

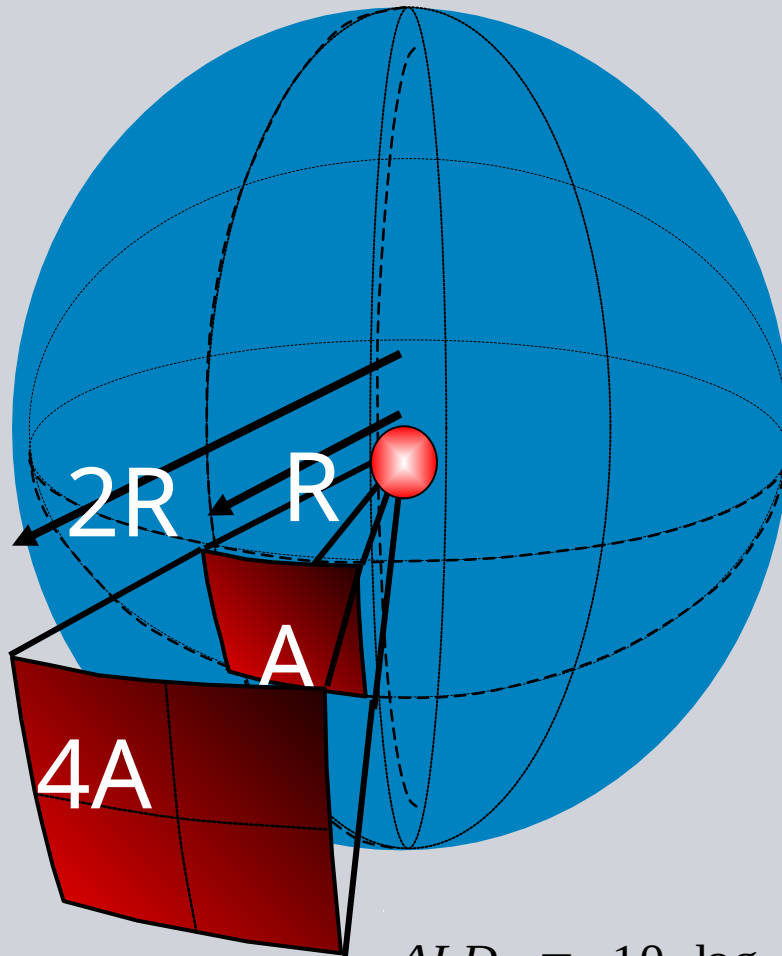
Raumakustik

Ausbreitung von Schall

A wide-angle photograph of a rural landscape. In the foreground, a large field of golden corn stands on the left, and a light-colored gravel or dirt road curves from the bottom right towards the center. In the middle ground, there are several small, white, single-story buildings, possibly farmhouses or barns, nestled among green fields and trees. The background features rolling hills covered in dense forest with autumn-colored foliage (yellows, oranges, and reds) under a bright blue sky with scattered white clouds.

Grundlagen

Im Freien – Ein Spezialfall



Der direkte Schalldruckpegel L_d einer Punktquelle nimmt bei einer Verdoppelung der Distanz mit 6dB ab.

Die Ausbreitung der Energie kann bei einer Punktquelle als eine sich mit der Zeit ausdehnende Kugeloberfläche betrachtet werden.

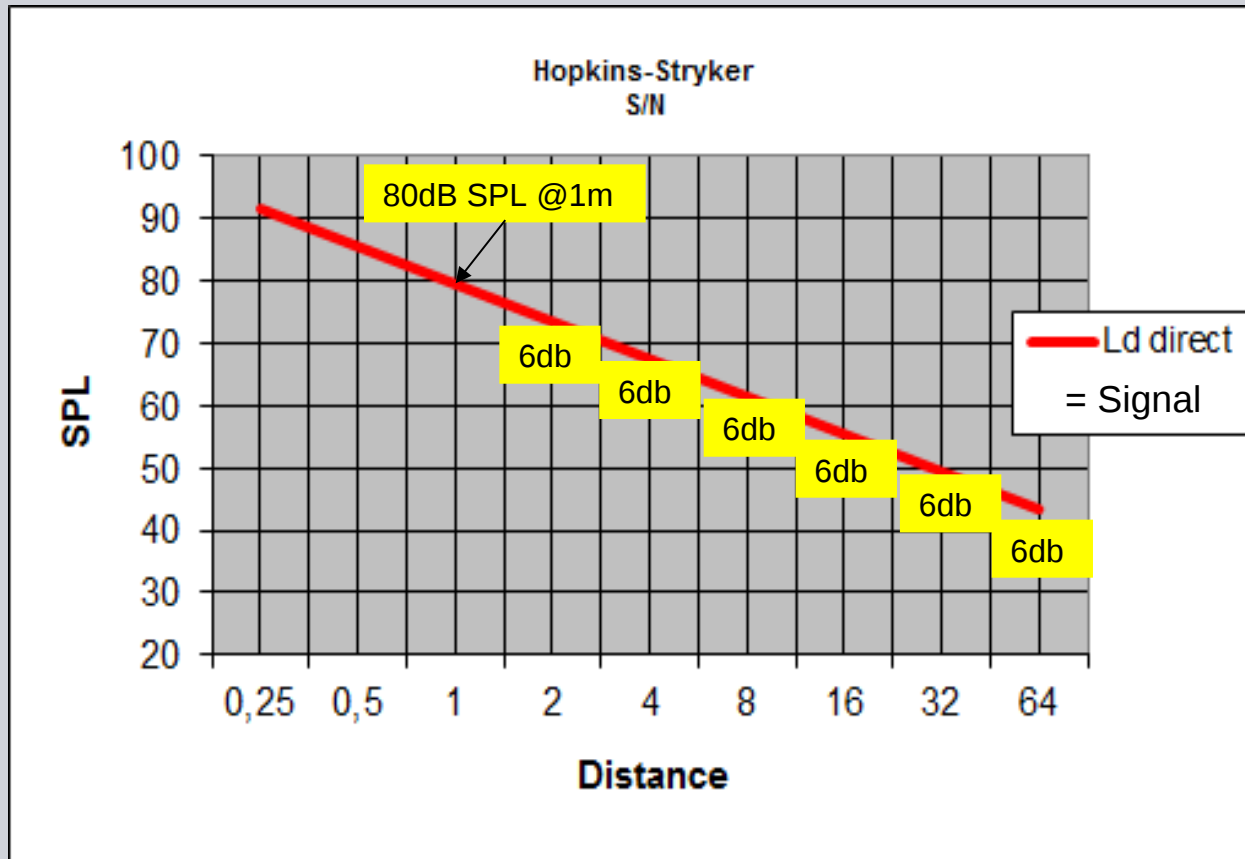
Die Energie bleibt konstant, die Fläche vergrößert sich im Quadrat.

Beispiel: Wird der Abstand (Radius) zur Quelle verdoppelt, vervierfacht sich die Fläche. Damit verringert sich die Energiedichte um einen Faktor 4, was einer Reduktion von 6dB entspricht.

Weiteres Beispiel: Die Beleuchtungsstärke eines Projektors verhält sich identisch.

$$\Delta LD = 10 \log \frac{Q}{4\pi r^2}$$

Abstand zwischen Signal und Störgeräusch, S/N (Signal to Noise Ratio)



Die Graphik zeigt ein Beispiel eines Signales S, das sich in einem offenen Raum ausbreitet.

Verdoppelt sich der Abstand, verringert sich der Schalldruckpegel um 6dB.

