

1 Eigenschaften von Schall

1.1 Schalldruck und Pegel

Schall ist eine periodische Druckschwankung, verursacht z.B. durch Sprechen, die sich in einem elastischen Medium ausbreitet. Physikalisch ist Schall eine mechanische Schwingung, die dem Ohr durch die Luft übermittelt wird. Gemessen am statischen Luftdruck von ca. 100.000 Pascal (=1 bar) ist der Wechseldruckanteil (=Schalldruck) äußerst gering, denn bereits bei 100 Pa ist die Schmerzgrenze des menschlichen Gehörs erreicht.

Das Hörempfinden basiert auf einer logarithmischen Skalierung des Schalldrucks. In diesem Zusammenhang wird die logarithmische Größe Dezibel (=dB) verwendet. Die Größe dB bezieht sich stets auf eine Referenzgröße und ist daher keine Einheit sondern lediglich ein Faktor. Für den Schalldruckpegel (=dB SPL¹) ist die Bezugsgröße $p_0 = 0.00002 Pa$, was in etwa der Hörschwelle entspricht. Abb 1.1 zeigt den Bereich des menschlichen Hörempfindens, welches sich von 20 Hz bis ungefähr 20kHz erstreckt.

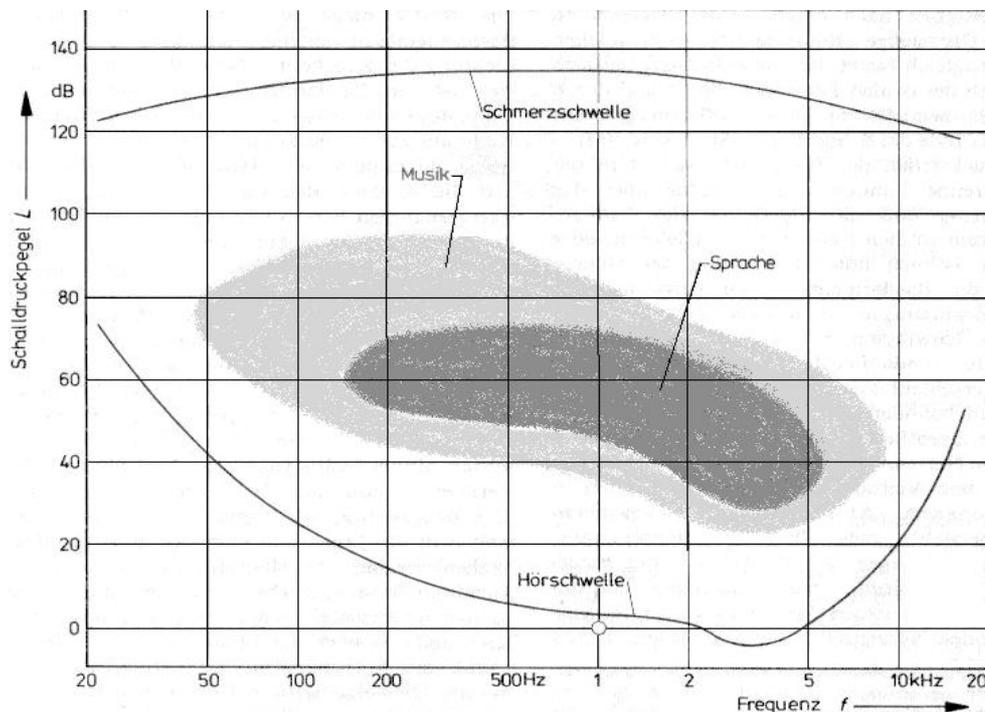


Abb. 1.1 Das menschliche Hörempfinden

Die Umrechnung von Schalldruck nach Schalldruckpegel erfolgt hier durch die Formel:

¹ SPL ist der kleinste wahrnehmbare Schalldruck

Gruppe 1
Ortungsbasierte Dienste und Systeme
Schall in der Luft

Golaleh Rahmatollahi 2033839
 Thimo Eichstädt 2033431

$$Pegel[db] = 20 * \log\left(\frac{Schalldruck}{p_0}\right)$$

1.2 Schallbrechung aufgrund von Temperaturunterschied

Die Brechung des Schalls erfolgt an der Grenzschicht unterschiedlicher Luftdruckgebiete, d.h. Beim Übergang der Schallwellen von kalter Luft zu warmer und umgekehrt. Der Grund hierfür liegt in der Veränderung der Schallgeschwindigkeit. Tabelle 1.1 zeigt die Geschwindigkeit abhängig von der Lufttemperatur.

