



Beispielbild

WAHRNEHMUNG

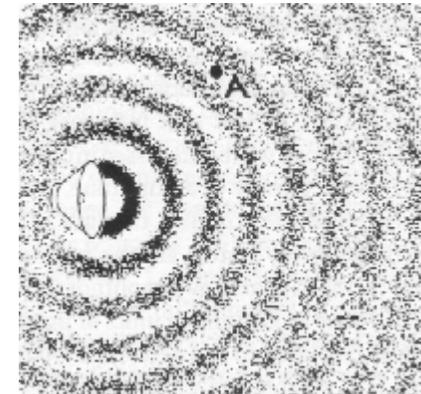
Auditive Wahrnehmung

WiSe 2008/09

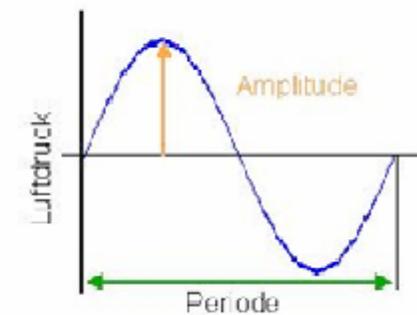
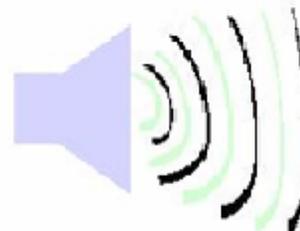
Was ist der adäquate Reiz?

Schallwellen :

Luftdruckschwankungen, die durch ein elastisches Medium (Luft, Wasser) übertragen werden. Hervorgerufen durch ein schwingendes Objekt. Laufgeschwindigkeit in der Luft liegt bei 340 Meter/Sekunde.



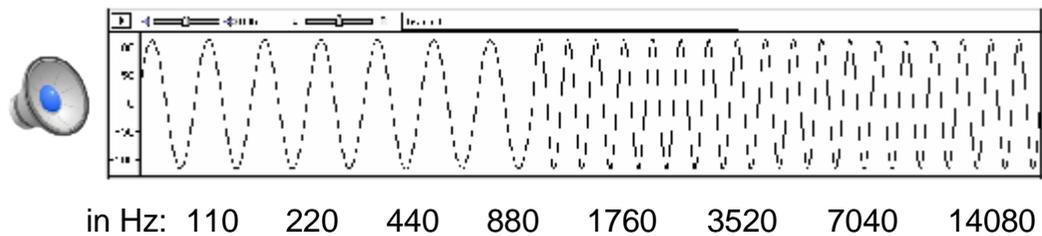
Definiert durch **Amplitude** (Größe der Druckschwankung) und **Periode** (Frequenz der Druckschwankung)



Physik des Hörens

Reine Töne

- Nur Sinusschwingungen
- Mathematisch und physikalisch am einfachsten.
- Frequenz (in Hertz [Hz]):
 - Perioden/s

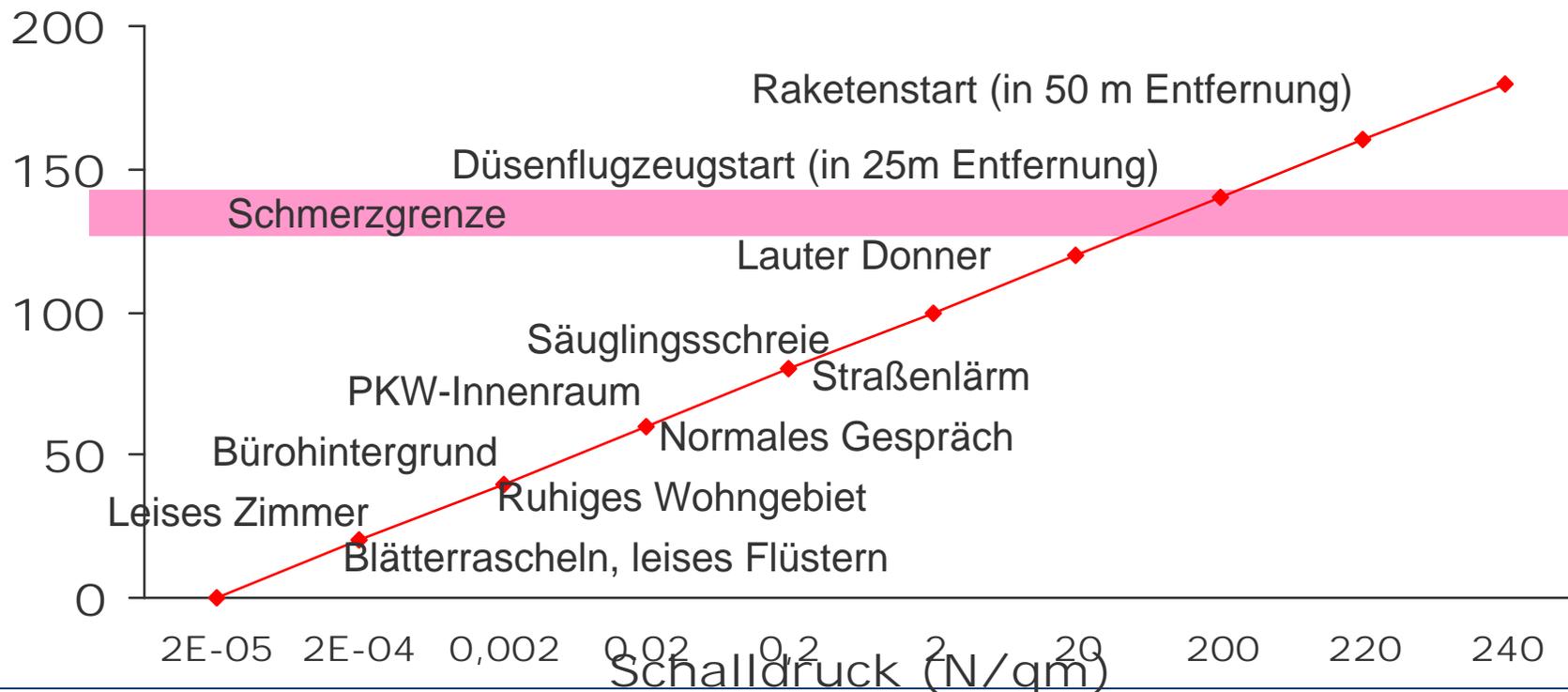


- Phase (bei mehr als 1 Ton)

Physik des Hörens

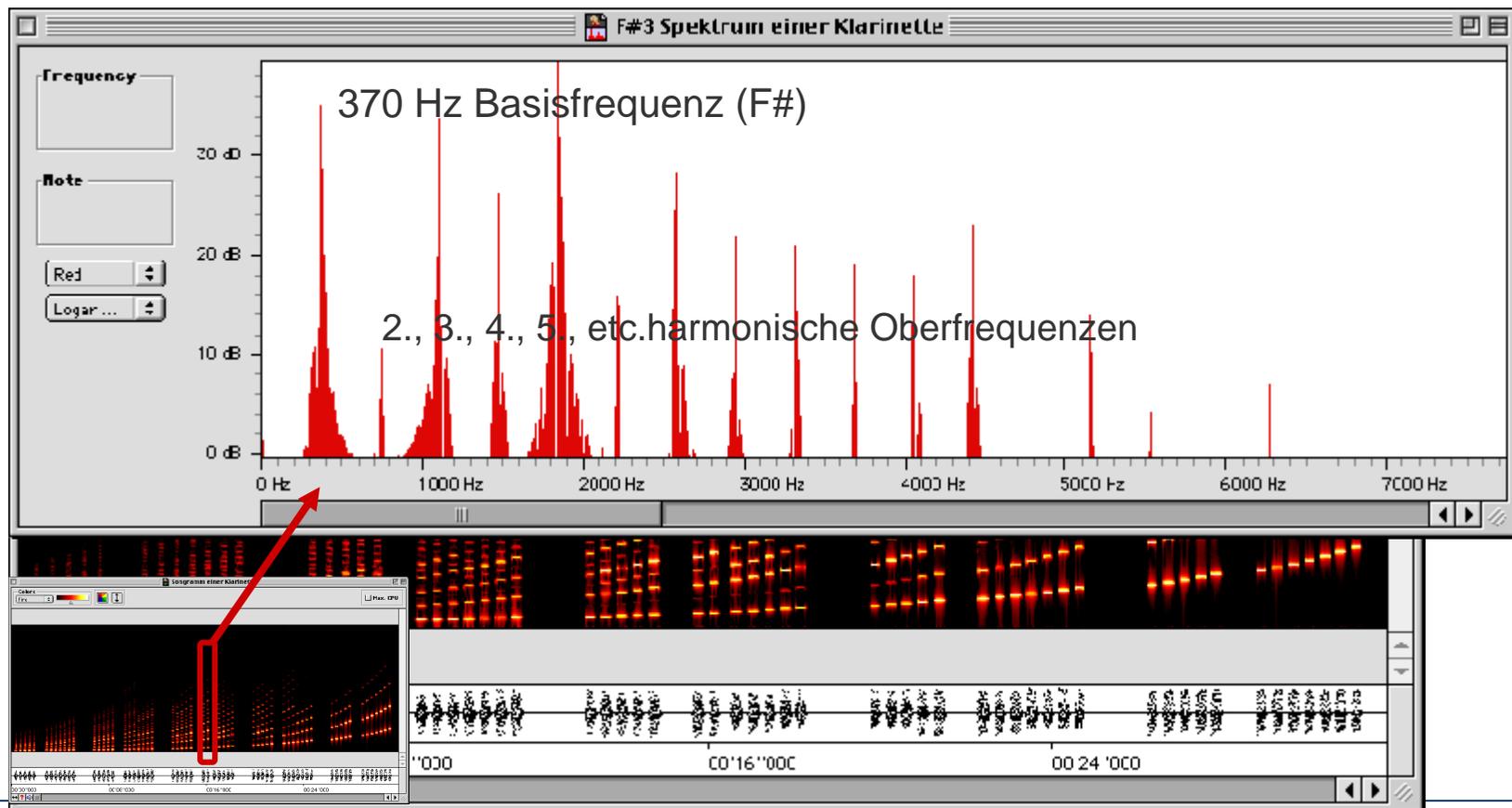
Reine Töne

Einheit des Schalldruckpegels : Dezibel (dB)
 $L = 20 \log (p/p_0)$
 mit p_0 =Bezugsschalldruck und p =Druck des Schallwelle

