel⁸:

$$L_{decr} = 120 - 10 \cdot \log r - 5 \cdot \log V - 3 \cdot \log f + korr$$

$$L_{decr} = \text{Pegelabnahme}$$

r = Distanz Schallquelle zu Hörort in m

V = Volumen in m^3

f = Frequenz in Hz z.B.: 2 kHz

korr = Korrekturwert: z. B. -101=SI; -88=imperial

Formel 4.2.3-1

Für Interessierte: Erklärung, wie sich der stets konstante Unterschied von „13“ bei der Näherung nach Schultz zwischen SI und imperialen Einheiten errechnet wird in **Formel 4.2.3-2** gezeigt:

Anmerkung: 1 m = 3,2804 ft

$$L_{decr} (\rightarrow SI) = 120 - 10 \cdot \log r - 5 \cdot \log V - 3 \cdot \log f + korr$$

$$L_{decr} (\rightarrow imperial) = 120 - 10 \cdot \log r \cdot conv_{m \rightarrow ft} - 5 \cdot \log V \cdot conv_{m \rightarrow ft}^3 - 3 \cdot \log f + korr$$

$$L_{decr} (\rightarrow imperial) = 120 - (10 \cdot \log r + 10 \cdot \log[conv_{m \rightarrow ft}]) - (5 \cdot \log V + 5 \cdot 3 \log[conv_{m \rightarrow ft}]) - 3 \cdot \log f + korr$$

$$SI_{diff} = L_{decr} (\rightarrow SI) - L_{decr} (\rightarrow imperial)$$

$$SI_{diff} = -10 \cdot \log[conv_{m \rightarrow ft}] - 5 \cdot 3 \log[conv_{m \rightarrow ft}]$$

$$SI_{diff} = -10 \cdot \log[3,2804] - 5 \cdot 3 \log[3,2804]$$

$$SI_{diff} \approx -5,16 - 7,74$$

$$SI_{diff} \approx 12,89 \approx 13$$

Formel 4.2.3-2

⁸ Don Davis & Carolyn Davis Sound system Engineering 2nd edition page 212

4.2.4. Praktische Durchführung der SchultZ Berechnung:

Es empfiehlt sich, in der täglichen praktischen Anwendung das unten stehende Diagramm **Fig. 4-2** anzuwenden, anstelle der Berechnungsformel.

Wie wird's gemacht?

Das Diagramm **Fig. 4-1** zeigt auf der x-Achse die Entfernung vom Lautsprecher Lotpunkt zum Hörort.

WICHTIG: diese Entfernung wird auf der Hörebenen gerechnet und ist **NICHT** die kürzeste Diagonalverbindung zwischen Lautsprecher und Hörort

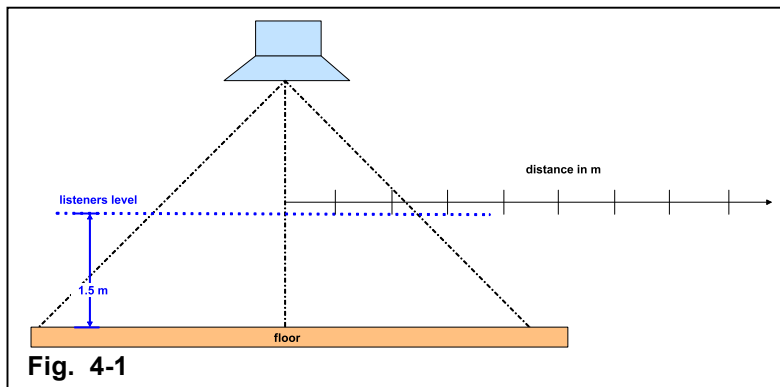


Fig. 4-1

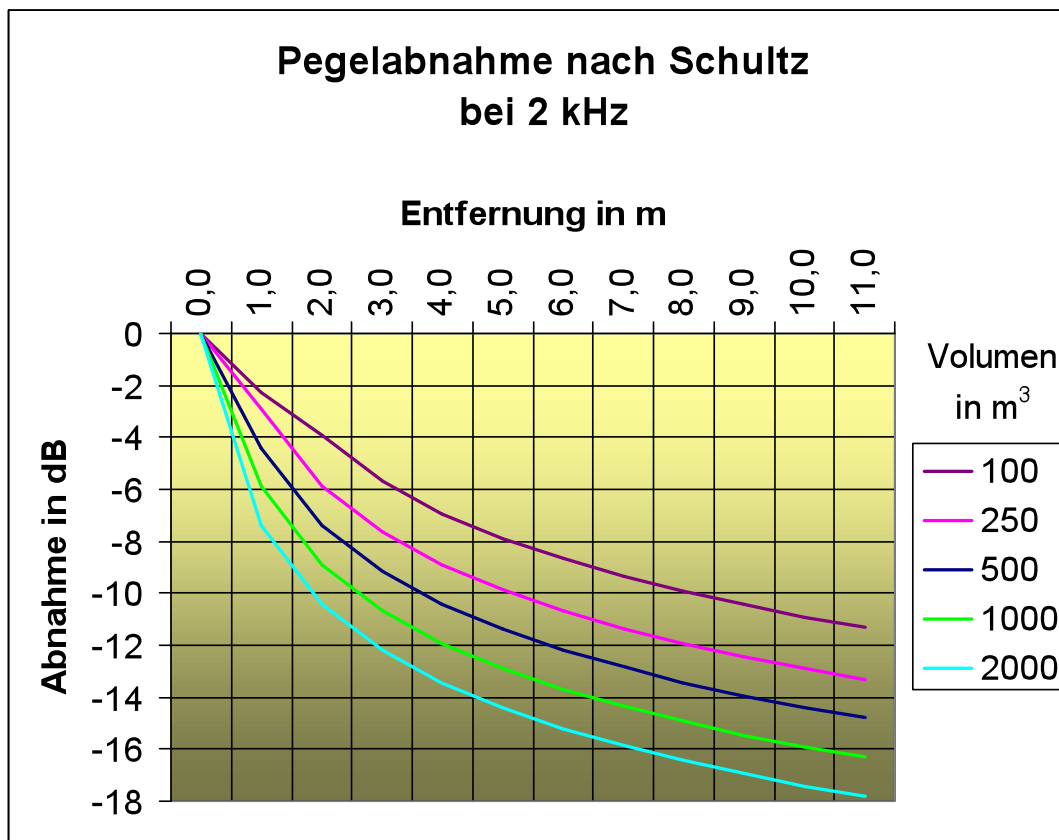


Fig. 4-2