Temp. °C	c [m/s]	1/c [ms/m]
-10	324	3.09
0	330	3.03
10	337	2.97
20	343	2.92
30	349	2.86
40	355	2.81

Tabelle 1.1 Schallgeschwindigkeit abhängig von Temperatur

Liegt eine wärmere Luftschicht über einer kälteren (Inversion), so wird der Schall zur Erde hin geleitet, es können sogenannte Überreichweiten des Schalles entstehen. Bei umgekehrter Schichtung (Normalfall) wird der Schall von der Erde weg nach oben gebeugt. Der Akustische Horizont liegt deshalb meist höher, als der optische.

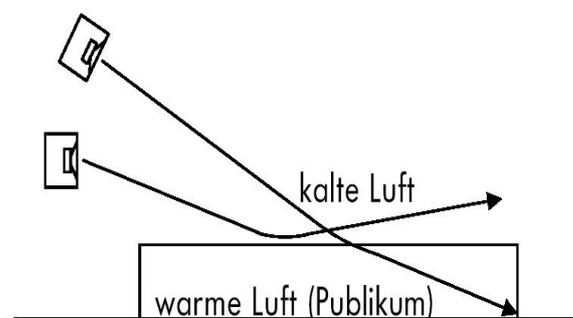


Abb. 1.2 Schallbrechung

Gruppe 1
Ortungsbasierte Dienste und Systeme
Schall in der Luft

Golaleh Rahmatollahi 2033839
Thimo Eichstädt 2033431

1.3 Schallbrechung aufgrund von Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit ist in Bodennähe gering und nimmt mit der Höhe zu. Ist die Wellenlänge ähnlich groß dem Objekt, so kommt es zu Beugungserscheinungen. Daher ändert sich auch die Schallgeschwindigkeit mit der Höhe über dem Boden. Der resultierende Brechungseffekt lenkt den Schall, der sich entgegen der Windrichtung bewegt, nach oben ab und begrenzt somit die Reichweite der Quelle. Analog werden Schallwellen nach unten gebogen, wenn sie sich mit der Windrichtung ausbreiten, hier vergrößert sich die Reichweite und es kommen trotz Hindernisse sogar Schallwellen beim Empfänger an.

