

Teil II Schall und Psychoakustik

1. Schall.....	2
1.1. Physik der Töne	3
1.2. Messung von Schall	4
2. Psychoakustik	6
2.1. Das menschliche Gehör	6
2.2. Empfindung von Tönen	7
2.2.1. Tonhöhe.....	7
2.2.2. Lautstärke	7
2.2.3. Klangfarbe.....	8
2.2.4. Richtung und Entfernung.....	9
2.3. Raumakustik	11

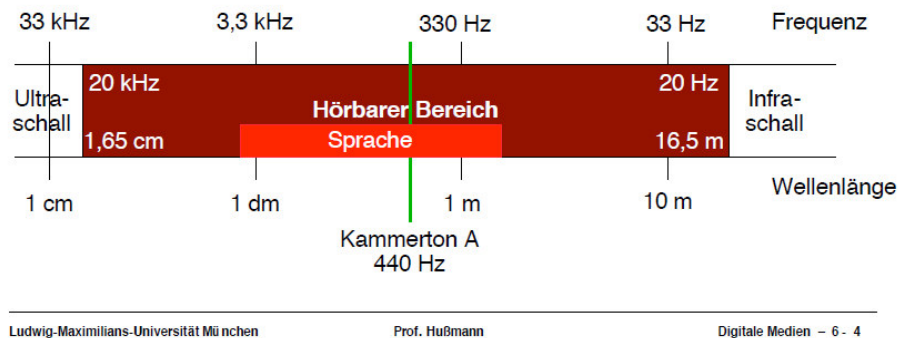
1. Schall

Akustik ist der Teilbereich der Physik, der sich mit dem Phänomen des Schalls (s.a. Schallwellen, Schallerzeugung, Schallausbreitung Schallmessung usw.) beschäftigt.

Sprache breitet sich mit Hilfe von Schallwellen aus. Ob jemand die Sprache bewusst aufnimmt, hängt vom Zuhörer ab. Deshalb wird zwischen dem **objektiven Schallereignis** und dem **subjektiven Hörereignis** unterschieden. Das Schallereignis ist ein messbarer, physikalischer Vorgang. Das Hörereignis – auch Psychoakustik genannt – beschreibt, was der Wahrnehmungsvorgang daraus macht.

Klänge, Ohren, Sinneszellen: [Superohren](#) (Dokumentation, 14 Min.)

Audio (lat. audire- hören) bezeichnet den menschlichen Hörbereich. Er umfasst grundsätzlich alle Geräusche, Sprache und Musik und kennzeichnet ungefähr den Bereich von 20 Hz bis 20 kHz (Hertz ist die Einheit der Frequenz und gibt die Schwingungsanzahl je Sekunde wieder). Von Menschen werden sehr tiefe und sehr hohe Frequenzen schlechter wahrgenommen. Wenn man älter wird, sinkt die Obergrenze des Hörbereiches (d.h. man hört hohe Töne nicht mehr oder viel schlechter).

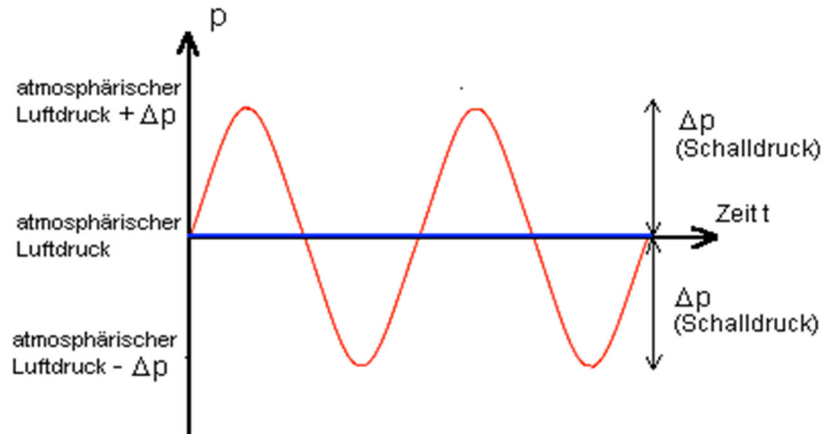


Die wichtigsten Begriffe:

1. Als **Schall** bezeichnet man die sich wellenartig ausbreitende räumliche und zeitliche Druckänderung eines elastischen Mediums; entsteht also für das Ohr hörbar durch Luftdruckschwankungen; *Infraschall*: unterhalb des Hörbereiches (unter 20 Hz); *Ultraschall*: über dem Hörbereich (über 20kHz)
2. **Akustik**: die Lehre vom Schall und seiner Ausbreitung (d.h. es muss immer ein elastisches Medium wie z.B. Luft oder Wasser oder ein Festkörper vorhanden sein; im Vakuum gibt es keinen Schall)
3. **Ton**: periodische, harmonische Sinusschwingung (z.B. Schwingung durch Vibration einer Gitarrensaite)