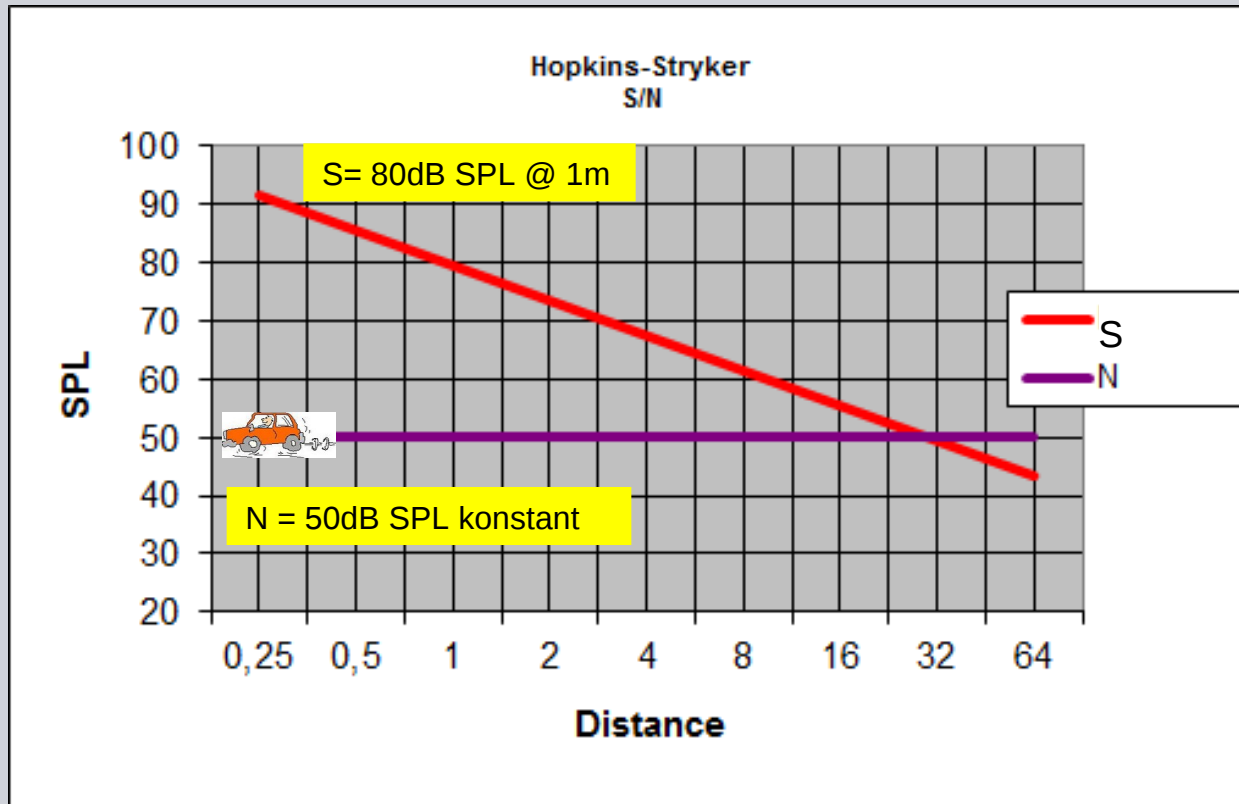
Bei einem Abstand von einem Meter hat man noch einen Pegel von 80 dB_{SPL}.

Aufgaben:

- Welchen Pegel hat man noch nach 1km?
- Kann man das noch hören?
- Kann man das noch hören und verstehen?

Signal / Störgeräusch Abstand (S/N Ratio)

cont. → **Resultate**



Richtwert: Eine Sprachalarmierungsanlage benötigt einen S/N Abstand von mind. 10 dB um die Verständlichkeit sicherzustellen.

Die Zeichnung zeigt ein Beispiel eines Signales S in einem offenen Raum (Freiland) und einem konstanten Hintergrundrauschen oder Lärm mit einem Pegel von 50 dB_{SPL}.

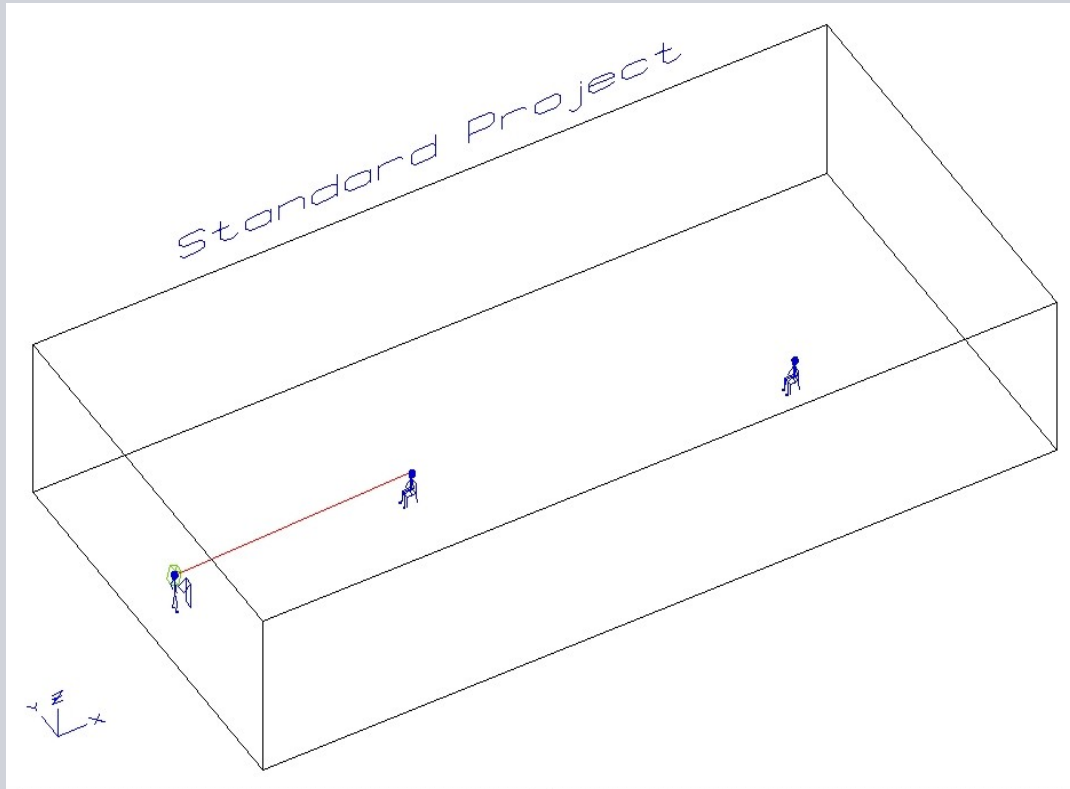
Da dieses Geräusch unser Signal überlagert bzw. maskiert, ist eines der ersten Design-Kriterien einen sinnvollen S/N Abstand zu erreichen.

Berechne die verschiedenen Abstände bei 4, 8, 16, 32 und 64m.

Grundlagen

Raumakustik

Direktschall L_d

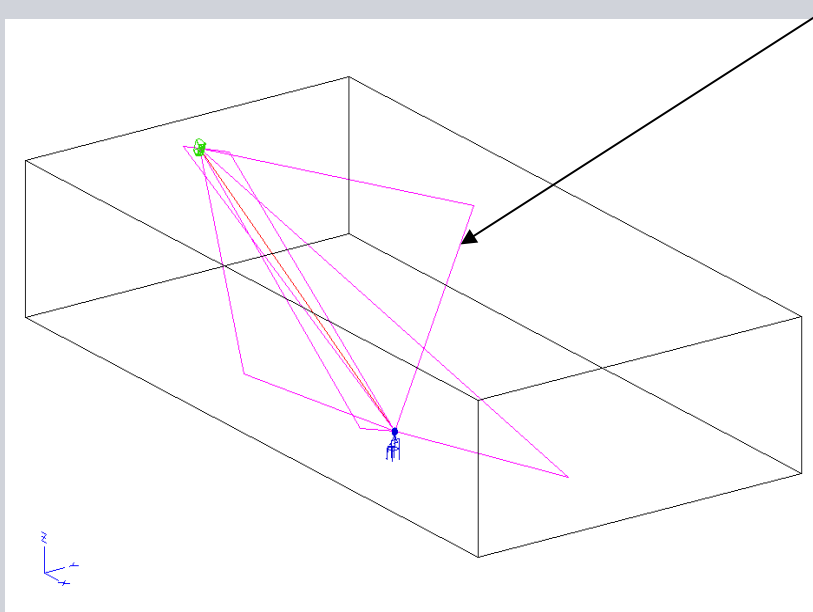


Der Direktschall bezeichnet dasjenige Signal, das den Zuhörer als erstes in direkter Linie, also ohne reflektiert worden zu sein, erreicht.