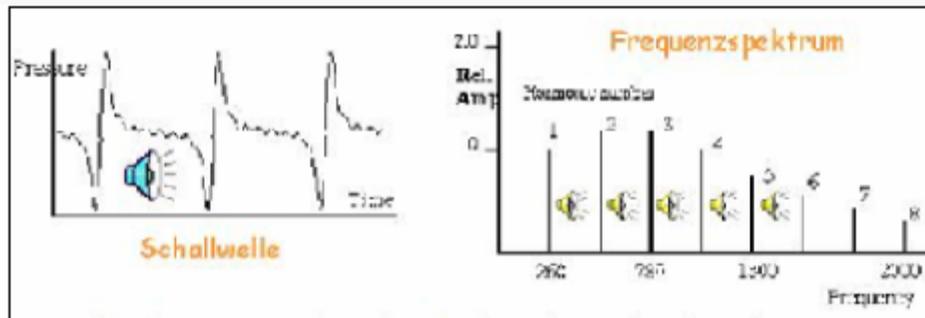


Physik des Hörens

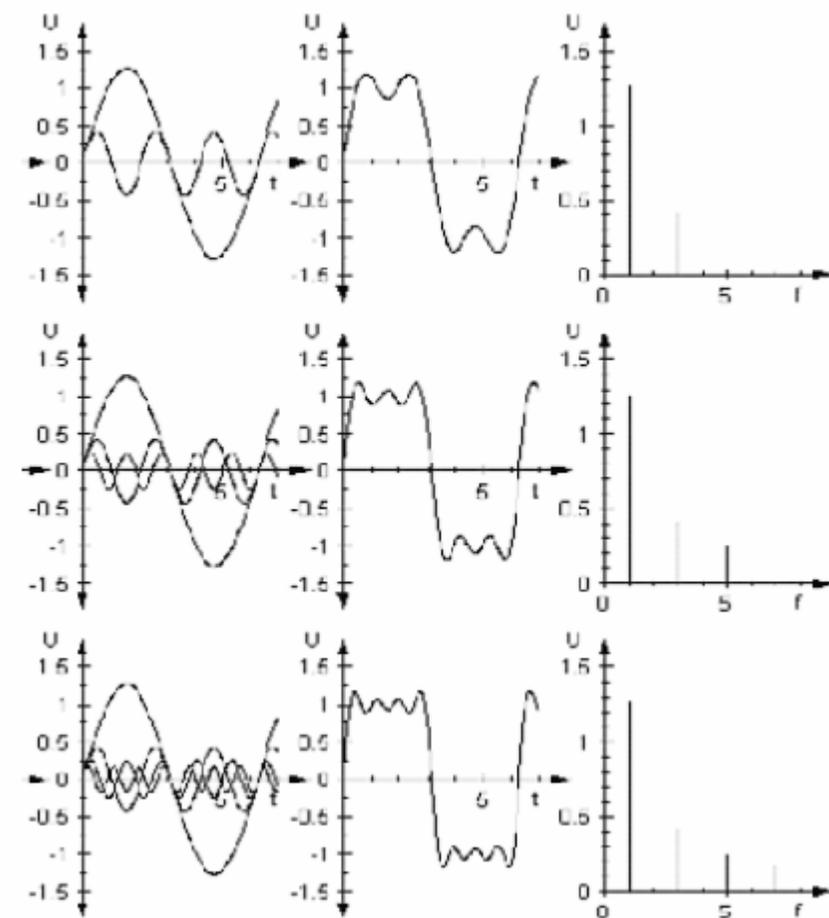
Komplexe Töne: Sonogramm und Spektrum



Physik des Hörens



Komponenten Originalwelle Spektrum



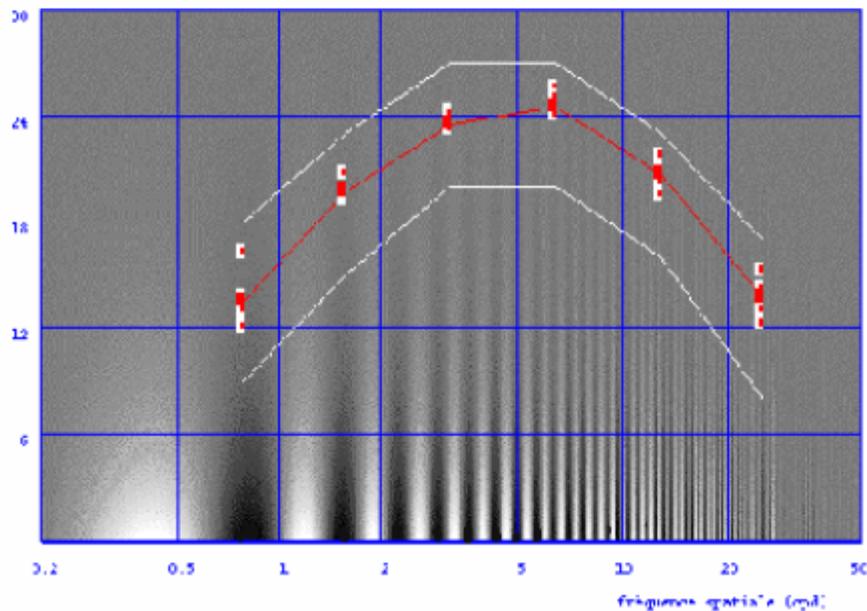
Fourieranalyse

Jede Welle – also auch jede Schallwelle – kann Summation verschiedener Sinuswellen angesehen werden.

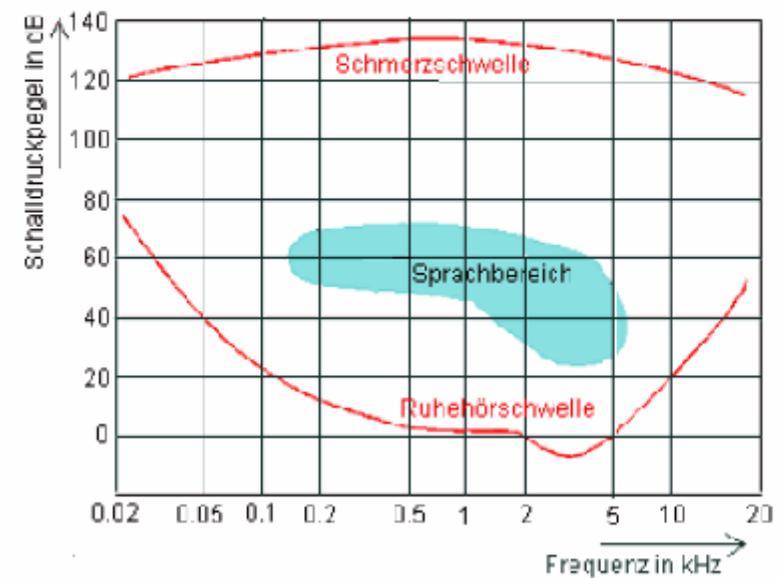
Das auditive System nimmt eine Fourieranalyse der wahrgenommenen Schallwellen vor.

Psychophysik des Hörens

Visuelles System: Kontrastsensitivitätsfunktion



Auditives System: Hörfläche



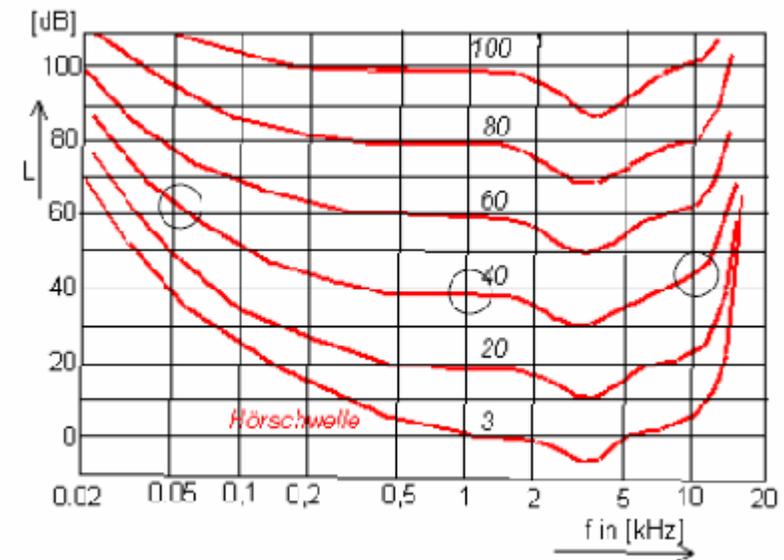
Psychophysik des Hörens

Maßeinheit für die subjektive Lautstärke : **Phon**

Ein Ton hat x Phon, wenn er als gleich laut wie ein Sinuston mit 1000 Hz und x dB wahrgenommen wird.

Isophone

Hörkurven gleicher Lautstärke, die für verschiedene Frequenzen und verschiedene Schalldruckpegel bestimmt werden. Sie zeigen, wieviel Druck ein Ton der Frequenz x haben muss um so laut wahrgenommen zu werden wie ein Vergleichston.