1.1. Physik der Töne

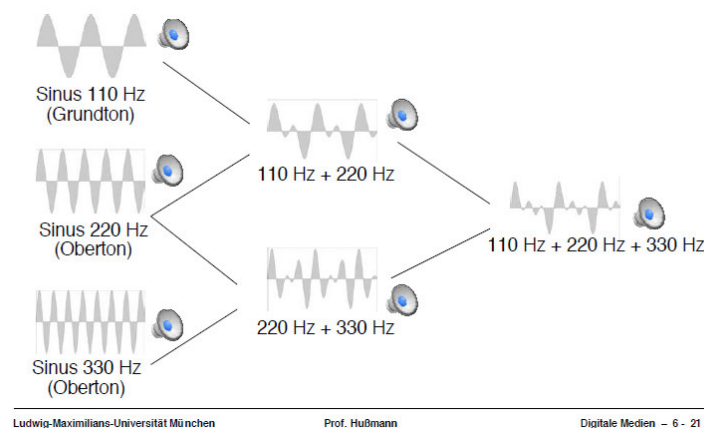
Für den Physiker ist das kleinste Element des Schalls der Ton. Er wird von einer sinusförmigen Druckschwankung der Luft an einem festen Ort, z.B. Trommelfell, Mikrofonmembran, beschrieben. Ein Ton wird bestimmt durch seine **Frequenz** (Tonhöhe) und eine **Amplitude** (Lautstärke).



Ein doppelt so hoher Ton hätte in diesem Beispiel eine doppelt so hohe Anzahl an Schwingungen innerhalb der gleichen Zeit (x-Achse). Ein Ton von 50 Hz hat 50 Schwingungen in der Sekunde, ein Ton mit 100 Hz hat 100 Schwingungen in der Sekunde usw. Ein leiserer Ton ist in der Amplitude (y-Achse) niedriger.

Töne sind reine Sinusschwingungen, die unnatürlich und ungewohnt klingen.

Ein **Klang** entsteht durch Überlagerung eines Grundtones mit weiteren sinusförmigen Schwingungen. Sind die Frequenzen dieser Obertöne ganzzahlige Vielfache, z.B. $2f$, $3f$, $4f$, ..., der Frequenz des Grundtones, so spricht man von einem **harmonischen Klang** (siehe nachfolgende Abbildung). Der Grundton ist der größte gemeinsame Teiler aller am Signal beteiligten Frequenzen. Er entspricht oft der tiefsten enthaltenen Teilfrequenz.



Ein **Geräusch** entsteht durch Überlagerung nichtperiodischer Schalldruckschwankungen unterschiedlicher Frequenzen. Es ergibt sich ein Frequenzgemisch ohne erkennbare Ordnung.

1.2. Messung von Schall

Um den sehr großen Hörbereich abbilden zu können, verwendet man eine logarithmische Skala. Mit **Dezibel** (dB) wird die Schallintensität und damit die Lautstärke eines Tones oder Geräusches gemessen. Mit 0 dB ist die Hörschwelle festgelegt, die lautesten Geräusche erreichen ca. 130 dB (130 dB entsprechen der Schmerzgrenze, nachhaltige Schäden für das Ohr sind ab 85 dB möglich).

Eine gerade noch hörbare Lautstärkenänderung entspricht einer Änderung des Schallpegels um 1 dB. Kommt zu einer Schallquelle eine zweite mit gleicher Lautstärke hinzu, bedeutet das eine Erhöhung um 3 dB. Um ein Signal als **doppelt so laut** wahrzunehmen, muss sich der Schallpegel um **10 dB** erhöhen.

Der Schallpegel wird folgendermaßen berechnet:

$$\text{Schalldruckpegel [dB]} = 20 \log \left(\frac{\text{gemessener Schalldruck}}{\text{Bezugsschalldruck}} \right) \text{ dB}$$

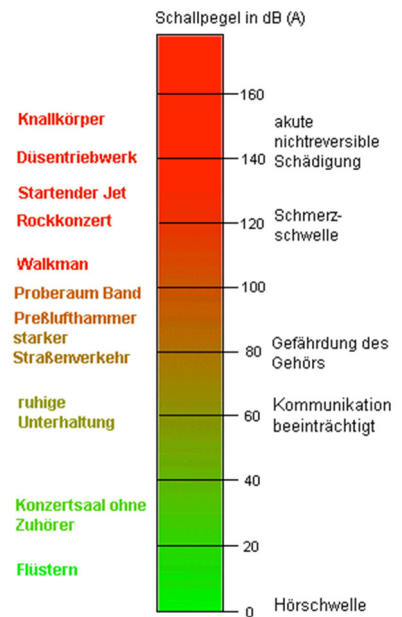
Hinweis: Ein **Pegel** bestimmt das *Verhältnis zweier Größen*. Der Bezugsschalldruck wird ist *für jedes Ausbreitungsmedium (Luft, Wasser, ...) festgelegt*.