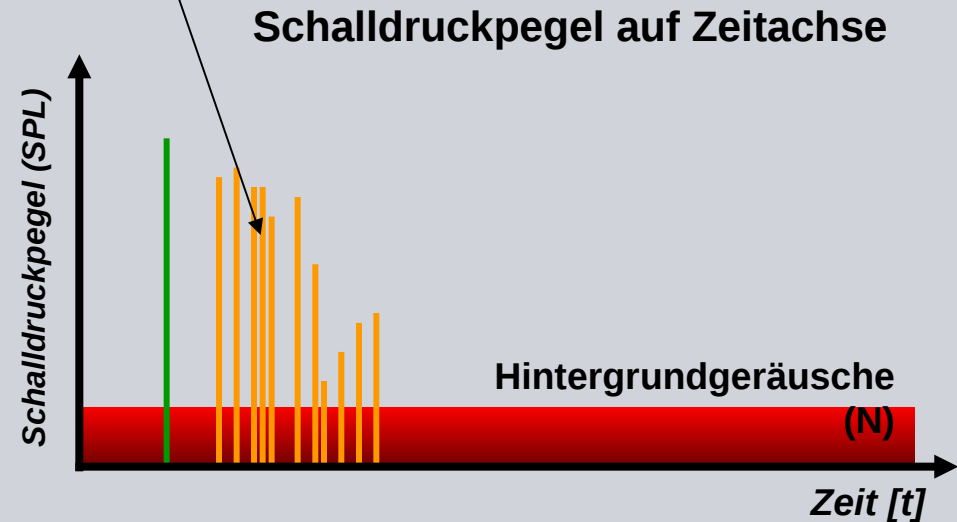
Der Pegel und die Signalverzögerung am Ort des Zuhörers entsprechen denjenigen Werten des offenen Raumes, die mittels quadratischem Abstandsgesetz berechnet werden.

Die Signalqualität wird dabei keine großen Änderungen erfahren haben.

Erste Reflektionen



Frühe Reflektionen

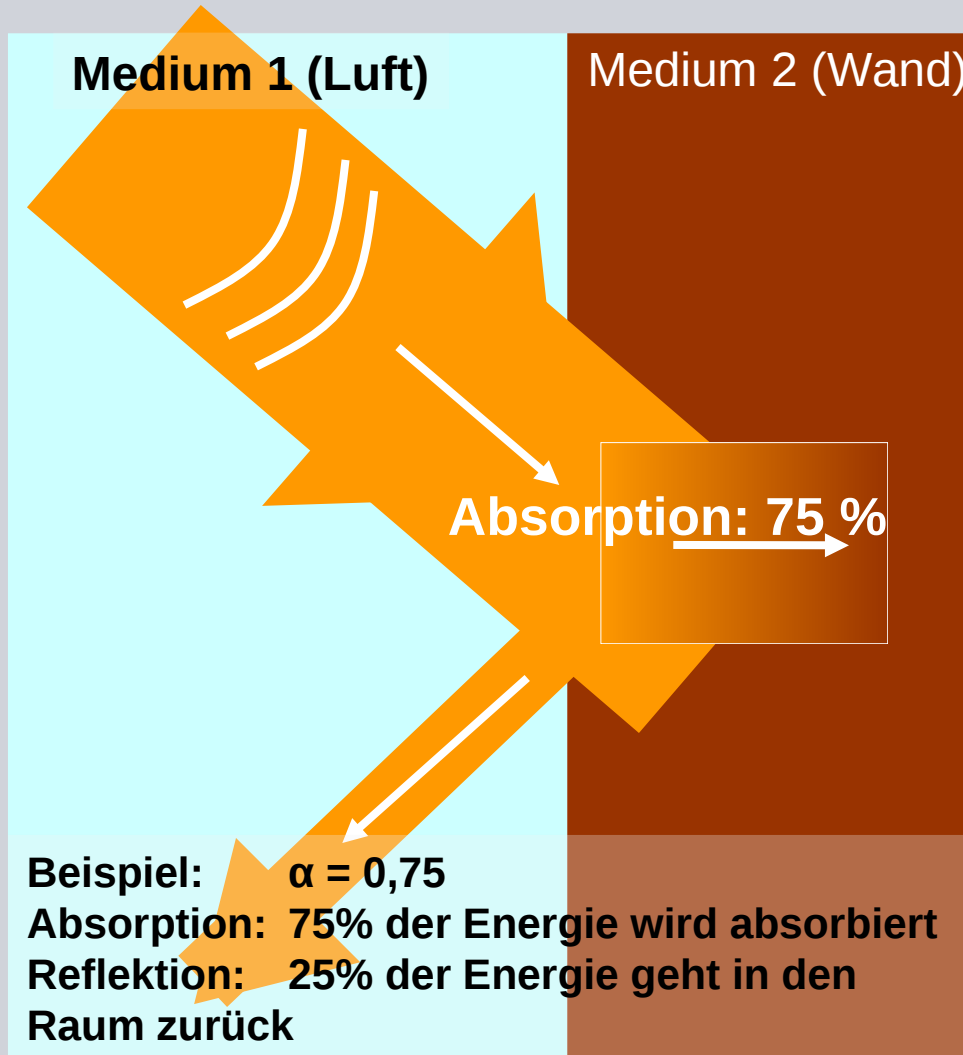


Reflektionen 1. Ordnung

Nach dem direkten Schall erreichen diejenigen Wellen den Zuhörer, die einmalig an den bestehenden Raumgrenzen, wie Decke, Wände, Böden oder Objekte reflektiert wurden. Diese Reflektionen nennt man Reflektion «1. Ordnung».

Reflexion und Absorption erzeugen Nachhall

Der Absorptions-Koeffizient α

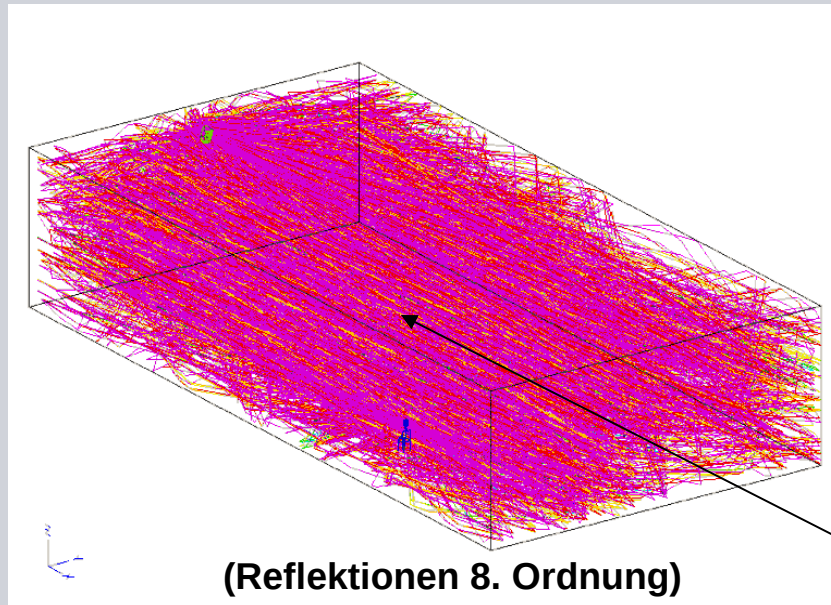


Jedes mal wenn eine Schallwelle auf einen Mediumwechsel (z.B. Luft auf Holz, Wände, Decke, etc) trifft, wird von einer Welle etwas Energie absorbiert und nur die verbleibende Restenergie geht zurück in den Raum (gilt generell für Licht, Schall, elektromagnetische Wellen, etc.).