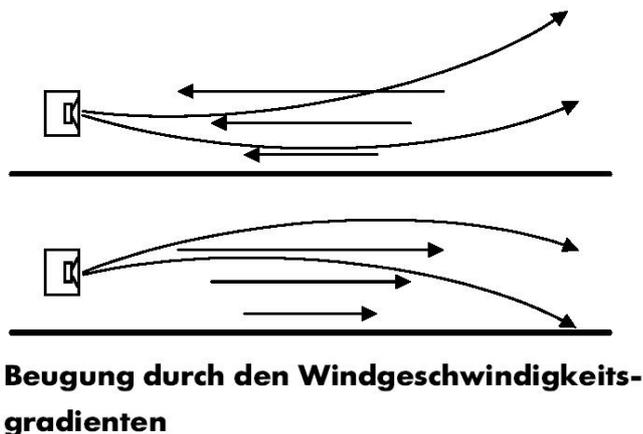


Abb 1.3 Schallbrechung durch Windgeschwindigkeit

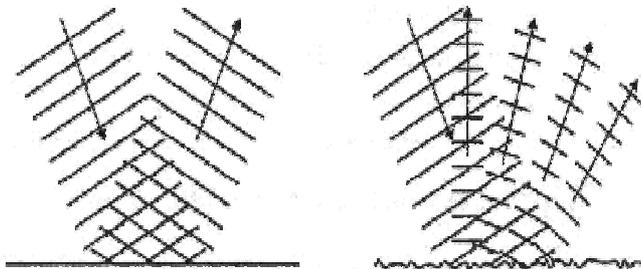
1.4 Schallreflexion und Absorption

Treffen Schallwellen auf eine Oberfläche auf, so treten abhängig von vom Verhältnis der Wellenlänge zur Oberflächengröße unterschiedliche Effekte auf. Ist die Wellenlänge verglichen zur Objektgröße klein, so kommt es zur Reflexion an der Oberfläche. Dabei ist der Austrittswinkel gleich dem Eintrittswinkel (=Reflexionsgesetz). Analog zu Licht, werden an glatten Oberflächen die Schallwellen gespiegelt reflektiert. Anders als bei rauen Oberflächeneigenschaften, denn dort tritt diffuse Reflexion auf, d.h die Schallwellen werden in alle Richtungen reflektiert (s. Abb. 1.4).

Abb. 1.4 gerichtete und diffuse Reflexion

Gruppe 1
Ortungsbasierte Dienste und Systeme
Schall in der Luft

Golaleh Rahmatollahi 2033839
 Thimo Eichstädt 2033431



die Umwandlung von Schallenergie in Wärme durch Unter Absorption oder auch Schalldämpfung versteht man den Effekt, dass Schallwellen von weichen oder porösen Körper ganz oder teilweise „geschluckt“ werden, d.h dass eine Umwandlung der Schallenergie in Wärme erfolgt. Der Absorptionsgrad ist abhängig von der Frequenz und gibt an welche Anteile vom Objekt absorbiert werden. Ähnlich wie bei der Beugung ist die Größe des Körpers entscheidend, denn kleine Objekte sind nicht in der Lage, tiefe Frequenzen zu absorbieren. Allgemein ist bekannt, je höherfrequenter die Welle, desto größer seine Dämpfung.

Bei homogenen Absorbern bestimmt die innere Reibung (Deformation des Materials), bei porösen Objekten die äußere Reibung (Reibung der schwingenden Partikeln des Ausbreitungsmediums und den Skelettelementen des porösen Körpers) die Umwandlung von Schallenergie in Wärme.

Ein Beispiel für den Absorptionsgrad abhängig vom Material zeigt folgende Tabelle.

Oberfläche	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Beton	1	1	1	1.5	2	2
Holzboden	15	11	10	7	6	7
Holzverkleidung mit Unterkonstruktion	30	25	20	17	15	10
50 mm Absorberplatte Schaumstoff	15	27	63	91	100	100
50 mm Absorberplatte Glaswolle	26	60	95	100	100	100

Tabelle 1.2 verschiedene Absorptionsgrade

Dämpfung der Schallwellen tritt aber natürlich auch über große Distanzen auf. Abhängig von der Frequenz verliert der Schall an Energie.

Gruppe 1
Ortungsbasierte Dienste und Systeme
Schall in der Luft

Golaleh Rahmatollahi 2033839
 Thimo Eichstädt 2033431

Entfernung	Pegel relativ zu 1 m in dB
2 m	-6
3 m	-10
5 m	-14
10 m	-20
20 m	-26
30 m	-30
50 m	-34

Tabelle 1.3 Pegel in Abhängigkeit von Entfernung

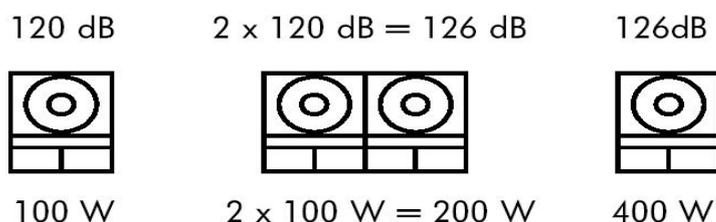
2 Überlagerung von Schallwellen

2.1 Kohärente Signale

Abhängig von der Wellenlänge und der Entfernung der Schallquellen und der Hörposition treten hierbei unterschiedliche Effekte auf.

Zwei Schallquellen strahlen dasselbe Signal mit der selben Phase und Amplitude ab. Ist die die Entfernung und Abmessung der Quellen deutlich kleiner als die Wellenlänge, so ergibt sich in allen Abstrahlrichtungen ein Pegelgewinn von +6db, beispielsweise wenn 2 Subwoofer nebeneinander oder aufeinander stehen. Hierbei verdoppelt sich der Wirkungsgrad der Subwoofer.