Bsp.: Der Bezugswert für Luftschall wurde Anfang des 20. Jh. auf $p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ festgelegt. Dieser Schalldruck wurde für die Hörschwelle des menschlichen Gehörs bei der Frequenz 1 kHz gehalten.

Das Ergebnis wird mit der **Hilfsmaßeinheit Dezibel** gekennzeichnet.

Der Schalldruckpegel ist eine **technische und keine psychoakustische Größe**. Ein Rückschluss von Schalldruckpegel auf die wahrgenommene Empfindung ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Die Messung von Schalldrücken erfolgt mit **Mikrofonen**. Der messbare Pegelbereich beginnt nicht wesentlich unter 0 dB und endet bei einer Größenordnung von ca. 150 bis 160 dB.



Wiederholungsfragen zum Kapitel 1 Schall

1. Womit beschäftigt sich die Akustik?
2. In welchem Frequenzbereich liegt der menschliche Hörbereich?
3. Was ist Infraschall bzw. Ultraschall?
4. Wie sieht die Schallausbreitung im Vakuum aus?
5. Wodurch unterscheidet sich der Ton vom Klang?
6. Welche Werte eines Tons bestimmen dessen Tonhöhe bzw. dessen Lautstärke?
7. Wie wird ein Ton mit 100 Hz im Gegensatz zu einem Ton mit 200 Hz wahrgenommen?
8. Wodurch ist ein harmonischer Klang gekennzeichnet?
9. Was versteht man unter einem Geräusch?
10. In welcher Maßeinheit wird die Lautstärke eines Tons angegeben?
11. Was bedeutet ein Wert von 0 dB?
12. Wie wird ein Geräusch mit einem Pegel von 50 dB im Gegensatz zu einem Geräusch mit 60 dB wahrgenommen?

2. Psychoakustik

Die Psychoakustik versucht kausale Zusammenhänge zwischen den physikalischen Größen eines Schallsignals und den dadurch ausgelösten **Empfindungen** zu erfassen.

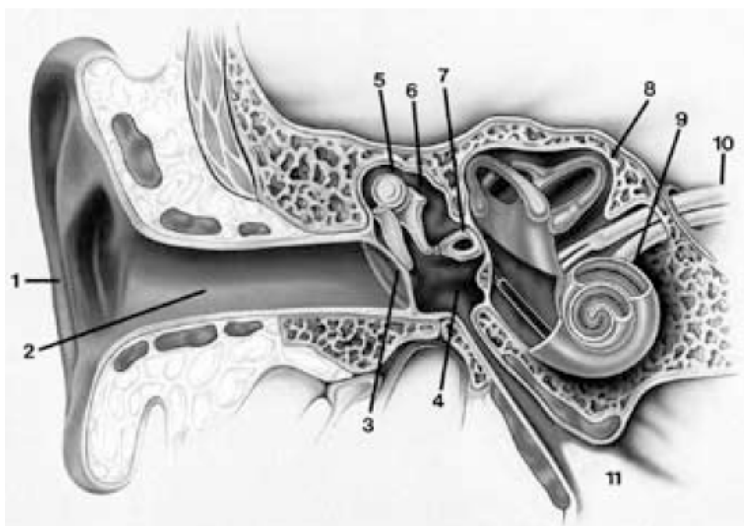
Mensch → wahrnehmbare Eigenschaft	Computer → physikalische Kenngröße
Tonhöhe	Grundfrequenz
Lautstärke	Amplitude
Klangfarbe	Frequenzspektrum („Frequenzgemisch“)

2.1. Das menschliche Gehör

Um akustische Signale wahrzunehmen, Schallquellen lokalisieren zu können und deren Entfernung zu erkennen, hat der Mensch **Ohren**. Das Ohr nimmt unterschiedliche Frequenzen **nichtlinear** wahr. Sehr tiefe Töne (z.B. 50 Hz) müssen einen viel höheren Schalldruck aufweisen als ein Signal von z.B. 4 kHz um als gleich laut wahrgenommen zu werden. Die Fähigkeit des Gehörs Tonhöhen zu unterscheiden, wird als **Frequenzauflösung** bezeichnet. Das menschliche Gehör kann ca. 620 Tonhöhen unterscheiden.