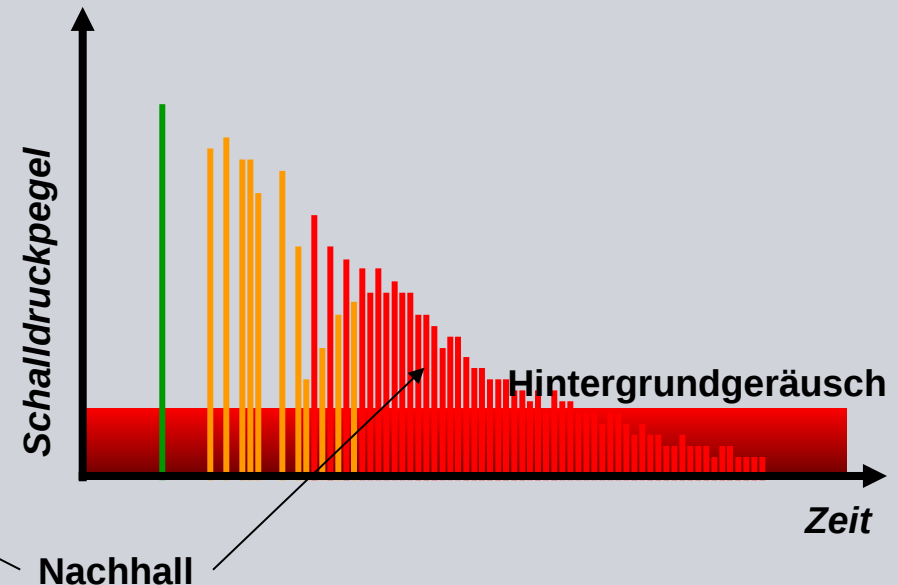
Die Oberflächenbeschaffenheit einer Raumgrenze definiert unter anderem den Dämpfungskoeffizient, der den Grad der Energie-Absorption definiert.

Aber Achtung:
der effektive Grad der Absorption ist frequenzabhängig!

Diffuse Schallfelder oder Nachhall, Lr (Beispiel Reflexionen 8. Grades)



(Reflexionen 8. Ordnung)

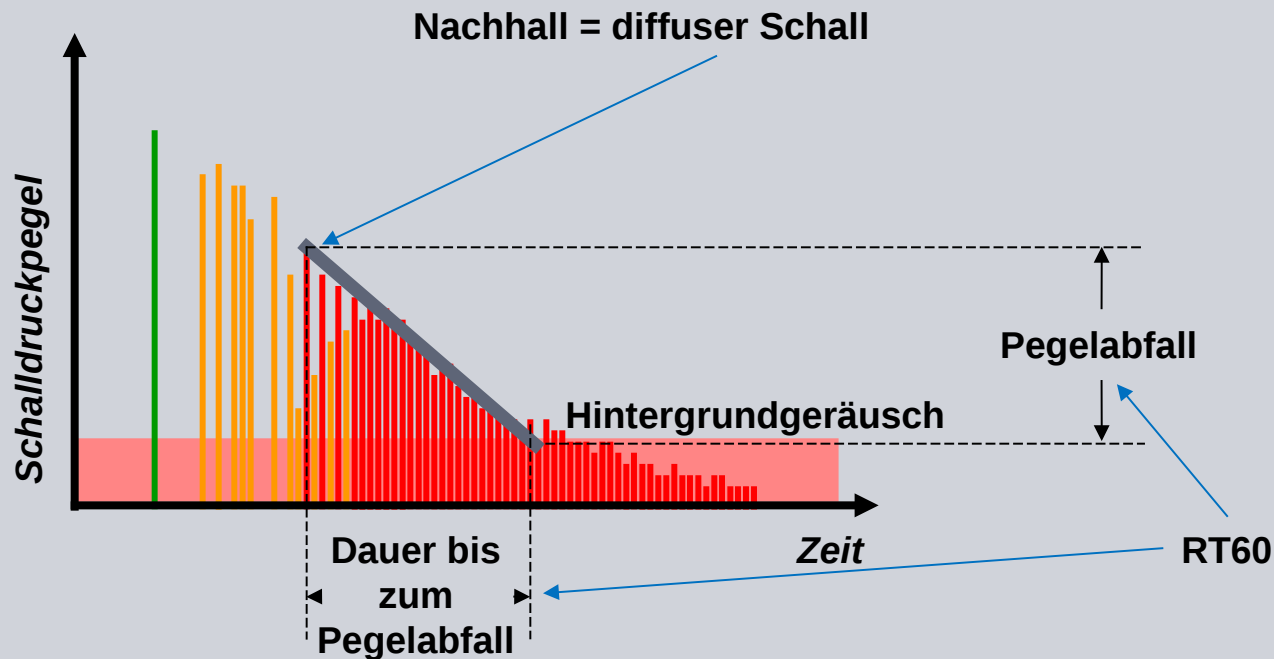


Als nächstes werden die reflektierte Schallwellen immer wieder an den Raumgrenzen reflektiert, bis zum Zeitpunkt, wo der Raum gleichmäßig mit einem diffusen Signal gefüllt, bzw. die reflektierte Energie total abgeklungen ist.

In der linken Simulationsgraphik sieht man die Reflexionen bis zur 8. Ordnung (8 x wurde das gleiche Signal reflektiert) und wie der Raum gänzlich gefüllt wird. In der rechten Graphik, sind die eingehenden Schalldruckpegel des ursprünglichen Pulses als Nachhall zu erkennen (rote Linien).

Diffuse Schallfelder oder Nachhall, Lr

Die Nachhallzeit RT60



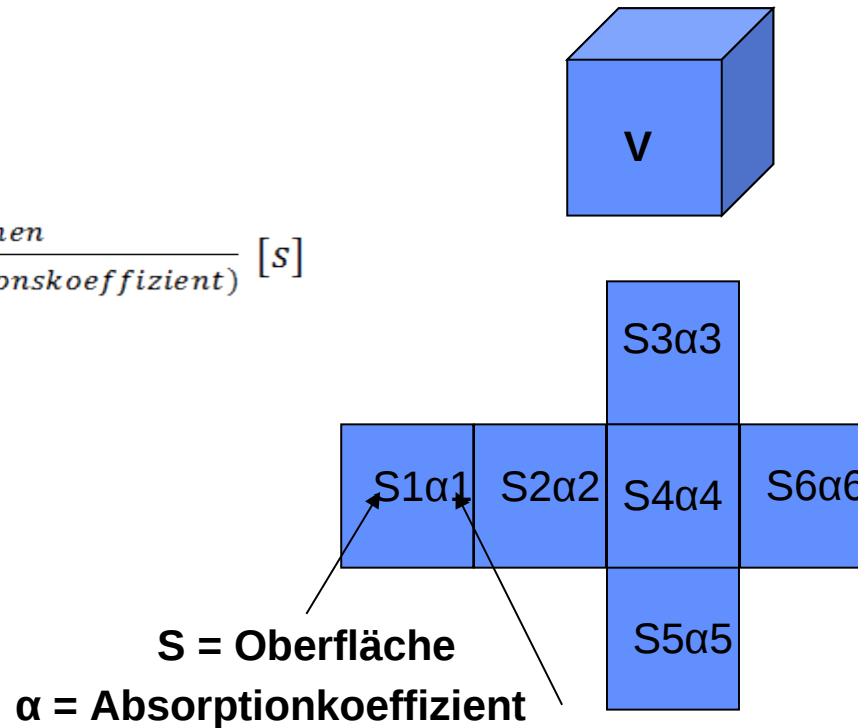
- Der Pegelabfall von einem diffusen Schallfeld benötigt eine gewisse Zeit.
- Die Zeit, die benötigt wird, um einen Abfall von 60dB zu erreichen wird RT60 genannt.
- Die Nachhallzeit RT60 hängt von der Raumgröße und seinen akustischen Absorptionseigenschaften ab.
- RT60 kann gemessen und errechnet werden.