Die Summation der Pegel erfolgt gemäß der dB-Tabelle, d.h bei 3 Subwoofer hat man eine Gewinn von +10db.



Bei kohärenter Abstrahlung zweier Subwoofer verdoppelt sich deren Wirkungsgrad

Abb. 1.5 Verdoppelung des Schallpegels durch Subwooferanordnung

Gruppe 1
Ortungsbasierte Dienste und Systeme
Schall in der Luft

Golaleh Rahmatollahi 2033839
Thimo Eichstädt 2033431

Bei großen Anordnungen erfolgt zudem eine Richtungswirkung, da die Systeme nur senkrecht zu ihrer Anordnung ein phasengleiches Signal liefern. Um die Frequenz zu ermitteln ab der noch eine verwertbare Richtwirkung zu erwarten ist, lässt sich anhand der einfachen Formel errechnen.

$$f = \frac{250}{(\text{Zeilenlänge} [m])}$$

Stellt man die Anordnung auf einen schallharten Boden, so verdoppelt sich die effektive Zeilenlänge durch die Spiegelquellen.

Wenn der Durchmesser der Schallquelle um mehr als das Dreifache größer ist als die Wellenlänge des Schalls, entsteht durch Interferenzen eine mit steigender Frequenz zunehmende Richtwirkung des Schalls. Daraus folgt also, daß der Schall sich durch Interferenzen nach Vorne verstärkt und sich zu den Seiten hin abschwächt.

Ein Beispiel aus der Natur, Fledermäuse: Da bei allen Fledermäusen, die ihre Ortungslaute durch das Maul aussenden, dieses Verhältnis zwischen Mauldurchmesser und Frequenz des Ortungslautes gegeben ist, entsteht also eine gerichtete Schallkeule, durch die sie Ihre Opfer orten können.

2.2 Gegenphasige Signale

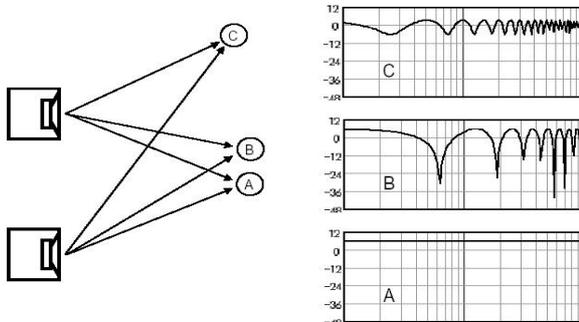
Zwei Schallquellen, die das selbe Signal nur mit entgegengesetzter Phaselage (180° Phasendifferenz) produzieren, löschen sich bei exaktem Pegel vollständig aus (destruktive Interferenz).

Kammfiltereffekt:

Der Kammfiltereffekt tritt dann auf, wenn ein Punkt von zwei Quellen mit unterschiedlicher Entfernung, die das gleiche Signal erzeugen, beschallt wird. Alle Frequenzen für die, die Laufstreckendifferenz ein vielfaches der Wellenlänge ist, addiert sich der Schalldruck, d.h es findet eine konstruktive Interferenz statt. Frequenzen dazwischen jedoch werden mehr oder weniger vollständig ausgelöscht.

Gruppe 1
Ortungsbasierte Dienste und Systeme
Schall in der Luft

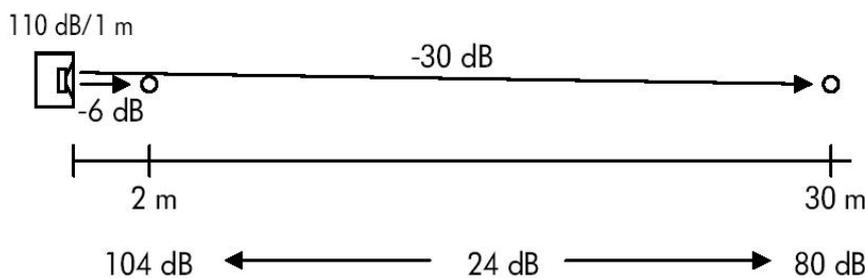
Golaleh Rahmatollahi 2033839
 Thimo Eichstädt 2033431