Das Ohr ist so beschaffen, dass es Menschen möglich ist, sich anhand von akustischen Signalen **im Raum zu orientieren** (Richtungshören bzw. Schallquellenlokalisierung). Es ist erkennbar, ob ein Signal von vorne oder von hinten kommt (durch das Abstreichen der Ohren) bzw. ob ein Signal von links oder rechts kommt (durch die zeitverzögerte Wahrnehmung eines der beiden Ohren).

Die **Schnecke** im Innenohr ist das Organ der Hörempfindung. Sie enthält härchenförmige Sinneszellen, die durch den Schalldruck verbogen werden. Diese Informationen werden an das Gehirn weitergeleitet. Das Gehirn übermittelt dabei die Lautstärke, die Tonhöhe und die Schallrichtung.

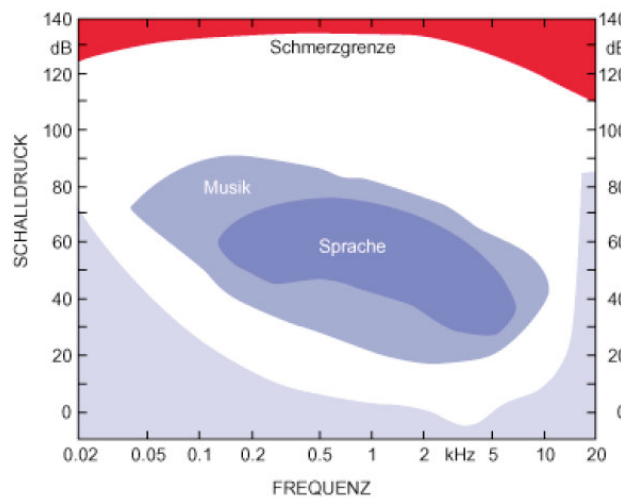


- 1 Ohrmuschel
- 2 Gehörgang
- 3 Trommelfell
- 4 Mittelohr
- 5 Hammer
- 6 Amboss
- 7 Steigbügel
- 8 Gleichgewichtsorgan
- 9 Schnecke
- 10 Hörnerven

Räumliches Hören wird also durch das Zusammenspiel von linkem und rechtem Ohr ermöglicht. Der **Stereo-Effekt** ergibt sich durch die zeitliche Verzögerung desselben Schallereignisses in seiner Wahrnehmung durch beide Ohren. Die Verzögerungsmessung liefert dabei die Information über die Entfernung der Quelle.

2.2. Empfindung von Tönen

Nachfolgend die Hörfläche (Zusammenhang Frequenzbereich und Schallpegelbereich) oder Hörbereich des Menschen.



2.2.1. Tonhöhe

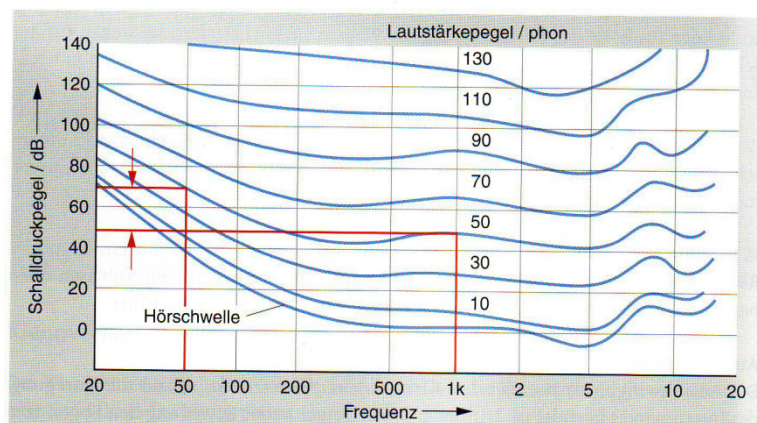
Die Empfindung der Tonhöhe eines musikalischen Tones wird durch die Frequenz seines Grundtones bestimmt. **Je höher seine Frequenz, desto höher wird der Ton empfunden.** Das Intervall einer **Oktave** beispielsweise besteht aus zwei Tönen deren Frequenzen im Verhältnis 1:2 stehen. Beispiel: 20 Hz zu 40 Hz; 500 Hz zu 1000 Hz; 8000 Hz zu 16000 Hz.

2.2.2. Lautstärke

Die Hörschwelle ist abhängig von der Frequenz. **Töne unterschiedlicher Frequenz mit demselben Schalldruckpegel werden als unterschiedlich laut empfunden.** Die subjektive Lautstärke wird in **Phon** gemessen. Die subjektive Lautstärke x Phon ist vergleichbar zu 1 kHz Ton bei Schalldruck x dB.

Wie groß der Schalldruckpegel eines Tones im Vergleich zu einem Ton von 1 kHz sein muss, um gleich laut empfunden zu werden, zeigen nachfolgende Kurven (entnommen aus Schellmann et al., medien. verstehen, gestalten, produzieren).