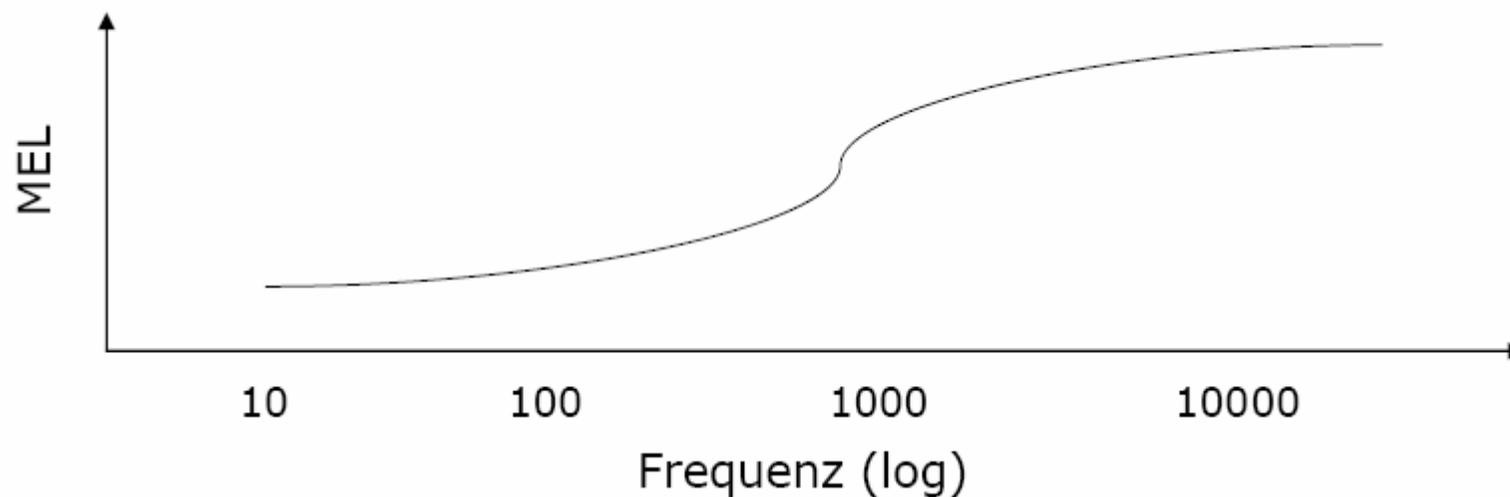
Psychophysik des Hörens

Maßeinheit für die subjektive Tonhöhe : Mel

Zusammenhang zwischen der Tonhöhe und der Frequenz

Ausgangspunkt für die psychophysischen Experimente:

1000 Hz Ton bei 40 dB entsprechen 1000 Mel.

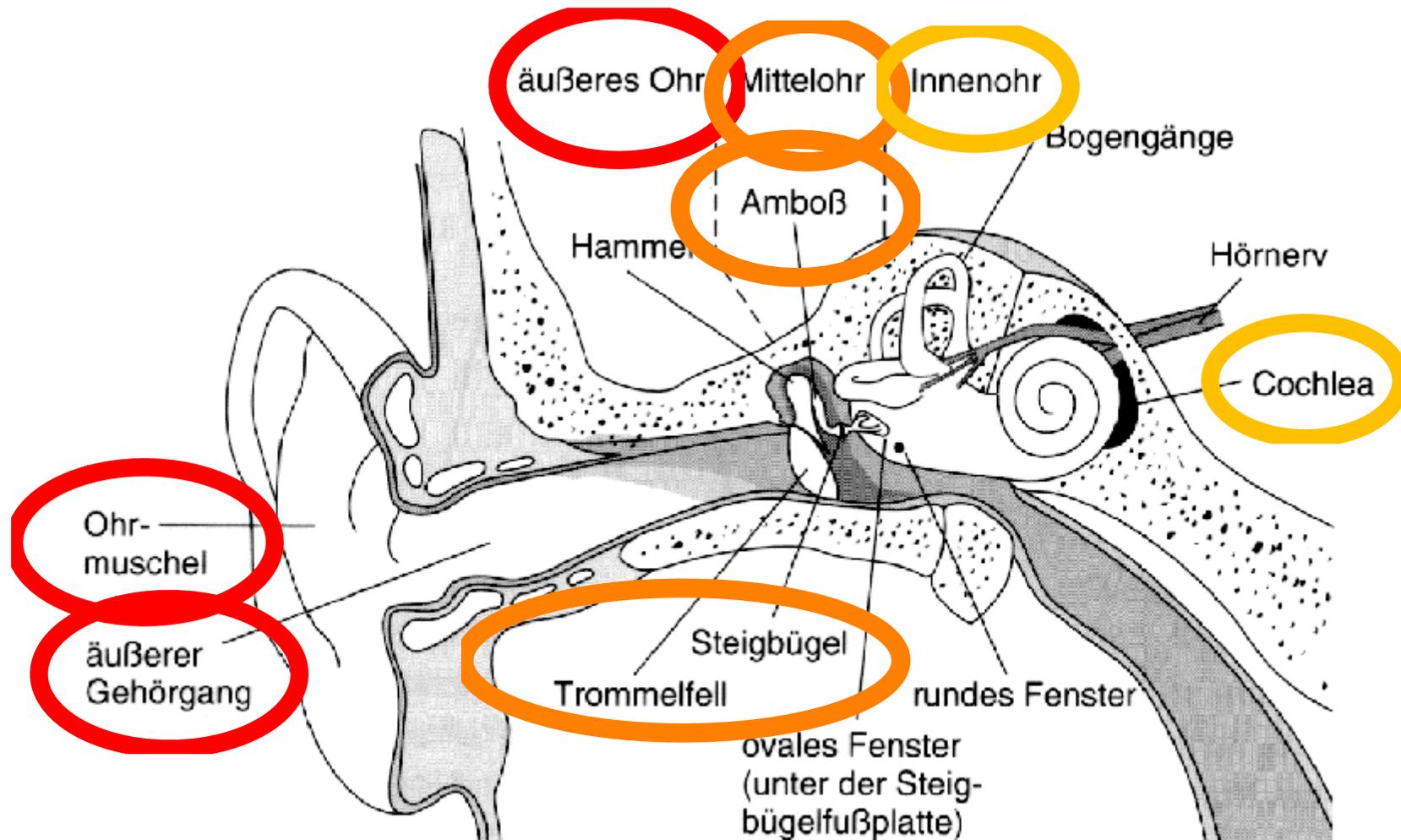


Sehr gute Diskriminationfähigkeit:

Unterschiedsschwelle bei Vergleichston < 500 Hz: 1.8 Hz.

Unterschiedsschwelle bei Vergleichston > 1 kHz: 0.35 Promille

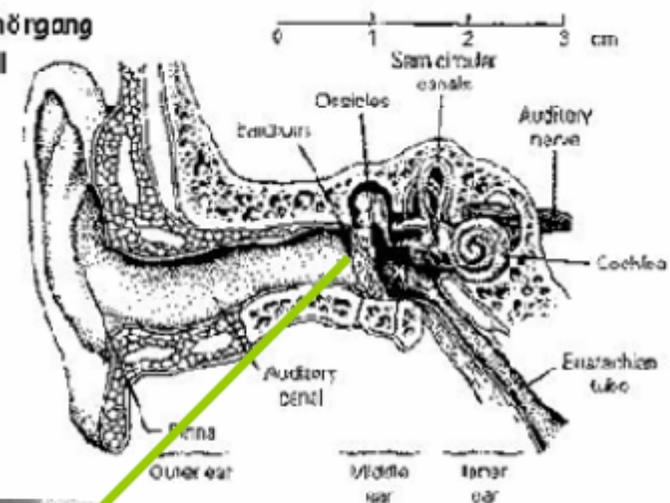
Anatomie



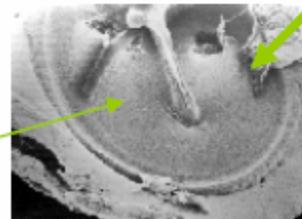
Funktionen des äußeren Ohrs

**Äußerer Gehörgang:
Schirmt empfindliches Mittelohr ab
Verstärkung bestimmter
Frequenzen (2-4 kHz) aufgrund
des Resonanzprinzips**

- ◆ **Äußeres Ohr**
 - Ohrmuschel
 - Äußerer Gehörgang
 - Trommelfell
- ◆ **Mittelohr**
- ◆ **Inneres Ohr**



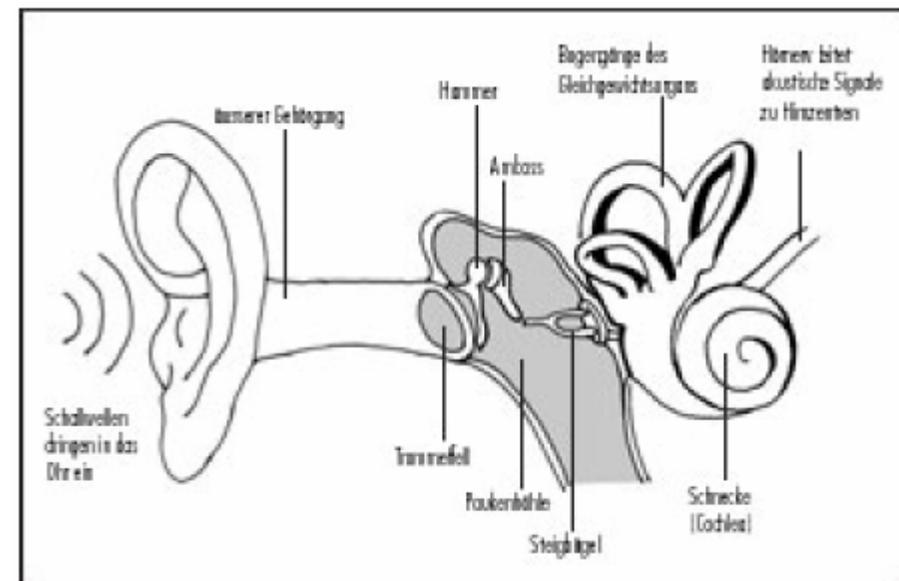
**Trommelfell: Mechanische
Übertragung der Schallwellen an die
Mittelohrstrukturen**



Funktionen des Mittelohrs

Hammer wird von den Vibrationen des Trommelfells in Schwingung versetzt. Gibt die Schwingungen an *Amboss* weiter, der den *Steigbügel* aktiviert.