Nachhallzeit RT_{60} nach W.C. Sabine

RT_{60} wird ausgehend vom Raumvolumen und den entsprechenden Absorptionskoeffizienten der einzelnen Oberflächen errechnet

$$RT_{60} = k \times \frac{\text{Raumvolumen}}{\Sigma(\text{Oberfläche} \times \text{Absorptionskoeffizient})} [s]$$

$$k = \frac{24 \times \ln 10}{340 \frac{m}{s}} = 0.163 \frac{s}{m}$$



Gleichungen für die Nachhallzeitberechnung: Sabine, Eyring and Fitzroy

REVERBERATION TIME EQUATIONS: T = 60 dB DECAY TIME IN SECONDS		
EQUATION:	ENGLISH UNITS: S = SURFACE AREA IN FT ² V = VOLUME IN FT ³	SI UNITS: S = SURFACE AREA IN m ² V = VOLUME IN m ³
SABINE – GIVES BEST CORRESPONDENCE WITH PUBLISHED ABSORPTION COEFFICIENTS WHERE $\bar{\alpha}$ IS LESS THAN 0.2	$T = \frac{.049V}{S \bar{\alpha}}$	$T = \frac{.16V}{S \bar{\alpha}}$
EYRING – PREFERRED FORMULA FOR WELL-BEHAVED ROOMS HAVING $\bar{\alpha}$ GREATER THAN 0.2 OR SO	$T = \frac{.049V}{-S \ln (1 - \bar{\alpha})}$	$T = \frac{.16V}{-S \ln (1 - \bar{\alpha})}$
FITZROY-(SABIN) – FOR RECTANGULAR ROOMS IN WHICH ABSORPTION IS NOT WELL DISTRIBUTED.	$T = \frac{.049V}{S^2} \left(\frac{X^2}{X\alpha_x} + \frac{Y^2}{Y\alpha_y} + \frac{Z^2}{Z\alpha_z} \right)$	$T = \frac{.16V}{S^2} \left(\frac{X^2}{X\alpha_x} + \frac{Y^2}{Y\alpha_y} + \frac{Z^2}{Z\alpha_z} \right)$
α_x , α_y , AND α_z ARE AVERAGE ABSORPTION COEFFICIENTS OF OPPOSING PAIRS OF SURFACES WITH TOTAL AREAS x, y, AND z.		

Figure 5-9. Reverberation time equations

Es existieren verschiedene Modelle und Algorithmen um den RT_{60} zu berechnen

Für «normale» Räume wird die Berechnung gemäß Sabine verwendet.

In Räumen mit sehr starken Absorptionen empfiehlt sich die Berechnung gemäss Eyring.

Empfohlene RT_{60} Werte nach DIN 18041

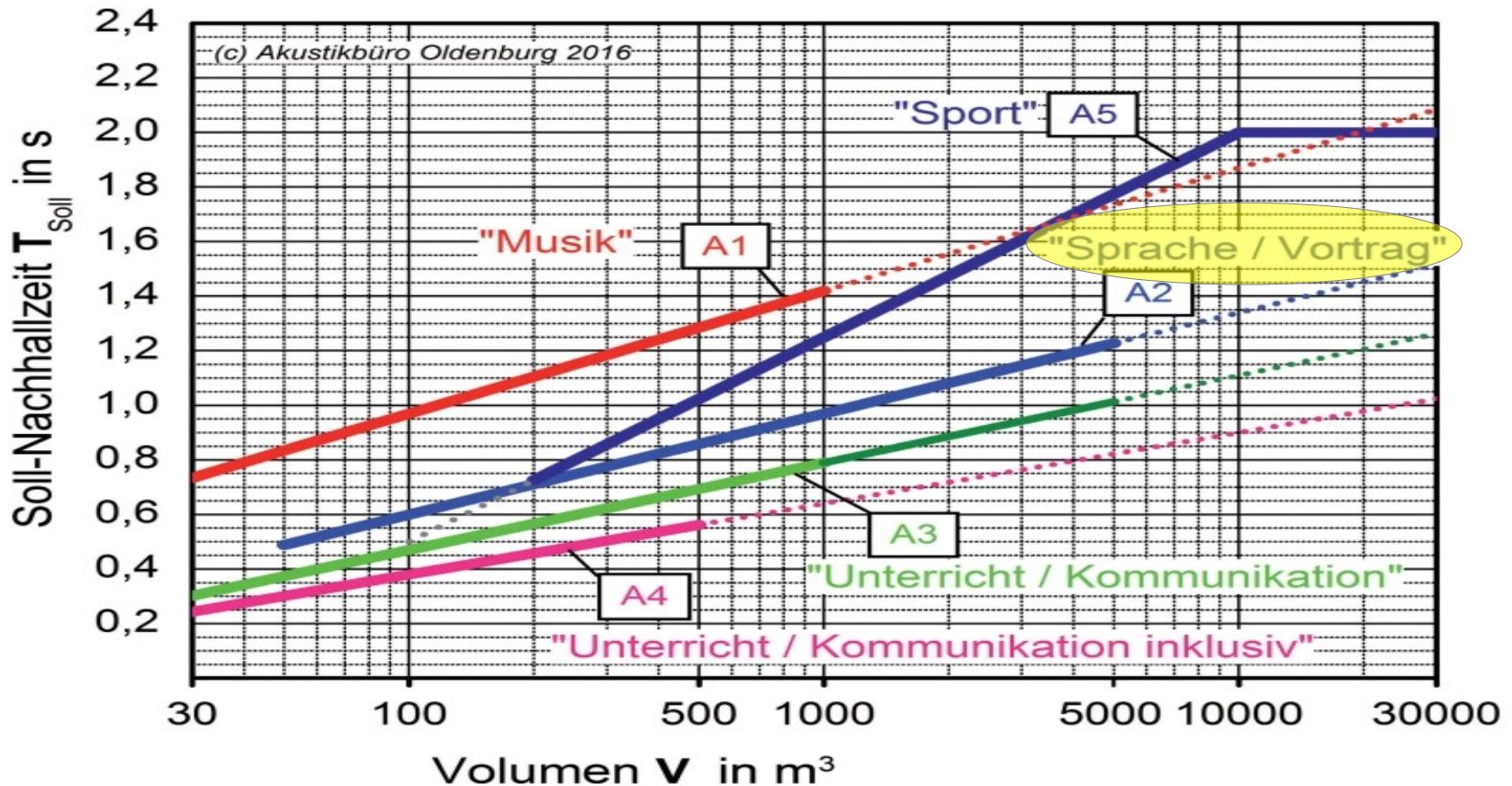
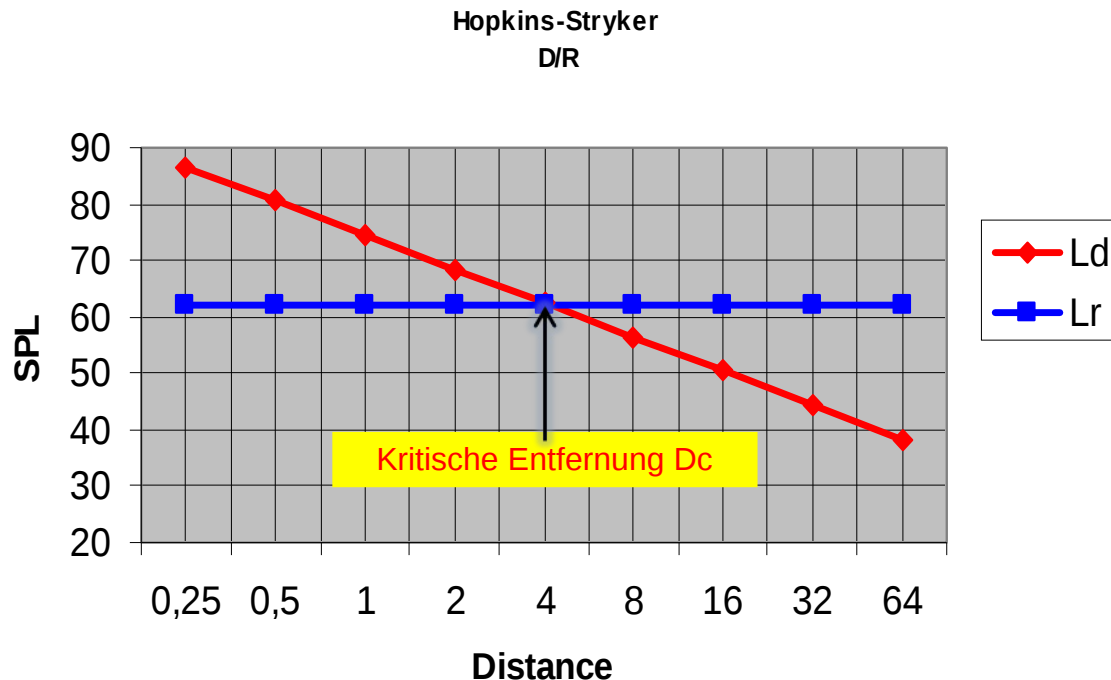