Beispiel: Ein Ton mit 1 kHz und Lautstärkenpegel von 50 Phon wird gleich laut empfunden, wie ein tiefer Ton mit der Frequenz von 50 Hz mit einem Schalldruckpegel von 70 dB. Der tiefe Ton (50 Hz) muss folglich einen um 20 dB höheren Schalldruckpegel als der hohe Ton (1 kHz) haben, um als gleich laut empfunden zu werden.

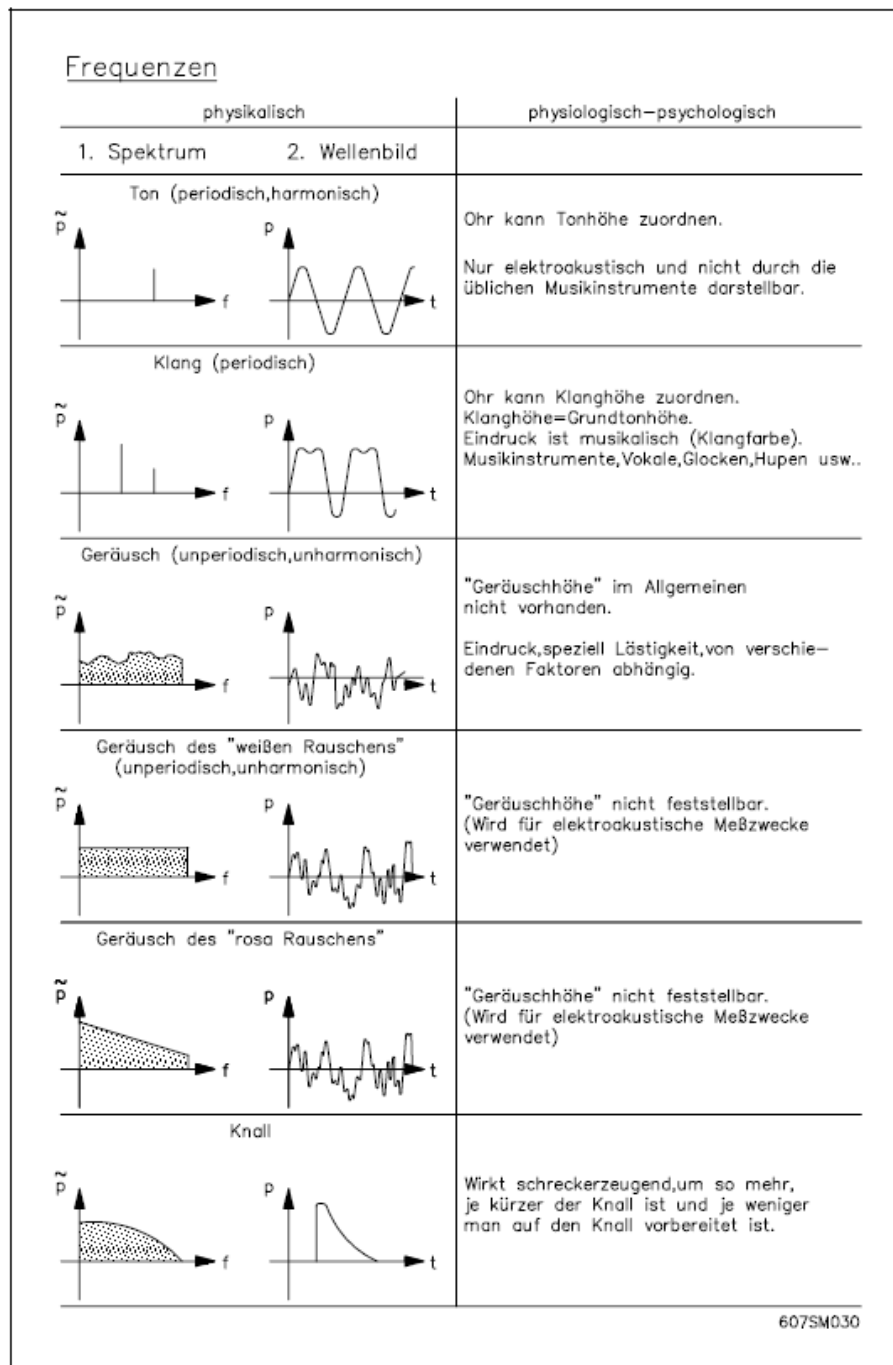


Das menschliche Gehör ist im Bereich mittlerer Frequenzen am empfindlichsten.