Warum diese komplizierte Mechanik?
Löst das Problem, das Schalldruck von der Luft auf die cochleare Flüssigkeit übertragen wird.

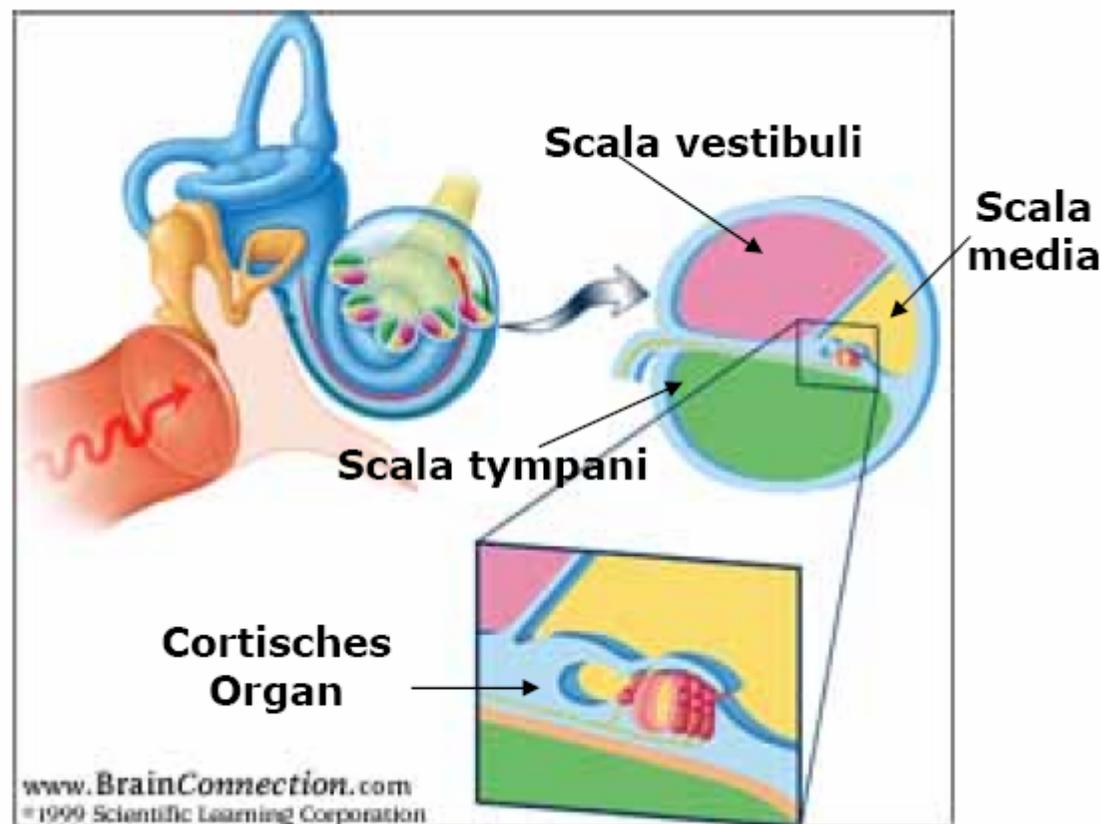


Prinzipien:

1. Druckfläche verringert sich
2. Hebelgesetze werden angewendet

Konsequenz:
Schalldruck wird um den Faktor 20 angehoben!

Funktionen des Innenohrs



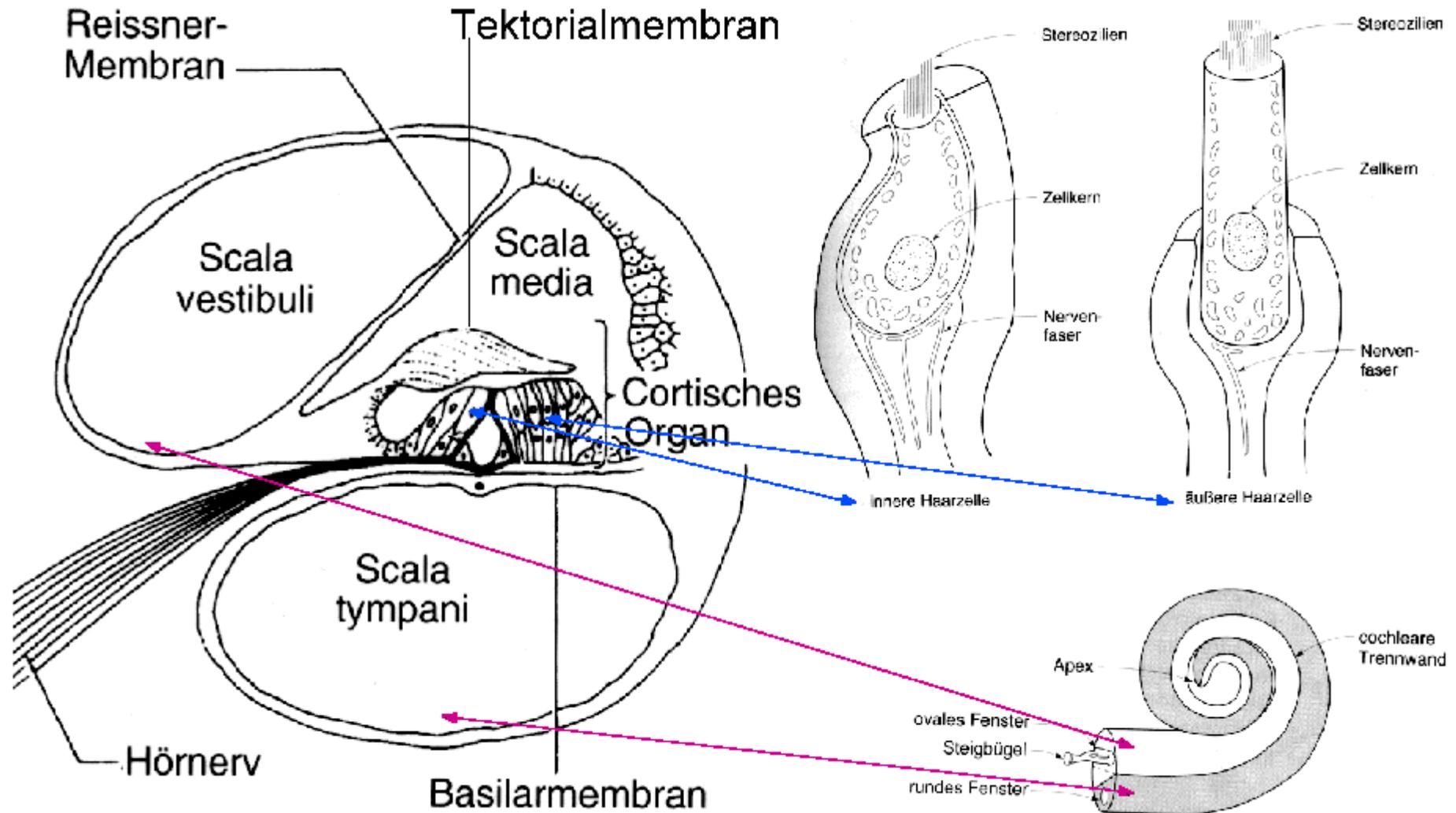
Steigbügel versetzt die Flüssigkeit in der Cochlea in Schwingung.

Cochlea ist in drei Abteilungen unterteilt (Scala vestibuli, tympani & media).

In der Scala media kann das Cortische Organ identifiziert werden.

www.bbc.co.uk/science/humanbody/body/factfiles/hearing/hearing_animation.shtml

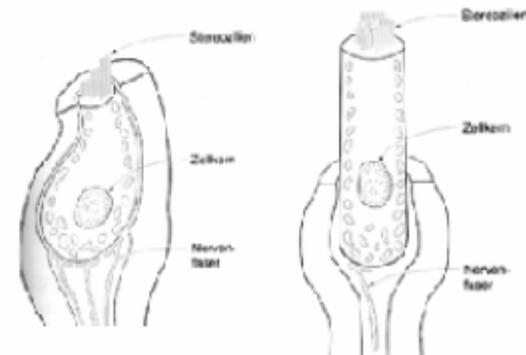
Anatomie



Funktionen des Innenohrs

**Ansatzpunkt der
Schwingungen:
Stereozilien der
Haarzellen**

Zur Anzeige wird der QuickTime™
Dekompressor „Video“
benötigt.



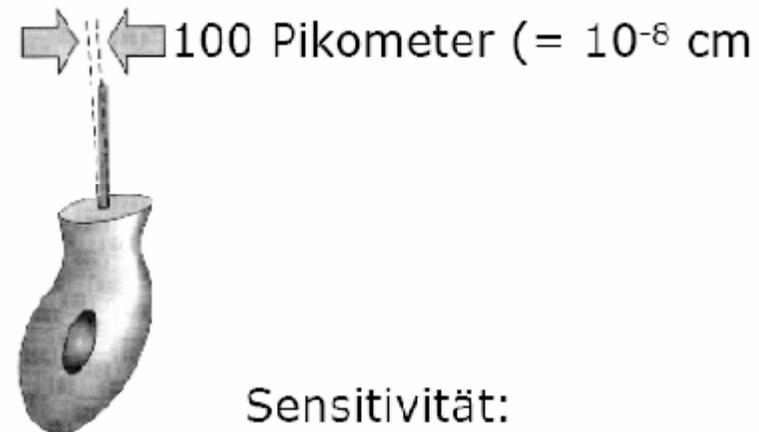
**Innere
Haarzellen
divergieren
auf mehrer
Nervenfasern**

**Äußere
Haarzellen
konvergieren
auf eine
Nervenfaser**

Funktionen des Innenohrs

Auslenkung der Stereozilien

Druck und Zug des Steigbügels versetzen die Flüssigkeit in der Cochlea in Bewegung. Bewegung wird auch am cortischen Organ umgesetzt. Stereozilien werden ausgelenkt, weil sie an der Tektorialmembran befestigt sind (äußere Haarzellen) oder sich mit der Flüssigkeit bewegen (innere Haarzellen).