Bild 2 Werte für die Nachhallzeit T_{Soll} je nach Raumnutzung und -volumen.

Direkter Schall und Nachhall, Ld & Lr

Kritische Entfernung Dc und Hallradius rH



Hinweis: je besser der Abstand zwischen D / R wird, desto besser wird die Verständlichkeit

Hinweis: das Nachhallfeld wird durch den gesamten direkten Schall generiert

Die Graphik zeigt den direkten Schalldruckpegel Ld mit einem Abfall von 6dB pro verdoppelter Weglänge.

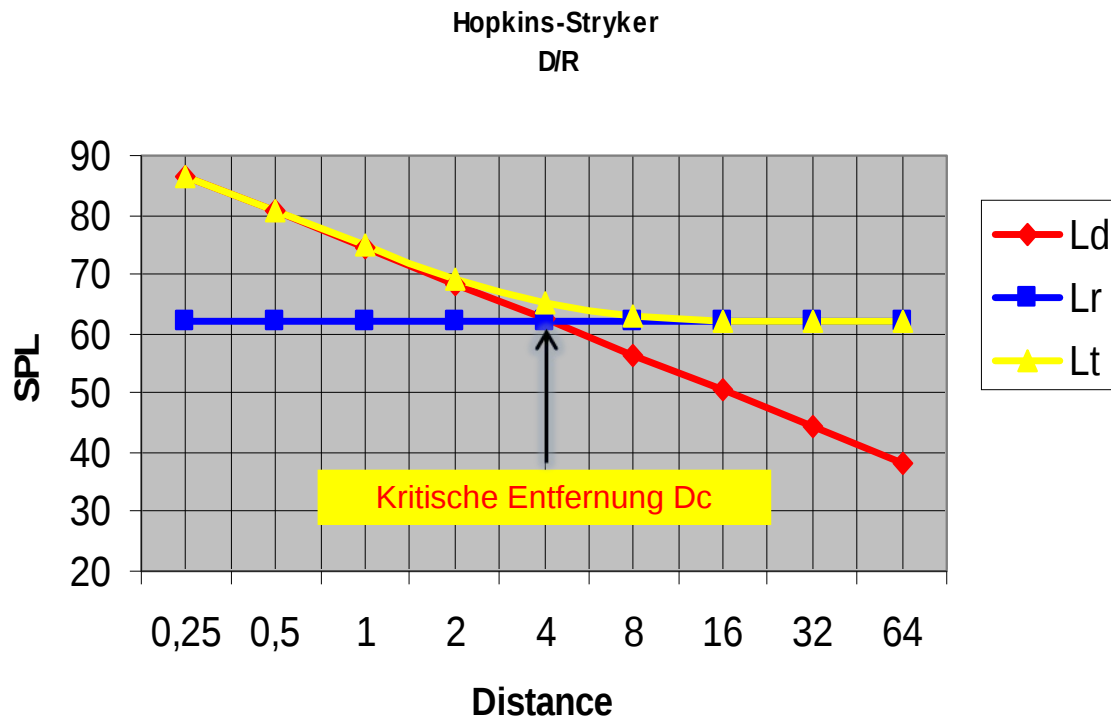
Ebenfalls wird das über die Distanz konstante Nachhallfeld Lr (diffuser Schall) gezeigt.

Als Resultat bekommt in Abhängigkeit zum Abstand zur Quelle ein unterschiedliches Verhältnis zwischen direktem und nachhallendem Schall (D/R).

Die kritische Distanz Dc bezeichnet den Ort mit gleich grossem Direkt- und Nachhallpegel Ld bzw. Lr.

Dc bezeichnet in der Akustik einen sehr wichtigen Parameter.

Das gesamte Schallfeld $L_t = L_d + L_r$



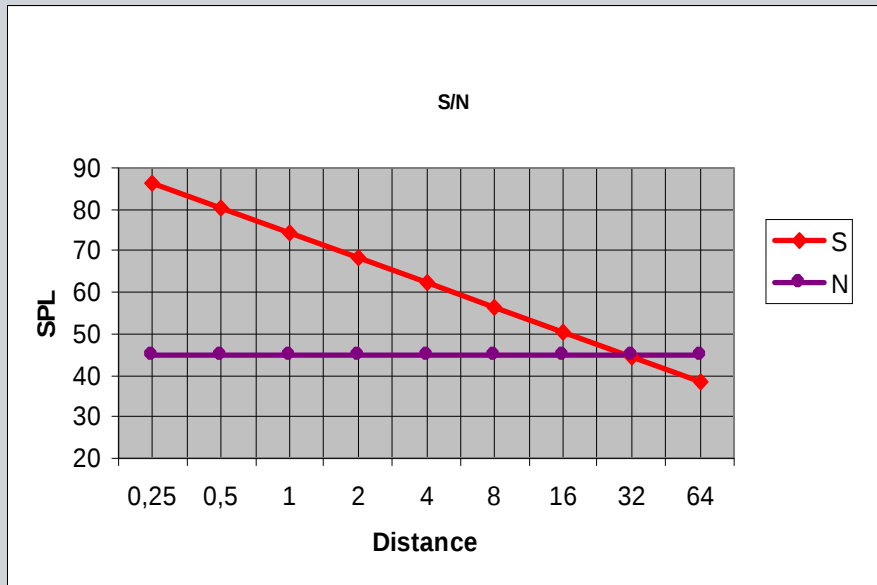
Die Graphik zeigt den direkten Schalldruckpegel L_d und das Nachhallfeld L_r

Ebenfalls wird L_t , die Summe der Schallpegel von L_d und L_r , aufgezeigt.