2.2.3. Klangfarbe

Die Klangfarbe ergibt sich durch die **Zusammensetzung der Amplituden der Teiltöne**, also des Grundtones und seiner Obertöne. Der **Grundton** ist der Ton mit der niedrigsten Frequenz im Klangspektrum. **Obertöne** sind weitere reine Töne (also Sinusschwingungen) höherer Frequenzen im Klang. Die Beziehung von Oberton zu Grundton heißt **harmonisch**, wenn deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis stehen → [Beispiel Obertonreihe 55 Hz](#) (vgl. auch oben und nachfolgende Abbildung entnommen aus *FESI-Documents*).

Grundlagen der Akustik. Technical report, European Federation of Associations of Insulation Contractors, 2001).



Reine Töne und Klänge können als **diskretes** Spektrum, d.h. als Spektrum mit einzelnen Linien dargestellt werden. Geräusche hingegen besitzen ein **kontinuierliches** Spektrum. Die Darstellung durch das Spektrum ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Beschreibung von Schallen, da jedes Schallereignis ein charakteristisches Spektrum besitzt.

2.2.4. Richtung und Entfernung

Richtung und Entfernung werden neben Tonhöhe, Klangfarbe und Dauer als Teil eines auditiven Ereignisses empfunden. Mithilfe von **Surround-Sound-Systemen** können Töne in Räumen besonders wirkungsvoll wiedergegeben werden. Sie arbeiten mit mehr als zwei Lautsprechern. Dadurch strömt ein Ton gezielt aus mehreren Richtungen im Raum auf einen Zuhörer ein.

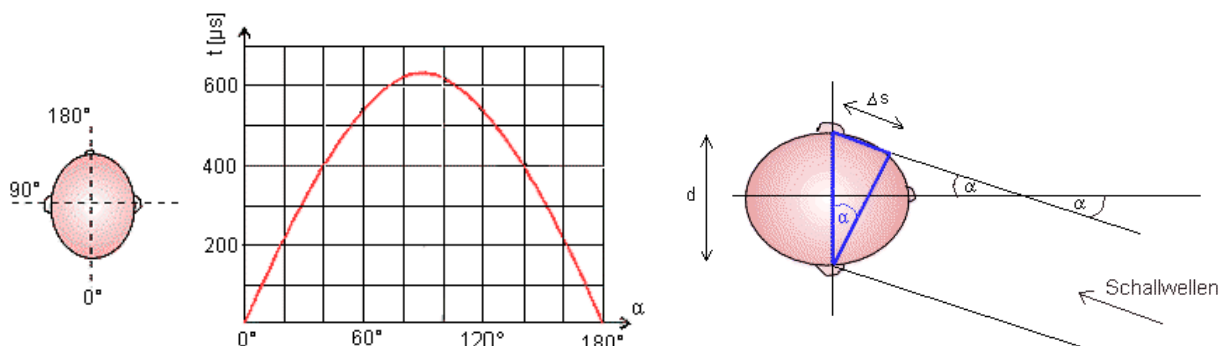
Richtung

Zur Beschreibung der Richtungswahrnehmung können zwei Ebenen betrachtet werden: Horizontalebene und Median- bzw. Vertikalebene.

Horizontalebene

Die Auswertung der **Unterschiede des Schalls zwischen linkem und rechtem Ohr** wird durch die horizontale Richtung bestimmt. Trifft Schall seitlich auf, so schattet der Kopf einen Teil des Schalls ab und er wirkt deshalb **auf einem Ohr leiser** als auf dem anderen. Dieser Effekt wirkt erst bei Frequenzen oberhalb von ca. 500 Hz (nimmt bei steigender Frequenz zu). Unterhalb von ca. 500 Hz wird der Schall um den Kopf gebeugt.

Die Richtung wird zudem aus der **Zeitdifferenz** der unterschiedlichen seitlichen Einfallsrichtungen des Schalls bestimmt. Der zum Ohr abgewandte Schall benötigt geringfügig mehr Zeit als der zum Ohr gewandte Schall.



Beide Abbildungen zeigen die **Abhängigkeit der Laufzeitdifferenz** (abhängig von Δs) **vom Schalleinfallswinkel α** .

$\alpha=0^\circ$... Einfallsrichtung aus der Mitte von vorne

$\alpha=90^\circ$... Einfallsrichtung von links, hier erreicht die Laufzeitdifferenz ihr Maximum

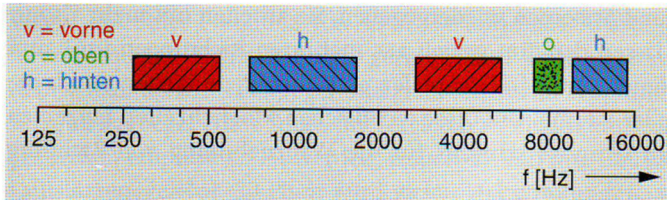
$\alpha=180^\circ$... Einfallsrichtung aus der Mitte von hinten

Berechnung der Laufzeitdifferenz zwischen zwei Ohren: Wegunterschied $\Delta s = d \cdot \sin(\alpha)$, wobei d gleich dem Abstand zwischen den Ohren ist. Daraus ergibt sich die Laufzeitdifferenz bei einer

Schallgeschwindigkeit $c_{\text{Luft}} = 343 \text{ m/s}$ mit $\Delta t = \frac{\Delta s}{c}$.