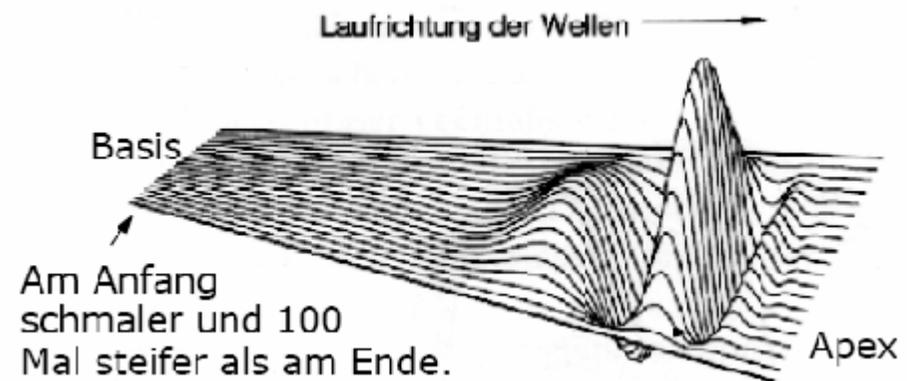
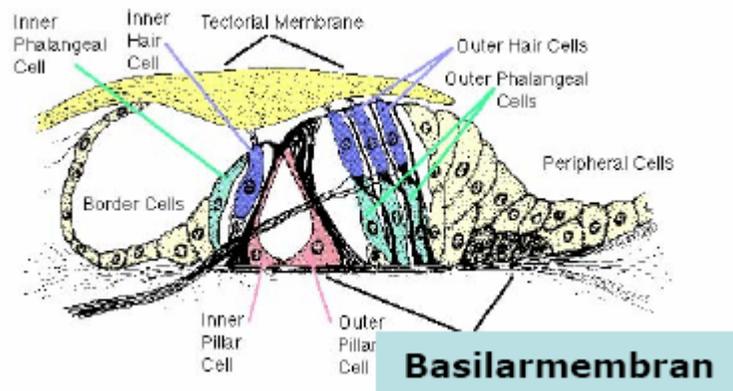
Sensitivität:
Schallwahrnehmung
bereits bei Trommelfell-
auslenkung von 0.1
Pikometer (10^{-11} cm)

Frequenzkodierung



Theorie von Békésy (Nobelpreis 1961)

Schwingungen der Basilarmembran vollziehen eine Wanderwelle, wenn die Cochlea in Schwingung gerät. Die Form der Wanderwelle wird dadurch bestimmt, dass sich die Breite und die Konsistenz der Membran von der Basis (Ansatzpunkt des Steigbügels) bis zum Apex (Spitze der Membran) verändert.

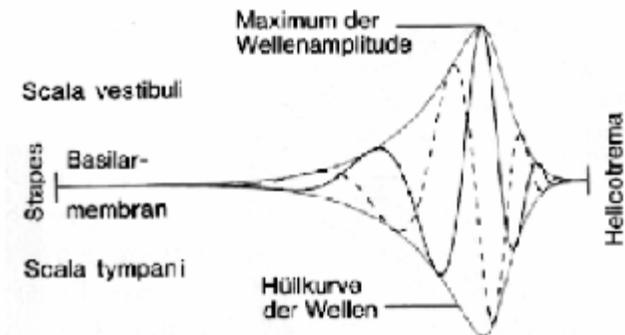
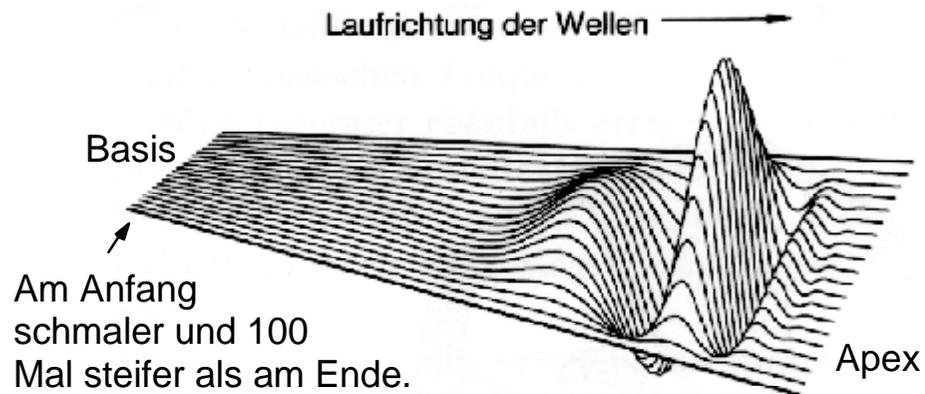


Frequenzkodierung

Schritt 1

Ort der maximalen Auslenkung bestimmen (mit Hilfe der Hüllkurve der Wanderwelle)

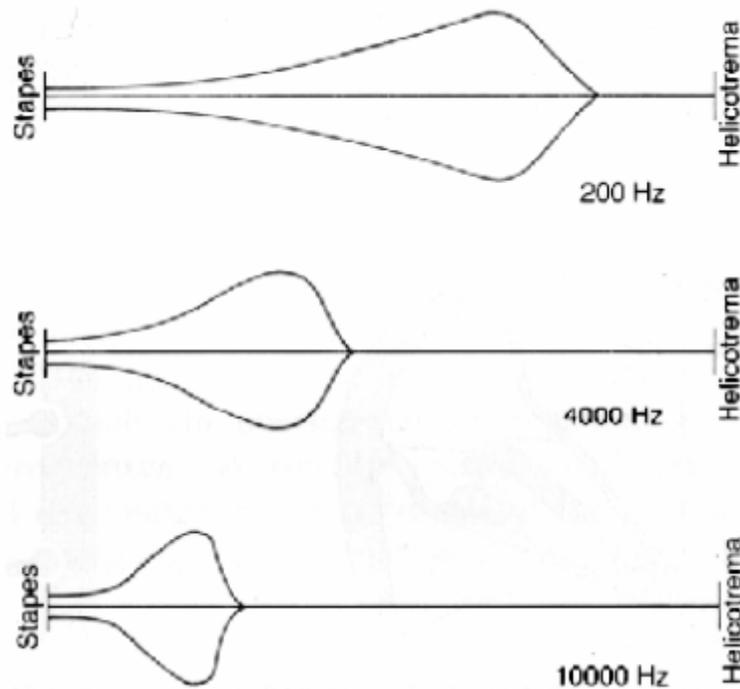
Zur Anzeige wird der QuickTime™ Dekompressor „YUV420 codec“ benötigt.



Frequenzkodierung

Schritt 2

Jede Frequenz beschreibt eine unterschiedliche Hüllkurve

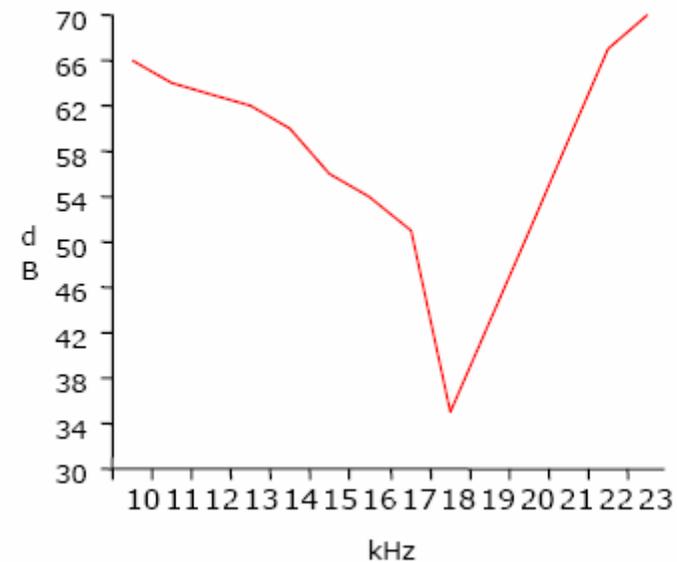
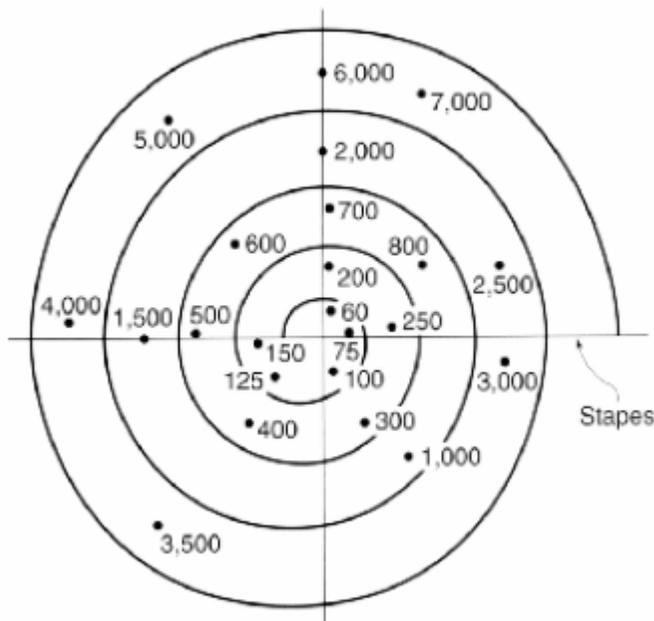


Zur Anzeige wird der QuickTime™ Dekompressor „YUV420 codec“ benötigt.