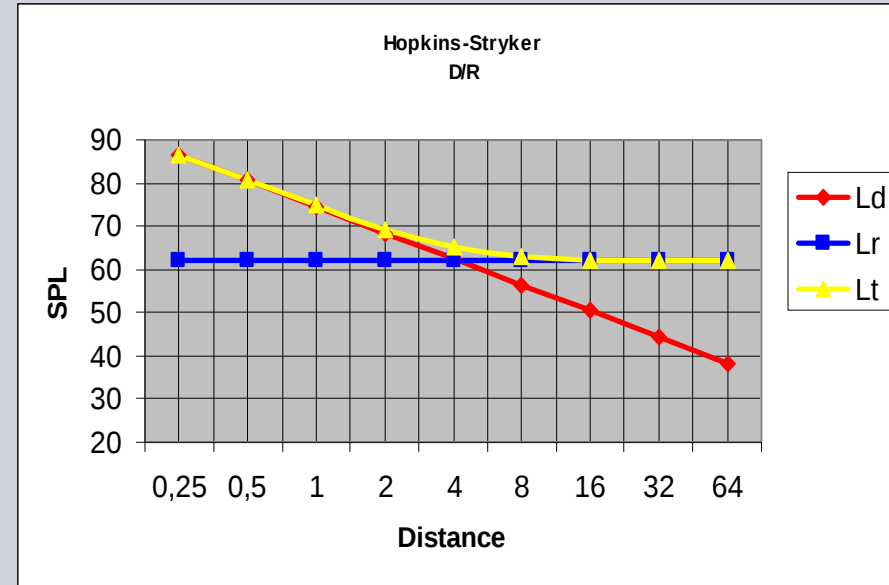
L_t ist der Schalldruckpegel welcher bei einer konstant energieabgebenden Punktquelle über eine gewisse Zeit gemessen werden kann
Nach der kritischen Distanz wird für einen Zuhörer das Nachhallfeld und das Signal addiert und „verschwindet“

L_d und L_r werden durch die gleiche Quelle erzeugt und beide addieren sich zum Signalpegel L_d bis die kritische Distanz D_c erreicht wird. Bis dahin verhält sich L_t wie im offenen Raum und nimmt entsprechend ab. Danach bleibt L_t konstant auf der Höhe des Nachhalls L_r

Achtung: Signal / Noise entspricht nicht dem Direktschall / Nachhall und Schallfeld

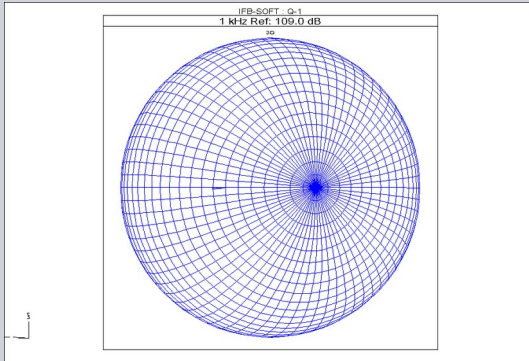


Das Verhältnis von Signal zum Störgeräusch ist ein Verhältnis von unabhängigen Signalpegeln von unterschiedlichen Quellen, der Signalpegel S und der Störgeräuschpegel N

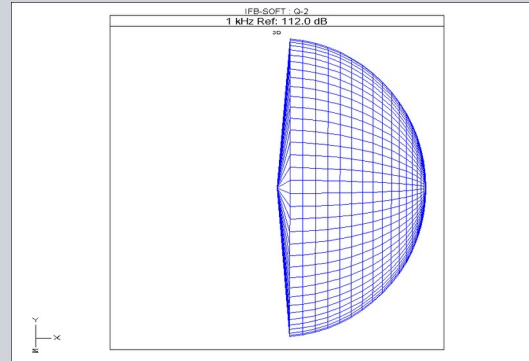


Der ganze direkte Schall Ld wird zum Nachhallfeld Lr gewandelt und addiert sich zum Schallfeld Lt (über eine lange Zeitperiode, bei einem konstanten Signal)
Ld, Lr und Lt kommen alle von der gleichen Quelle. Lt ist der Signalpegel in einem nachhallenden Raum.

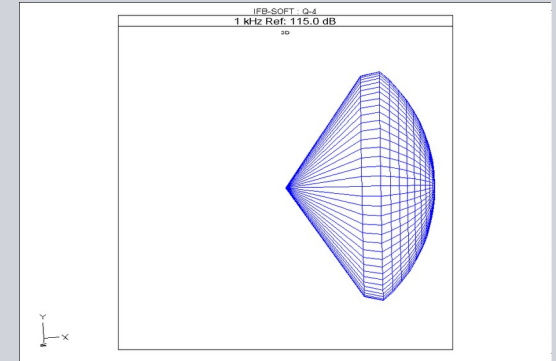
Der Richtfaktor einer Quelle, Q & DI



Q = 1



Q = 2



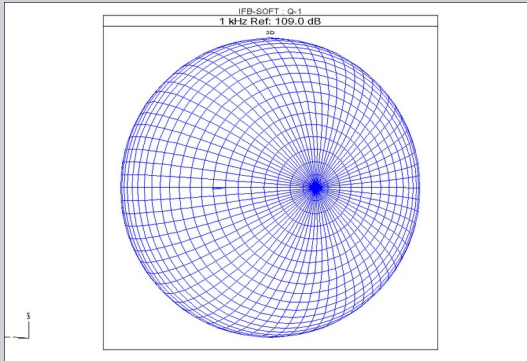
Q = 4

Die Graphiken zeigen die Richtcharakteristika verschiedener Quellen mit unterschiedlichen Richtfaktoren (Richtungsballons). Diese Richtungsballone sind 3-D Ausdrücke des direkten Schallpegels L_d . Diese Ballons zeigen, wohin die Energie des direkten Schalles abgestrahlt wird.

In diesem theoretischen Beispiel, wird der Schall beim Richtfaktor $Q = 1$ gleichmäßig als Kugel ausgestrahlt. Bei einem Richtfaktor $Q = 2$ hat man eine Halbkugel und bei $Q = 4$ wird der Schall auf eine «Viertelkugel» gerichtet. Unter der Annahme, dass immer die gleiche Energie ausgestrahlt wird, nimmt natürlich die Energiedichte in Abstrahlrichtung zu, aber nimmt mit steigendem Abstand zur Abstrahlrichtung ab.

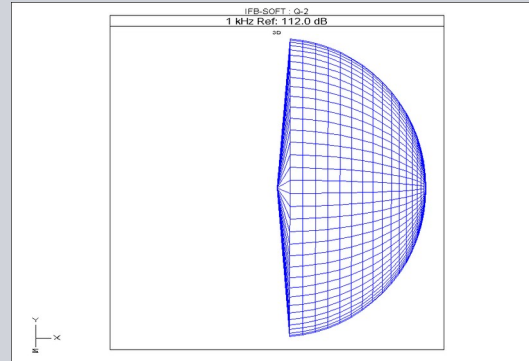
Q beschreibt die Veränderung der Energiedichte, verglichen mit der Energiedichte einer omni-direktionalen Punktquelle ($Q = 1$). Je höher Q , desto kleiner ist i. d. R. der Abdeckungsgrad bzw. Abstrahlwinkel.