Vertikalebene

Der Schall, der auf beide Ohren trifft, wird als gleich empfunden. Als akustischer Filter wirken die Formen von Kopf und Ohrmuscheln abhängig von der Schalleinfallsrichtung. Bei unterschiedlichen Schalleinfallswinkeln auf der Vertikalebene werden entsprechende **richtungsbestimmende Frequenzbänder angehoben** und für die Richtungsempfindung ausgewertet (siehe nachfolgende Abbildung: Frequenzbänder für die Ortung des Schalls auf Vertikalebene entnommen aus Schellmann et al., medien. verstehen, gestalten, produzieren).



Beispiel: Hupt uns ein PKW von hinten an, so werden das Frequenzband von ca. 700-1,8 kHz (Auto) und das von ca. 10-15 kHz (Hupe) angehoben. Fliegt ein Flugzeug über uns, so wird das Frequenzband um ca. 8 kHz angehoben.

Entfernung

Die **Klangfarbe** als auch die **Lautstärke** eines akustischen Ereignisses ändern sich mit der Entfernung des Hörers zur Schallquelle. Die Erklärung dazu liefern Erkenntnisse aus der Wellenlehre.

In einem offenen Raum (= freies Schallfeld ohne Reflexion), z.B. Wiese, breitet sich tieffrequenter Schall (halb-) kugelförmig von der Schallquelle aus. Die abgegebene Energie verteilt sich auf den gesamten umliegenden Raum. Die Tiefen im Frequenzspektrum sind mit größer werdender Entfernung mit einem geringeren Pegel vertreten als die Höhen im Frequenzspektrum. Deshalb verändert sich die empfundene Lautstärke insgesamt.

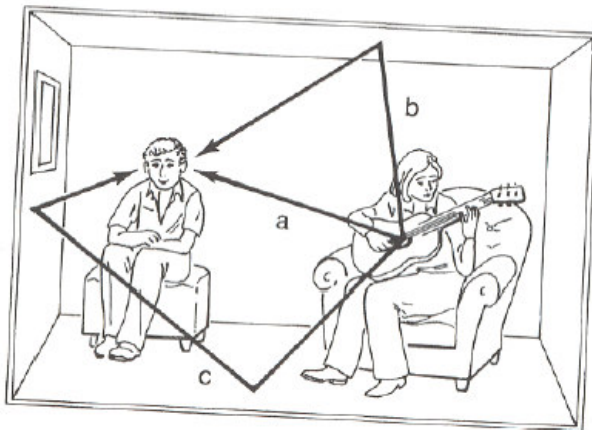
Daraus folgt: Die Entfernungsschätzung im freien Feld, also ohne Reflexionen und Echos, hängt in erster Linie **von der Lautstärkeempfindung** ab. Wenn es sich um einen bekannten Klang handelt, wird der Schalldruckpegel mit einem im Gedächtnis gespeicherten Wert verglichen und die Entfernung „berechnet“. Entfernungshören **beruht auf erlerntem Wissen**. Die Wahrnehmung ist maßgeblich von Erfahrungswerten beeinflusst. Zunehmend setzt sich aber auch die Erkenntnis durch, dass die zeitliche und räumliche Staffelung der ersten schallstarken Reflexionen wesentlichen Einfluss auf die auditive Entfernungswahrnehmung hat.

2.3. Raumakustik

Für den Fall, dass Schallereignisse in einem geschlossenen Raum stattfinden, nehmen wir nicht nur die direkte Schallquelle wahr, sondern auch das, was der Raum – durch Reflexionen – daraus macht. Dieser Effekt wird **Hall** genannt.

Hall hat ebenso wie direkter Schall charakteristische Klangeigenschaften. Faktoren sind beispielsweise Art der Oberflächen von Decke, Wänden oder Fußböden, Geometrie des Raumes, Materialien der Gegenstände im Raum oder wie die Gegenstände im Raum verteilt sind.

In diesem Fall trifft der Schall einer Schallquelle nach dessen Reflexionen an den Flächen des Raumes von allen Seiten beim Hörer ein. Die Richtung des Hörereignisses wird durch die erste beim Hörer eintreffende Wellenfront bestimmt. Die zweite Wellenfront muss allerdings mindestens um ca. 1 ms später eintreffen. Das wird als Gesetz der ersten Wellenfront (**Haas- oder Präzedenzeffekt**) bezeichnet. Beträgt die Zeitverzögerung der zweiten Wellenfront mehr als ca. 60 ms, wird sie als Echo wahrgenommen.