Frequenzgang bei der Überlagerung zweier Signale mit unterschiedlicher Laufzeit (Kammfiltereffekt)

Dabei bedeutet „2 Quellen“ jedoch nicht, daß dies zwei unterschiedliche Quellen sein müssen. Der Kammfiltereffekt tritt nämlich ebenfalls bei der Interferenz zwischen Direktschall (direkt aus dem Lautsprecher kommend) und der Reflexion des Schalls an einer Wand o.ä. auf. Die zeitliche Auflösung unseres Gehörs bezüglich der Differenzierung zwischen Direktschall und Reflexion beträgt etwa 4ms, d.h. Reflexionen innerhalb dieses Zeitraums werden dem Direktschall zugeordnet. Sind Reflexionen um 40ms oder mehr verzögert, nehmen wir sie bei ausreichendem Pegel nicht als Indirektschall, sondern als Echo wahr. Interchannel-Laufzeiten (das sind Laufzeitdifferenzen, die zwischen beiden Sterokanälen auftreten) können vom Gehör übrigens weit feiner aufgelöst werden, bis hin zu etwa 40 Mikrosekunden oder sogar darunter. Um Reflexionen zu und damit den „Echo“ Effekt zu verhindern, sollten die Reflexionen um mindestens 10dB bis 20dB mit geeigneten Mitteln gedämpft werden.

2.3 Pegelverteilung anhand eines Beispiels



Entfernungsbedingter Pegelabfall über der Hörerfläche

Abb. 1.6 Pegelabfall über der Hörerfläche

Mit der Entfernung nimmt unabhängig von den Lautsprechern ein Pegelabfall gemäß der Tabelle

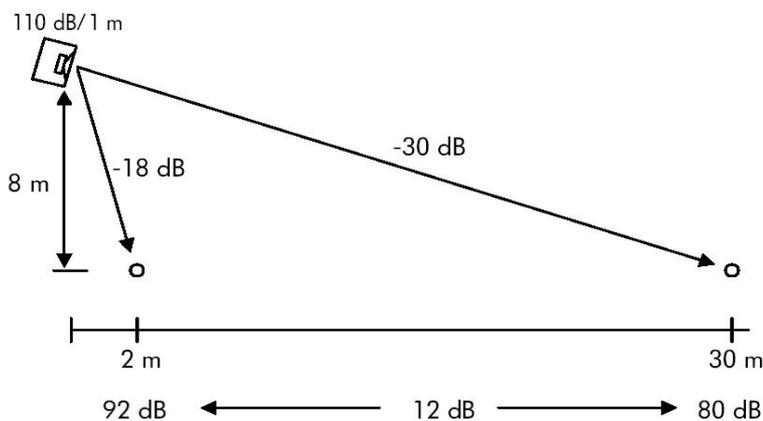
Gruppe 1
Ortungsbasierte Dienste und Systeme
Schall in der Luft

Golaleh Rahmatollahi 2033839
Thimo Eichstädt 2033431

1.3 statt.

Gegeben ist eine 30m lange Hörerfläche, in 2m Abstand vom System befinden sich die ersten Zuhörer, hinten erreicht die Pegeldifferenz schon 24 db, d.h eigentlich nicht mehr akzeptabel für die Zuhörer.

Lösung für das Problem, bietet eine Erhöhung des Lautsprechersystems.
Hierdurch kann der Entfernungunterschied reduziert werden, bei einer Höhe von 8m, halbiert sich bereits die Pegeldifferenz auf 12 db.



Verbesserte Pegelverteilung durch "Fliegen" des Lautsprechers

Abb. 1.7 Verbesserung des Pegelabfalls durch Erhöhung

Quellen:

<http://kunstbank.waidhofen.at/mitglied/junker/publikationen/skripten/raumakustik.htm>
www.virtuallyaudio.ch/publikationen/akustik_und_pa/grundlagen_beschallung1.pdf
<http://www.soundgalerie.de/stageaid/stages3.html>