Das Richtungsmaß einer Quelle, Q & DI



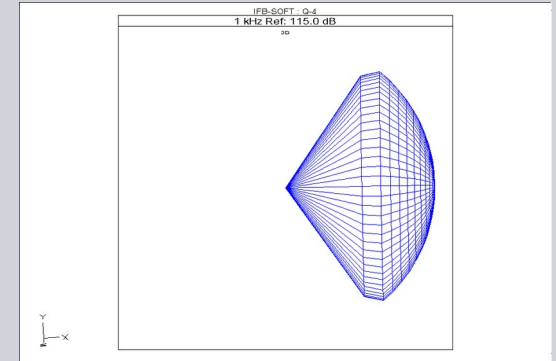
Q= 1

DI= 0 dB



Q= 2

DI= 3 dB



Q= 4

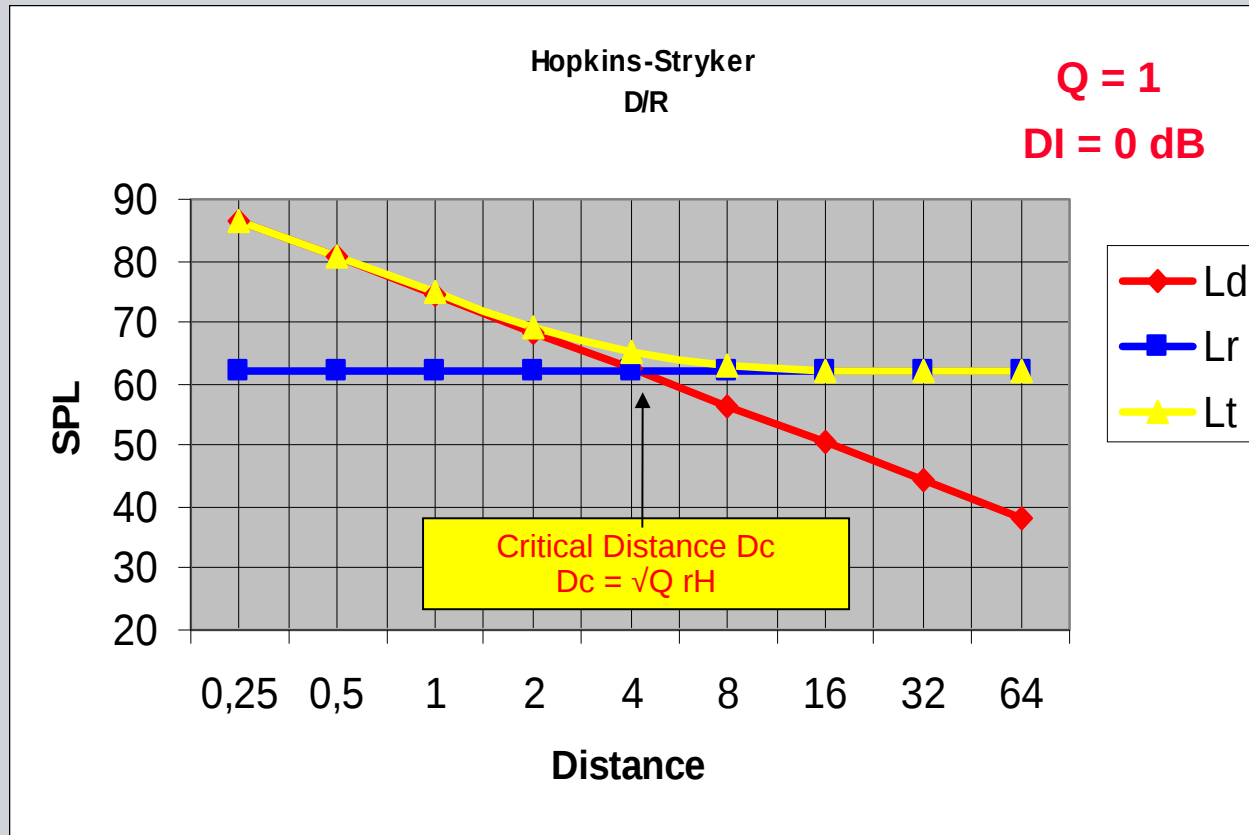
DI= 6dB

$$DI = 10 \log Q$$

Das Richtungsmaß ist der Logarithmus von Q in dB. Daher zeigt DI auch die Veränderung des Schalldruckpegels verglichen mit einer omni-direktionalen Punktquelle (Q = 1 und DI = 0 dB).

Unter der Annahme, dass die abgestrahlte Energie sich in allen drei Fällen nicht verändert, wird sich auch das Nachhallfeld nicht verändern. Aber der direkte Schall L_d wird sich mit ansteigendem DI in Abstrahlrichtung verstärken (z.B. 3 dB bei Q = 2). Dieses Verhalten kann genutzt werden, um den L_d/L_r oder D/R Abstand zu vergrößern und damit auch die Verständlichkeit.

Schallfeld $L_t = L_d + L_r$, Hallradius rH



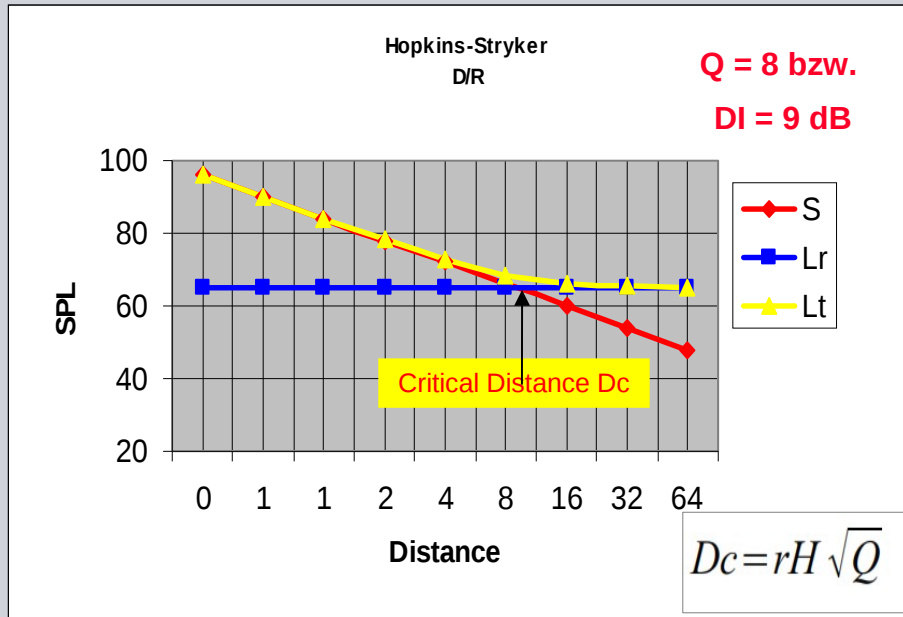
Die Graphik zeigt den direkten Schalldruckpegel L_d und das Nachhallfeld L_r für ein Raumvolumen (5.000m^3) und einem RT_{60} von ca. 1,8 s bei einer omni-direktionalen Punktquelle (bei $Q = 1$, $DI = 0 \text{ dB}$ ist D_c auch gleich dem Hallradius rH). Der Graph zeigt auch den gesamten Schallpegel L_t als die Summe von L_d und L_r .

Was wird passieren, wenn wir eine Quelle mit höherer Bündelung/Richtwirkung wählen?

$$rH = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{RT_{60}}}$$

$$D_c = rH \sqrt{Q}$$

Schallfeld $L_t = L_d + L_r$, der Effekt des Richtfaktors



Tipp: gebrauchte Quellen mit einem vernünftigen Richtfaktor Q und versuche das zu beschallende Gebiet exakt zu treffen. Dies ergibt das beste Resultat bzgl. der Verständlichkeit.

Jede Beschallungsenergie, die nicht zur direkten Abdeckung in einen Raum gegeben wird, füllt ihn mit Nachhallenergie, die schlussendlich die Verständlichkeit mindert.

Die Graphik zeigt die gleiche Situation wie bei der Vorhergehenden, nur jetzt wird eine Quelle mit höherem Richtfaktor verwendet ($Q = 8$, $DI = 9$ dB).

Betrachten Sie den erhöhten direkten Schalldruck L_d wogegen der Nachhall L_r gleich bleibt.

Das Verhältnis L_d zu L_r oder D/R hat sich vergrößert und mit ihm die Sprachverständlichkeit. Diese Verbesserung ist aber nur in Abstrahlrichtung wirksam.

Des Weiteren hat sich die kritische Entfernung (Hallradius) um den Faktor \sqrt{Q} vergrößert. Dies kann als Indikator für größere Durchdringung des Nachhallfeldes mit Direktschall betrachtet werden.

Die Kontrolle des Direktschalls ist der Schlüssel für eine gute Beschallung!

Design Kriterien für die “Verständlichkeit”



S ↑

Das gesamte Signal L_t muss genügend laut sein, um die Störgeräusche zu übertönen

Signalstärke S und Störgeräusch N stehen weder in einer Beziehung zueinander noch sind sie von einander abhängig!

N ↓

oder man reduziert die Störgeräusche / Lärm

D ↑

Das gesamte Signal L_t muss genügend Direktschall haben, das heißt, ein ausreichendes L_d/L_r (oder D/R) Verhältnis vorweisen.

D und R stehen in direkter Abhängigkeit zueinander. D erzeugt R !!!!

R ↓

oder das Nachhallfeld bzw. der diffuse Schall muss reduziert werden