Frequenzkodierung

Schritt 3

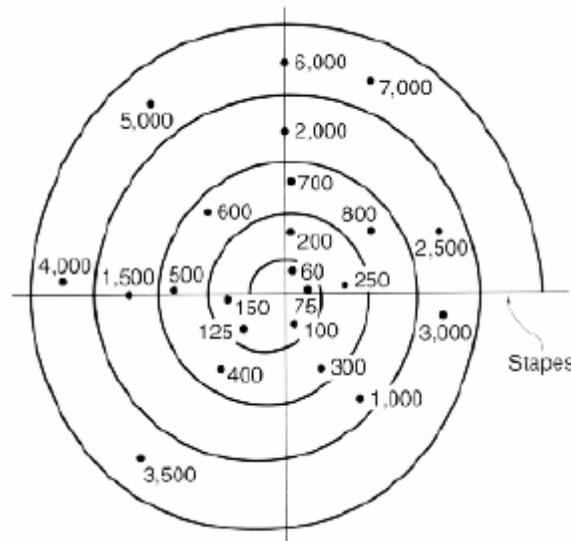
Tonotopie der Cochlea, d.h. unterschiedliche Haarzellen kodieren unterschiedliche Frequenzen. Dabei sprechen einzelne Haarzellen auf einen engen Frequenzbereich an.



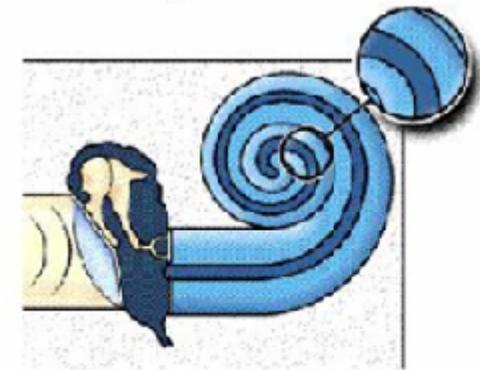
Frequenzkodierung

Frequenzkodierung in der Cochlea

**Hohe Frequenzen:
Schwingungen an
der Basis**

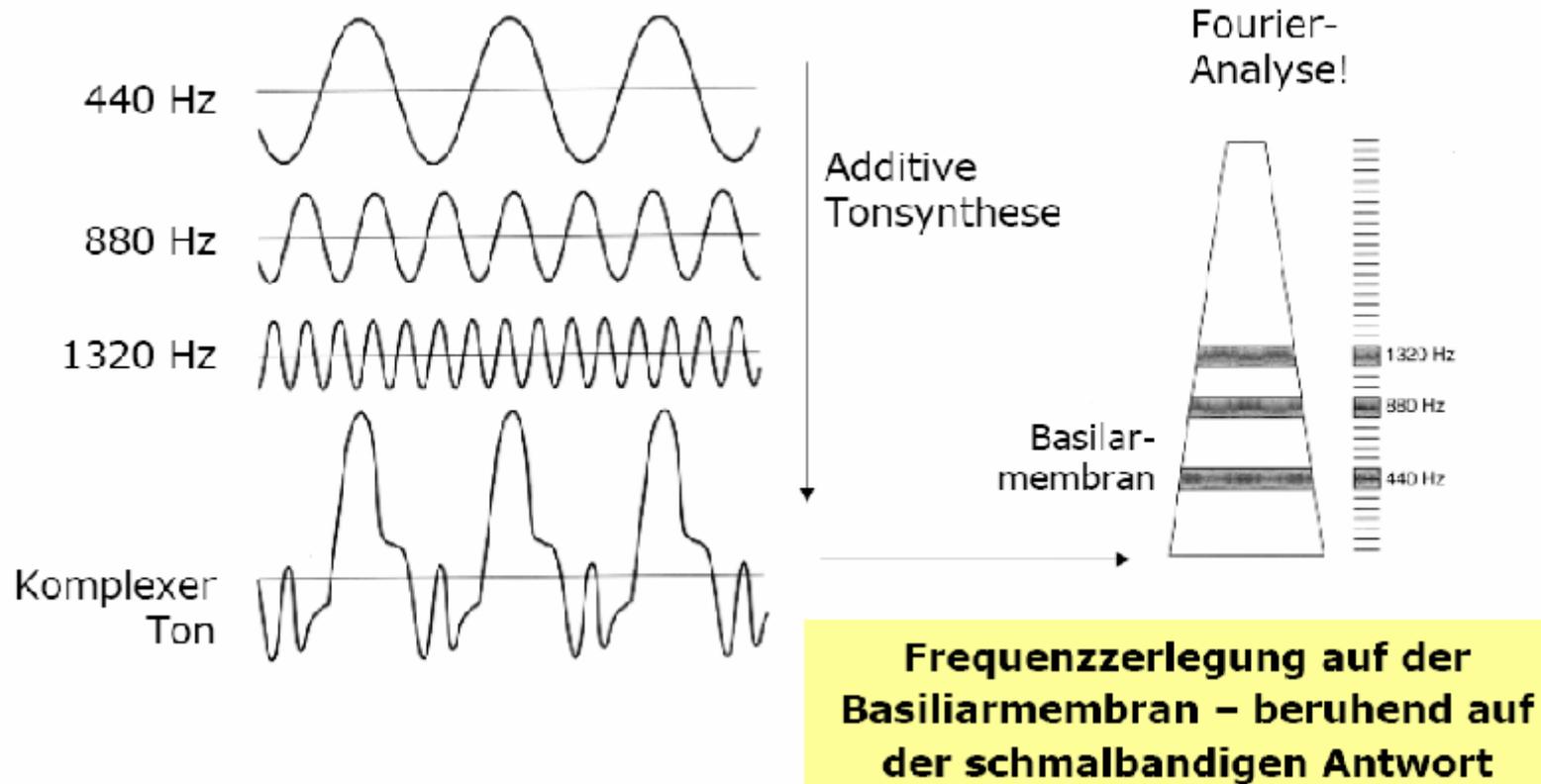


**Hohe Frequenzen:
Schwingungen an
der Apex**



Frequenzkodierung

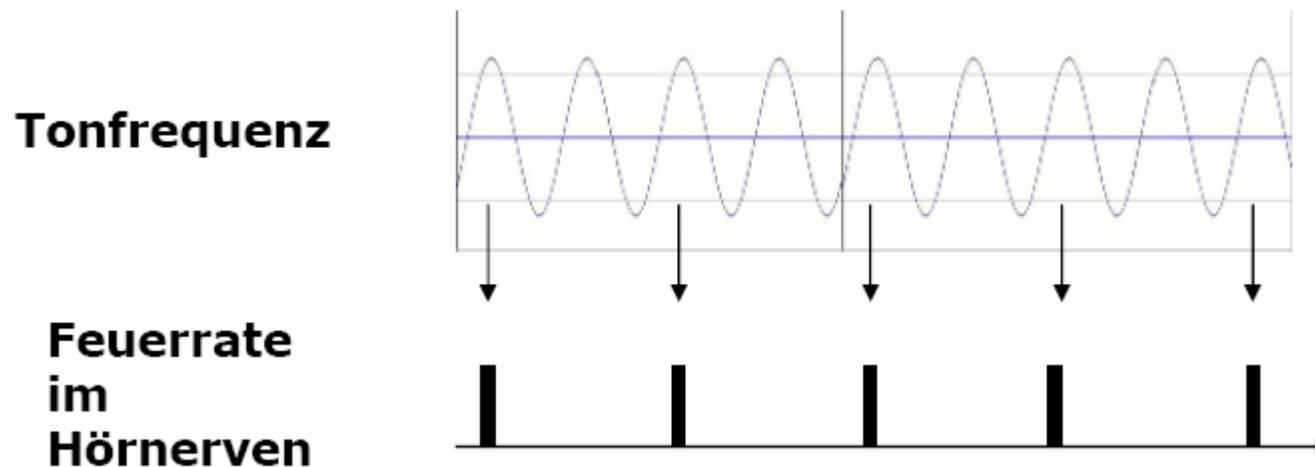
Frequenzkodierung in der Cochlea



Frequenzkodierung: Alternativen

Probleme der Frequenzkodierung

**Eine Nervenfaser kann nur maximal 1.000
Impluse in der Sekunde weiterleiten**

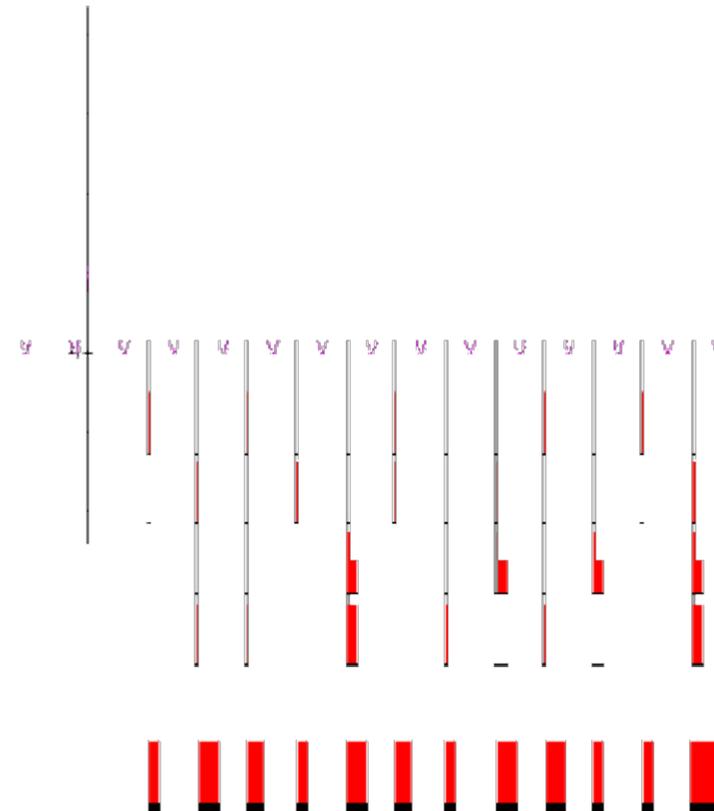


**Ein andauernder Ton von mehr als 1000 Hz kann so
jedoch nicht konstant wahrgenommen werden.**

Frequenzkodierung: Alternativen

Lösung:
Zeitliche Codierung durch eine Phasenkopplung. D.h. verschiedene Nervenfasern übertragen das akustische Signal, wobei jeder Zelle ihre Refraktärzeit zugestanden wird.