Direktschall (a) und indirekter Schall (b, c)

(a) erreicht den Hörer vor (b) und (c)

(a) ist entscheidend für die Lokalisierung der Schallquelle (Haas- oder Präzedenzeffekt)

Je weiter eine Schallquelle entfernt ist, desto größer ist der Anteil an indirektem Schall.

Je weiter entfernt der Schall ist, desto schwächer sind die höheren Frequenzen ausgeprägt (höhere Frequenzen werden durch Luft stärker absorbiert).

Geometrische Raumakustik

Die geometrische Raumakustik betrachtet die **Veränderung der Richtung** des Schalls.

Ein Raum klingt angenehm, wenn er homogen mit Schall durchmischt ist, d.h. wenn die Schallausbreitungsrichtungen der Reflexionen nicht parallel verlaufen und der Schall an Begrenzungsflächen gestreut wird.

Statistische Raumakustik

Die Grenze der geometrischen Raumakustik, also wenn keine Richtung des Schalls mehr erkennbar ist, wird durch die statistische Raumakustik kompensiert.

Durch sie kann die **Dauer des Nachhalls** eines Raumes bestimmt werden. Die Nachhallzeit ist definiert als die Zeit, in der der Schalldruckpegel nach Abschalten der Schallquelle um 60 dB sinkt. Die Nachhallzeit ist frequenzabhängig. Die Frequenz wird durch Materialien der Begrenzungsflächen, Gegenständen im Raum und dessen Geometrie bestimmt.

Wiederholungsfragen zum Kapitel 2 Psychoakustik

1. Womit beschäftigt sich die Psychoakustik?
2. Stelle die menschlichen Kenngrößen des Schalls den vom Computer verarbeiteten Kenngrößen gegenüber!
3. Erkläre den Hörvorgang!
4. Welche Bedeutung kommt der Schnecke im Rahmen des Hörvorgangs zu?
5. Erkläre die Raumorientierung durch das Gehör!
6. Wie werden Töne unterschiedlicher Frequenz bei gleichem Schalldruck empfunden?
7. In welchem Frequenzbereich ist das menschliche Ohr am empfindlichsten?
8. Wird ein Ton mit doppelter Amplitude als doppelt so laut wahrgenommen?
9. Wie bezeichnet man einen Klang, bei dem die Obertöne ein Vielfaches des Grundtons sind?
10. Kommen reine Töne in der Natur vor?
11. Was versteht man unter „Weißem Rauschen“?

Weißes Rauschen hat ein konstantes Leistungsspektrum (gleichbleibende Energie bei jeder Frequenz). Dieses Rauschen entspricht nicht dem logarithmischen Hörempfinden des Menschen. Weißes Rauschen wird als sehr höhenbetont empfunden, klingt wie ein Radio, bei dem kein Sender eingestellt ist. Subjektiv hat weißes Rauschen auf das Gehör eine leicht betäubende Wirkung, so dass es sich als Methode zur **Lärmbekämpfung** etabliert hat – Lärm wird als weniger laut und störend empfunden, wenn man ihm weißes Rauschen überlagert.

12. Warum heißt es „Rosa Rauschen“?

Der Name lässt sich erklären, wenn man die Analogie zum Licht zieht:

Weißes Rauschen entspricht weißem Licht (alle sichtbaren/hörbaren Frequenzen sind gleich stark vorhanden). **Rosa Rauschen entsteht, wenn man weißes Rauschen filtert (abschwächen um 3db/Oktave).** Wenn man weißes Licht filtert, indem man die hohen Frequenzen abschwächt, werden die niedrigen Frequenzen stärker. Licht mit geringer Frequenz ist ROT. Weißes Licht mit überhöhtem Rot-Anteil ist demnach Rosa (= Weiß + Rot).

13. Haben Geräusche ein kontinuierliches oder ein diskretes Frequenzspektrum?
14. Welches Frequenzspektrum haben Töne und Klänge?
15. Warum funktioniert die Richtungswahrnehmung im Horizontalbereich erst ab einem bestimmten Frequenzbereich?
16. Erkläre die Richtungswahrnehmung auf Horizontalebene!
17. Bei welchem Schalleinfallswinkel ist die Laufzeitdifferenz Δt maximal / minimal?
18. Erkläre die Richtungswahrnehmung auf Vertikalebene!
19. Erkläre die Entfernungswahrnehmung!
20. Was versteht man unter Hall?
21. Erkläre das Gesetz der ersten Wellenfront! Wie wird dieses noch bezeichnet?
22. Wann tritt Echo auf?
23. Was betrachtet die geometrische Raumakustik?
24. Wie ist die Nachhallzeit definiert?