Lösungsprinzip auf Ebene der primären Verarbeitung. Auf höherer neuronaler Ebene wird das Problem anders gelöst.

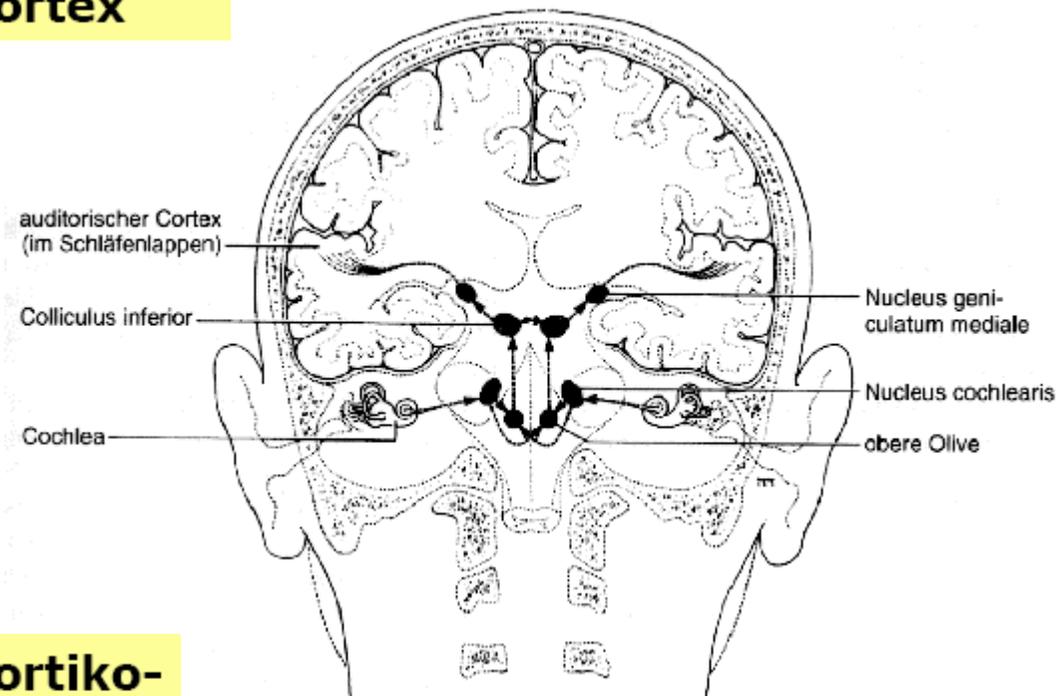


Höhere Verarbeitung

Mehrmalige Verschaltung des neuronalen Signals von der Cochlea bis zum auditorischen Kortex

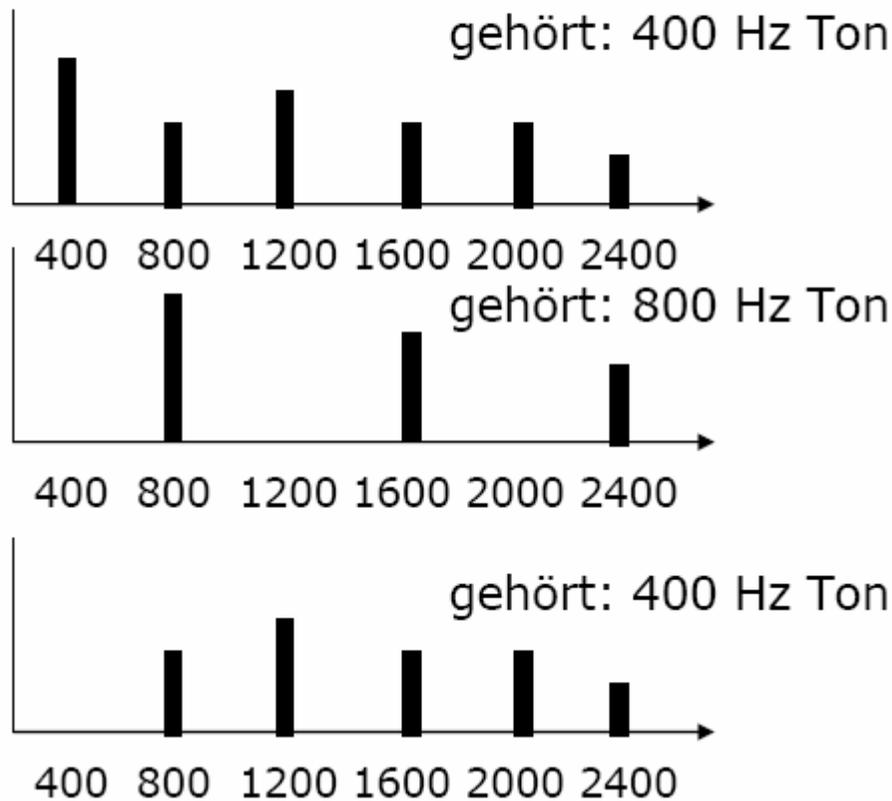
Informationen kreuzen zur anderen Hemisphäre an zwei Stellen (obere Olive, Colliculi inf.)

Top-down Kontrolle über kortikofugale Fasern, die vom Kortex zur Cochlea runterziehen.



Kortikale Phänomene

Fourierspektren



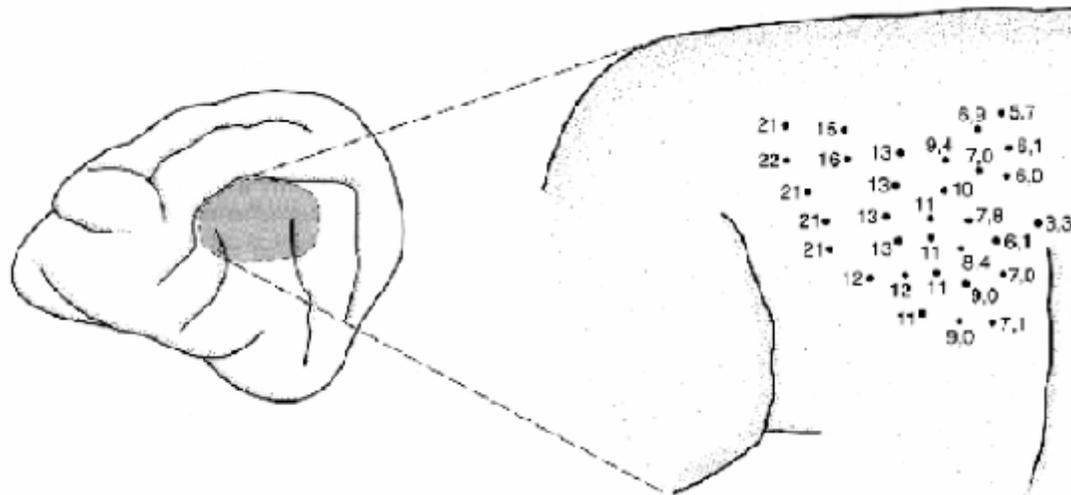
Hören findet im Kortex statt.

Ein zentraler Tonhöhenprozessor analysiert die Oberschwingungen und ‚ergänzt‘ die Grundfrequenz.

Virtuelle Tonhöhen werden ausgenutzt beim Bau von Musikinstrumenten, beim Telefon und bei MP3-Playern.

http://iem.at/lehre/musikalische_akustik/musikalische_akustik/0219auditory_demo20.mp3

Kortikale Phänomene



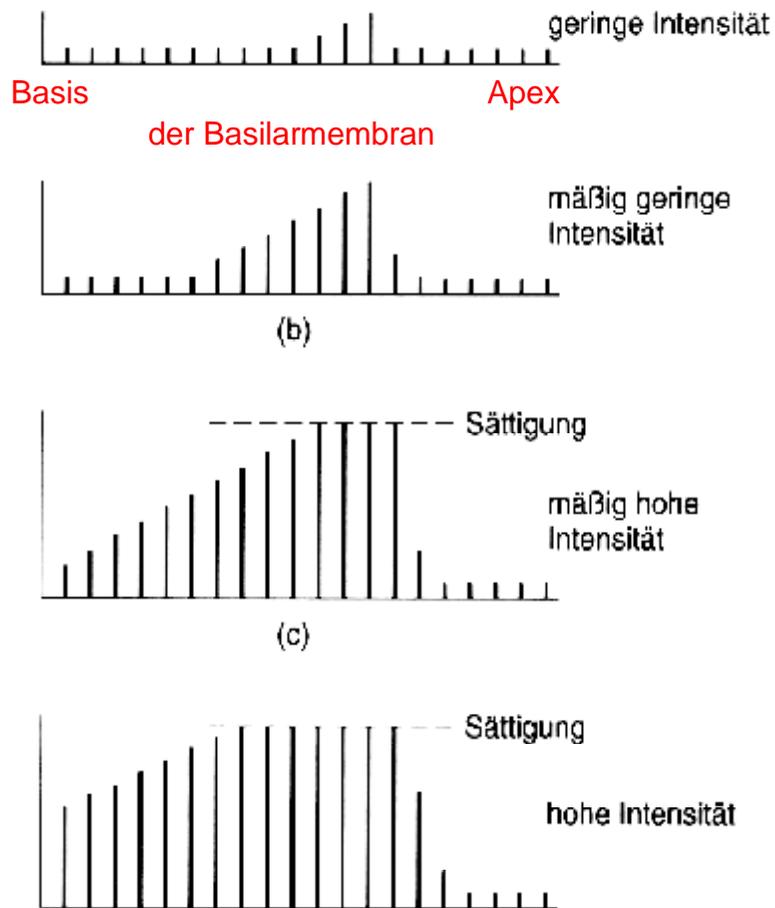
Während die räumliche Frequenzcodierung bis zum Kortex also beibehalten wird, nimmt der Einfluß der zeitliche Frequenzcodierung ab.

Tonotopie im auditiven Kortex

Angrenzende Neuronen(-säulen) im Kortex enkodieren angrenzende Frequenzen.

Die Tonotopie setzt sich von der Ebene der Cochlea bis zum Kortex fort.

Kortikale Phänomene



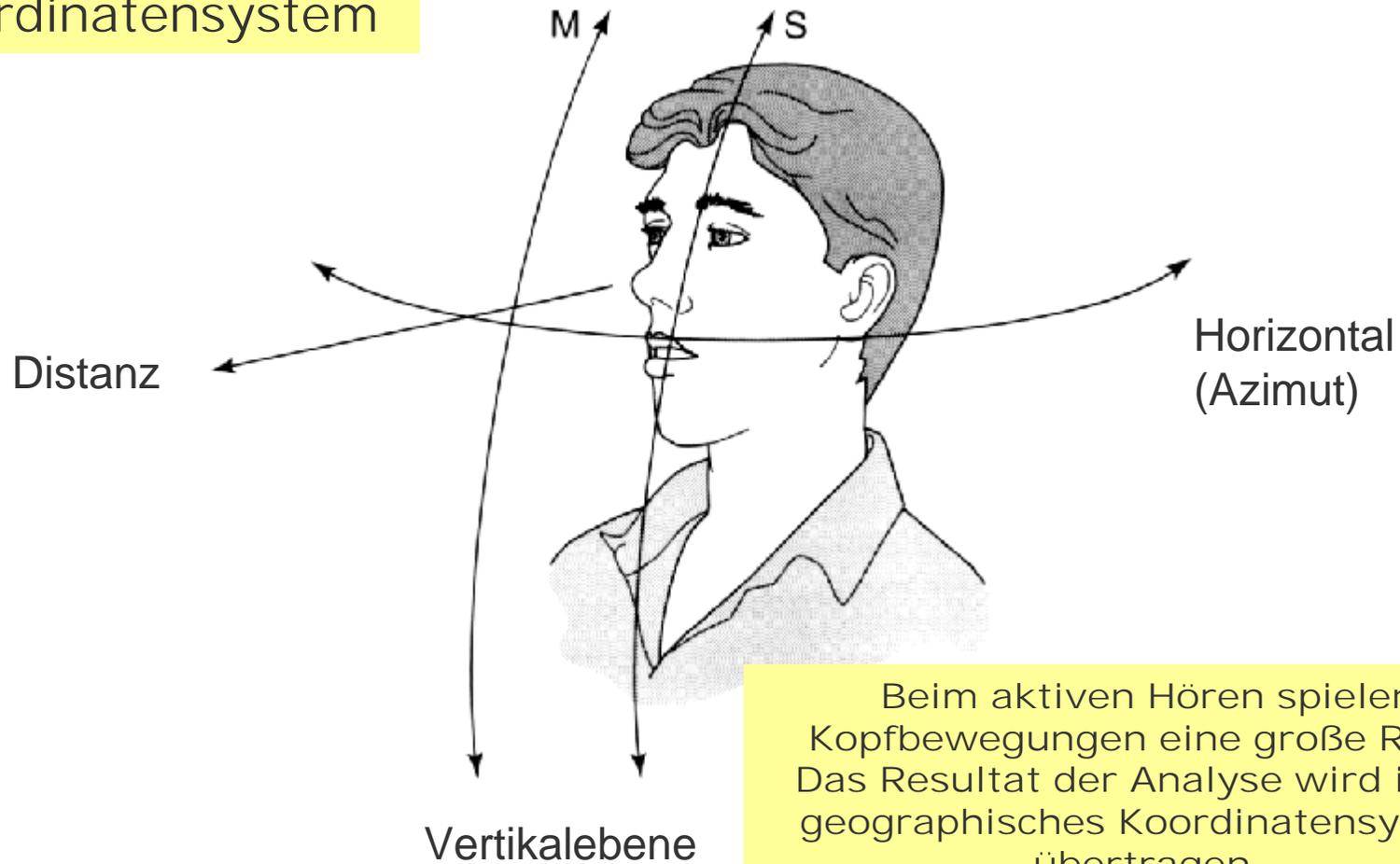
Neuronale Kodierung der Lautstärke

Problem: Sättigung der neuronalen Antwort bei 40-50 dB

Lösung 1: Neurone setzen einen anderen Nullpunkt, d.h. verringern ihre Sensitivität

Lösung 2: Antwortfrequenz verändert sich, d.h. Haarzellen für tiefere Frequenzen sprechen mit an.

Kopfbezogenes Koordinatensystem

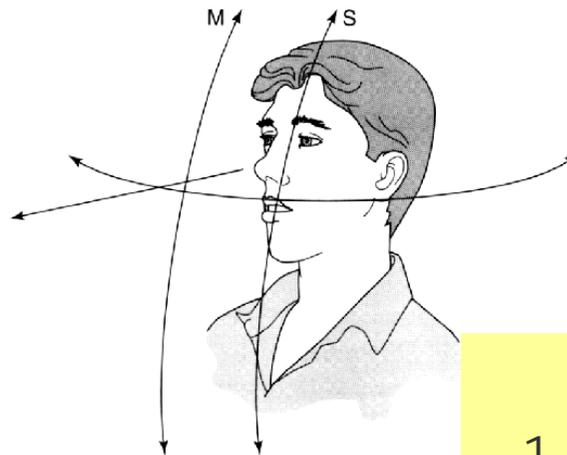


Beim aktiven Hören spielen Kopfbewegungen eine große Rolle. Das Resultat der Analyse wird in ein geographisches Koordinatensystem übertragen.

Lokalisation von Schallquellen

Größte Fehlerabweichung bei Geräuschquellen im Rücken (bis 20 Grad)

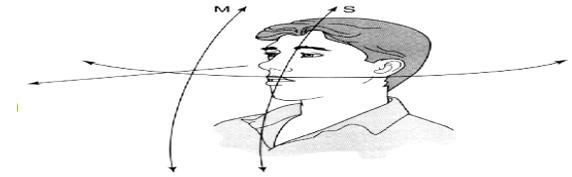
Größere Unsicherheiten bei Veränderungen in der Vertikalebene im Vergleich zur Azimutalebene



Geringste Fehlerabweichung bei frontalen Geräuschquellen (2-3 Grad)

Probleme:

1. Wie lokalisiert das Gehirn die Objekte so genau?
2. Wie gleicht es die Lokalisation durch verschiedene Sinnessysteme ab?
3. Wie trennt das Objekt das eintreffende Geräuschgemisch?



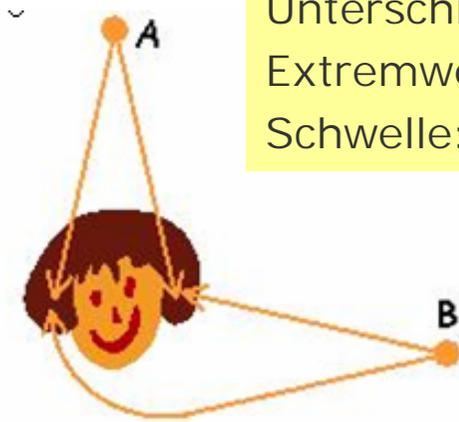
Wie lokalisiert man in der Azimutalebene?

Prinzip der interauralen Zeitdifferenz:

Unterschiedliche Laufzeiten der Schallwellen bei verschobenen Quellen.

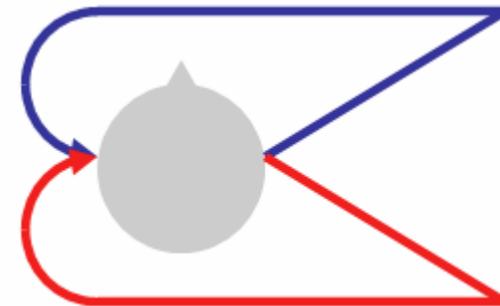
Extremwert: 600 Mikrosekunden

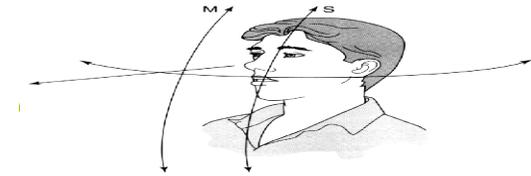
Schwelle: 10 Mikrosekunden



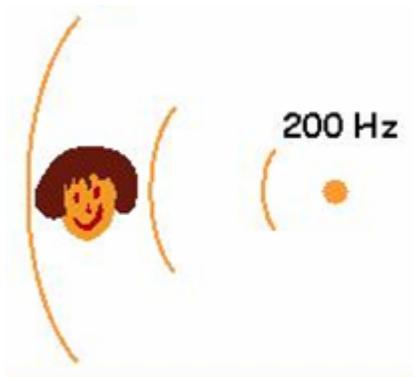
Problem: Lösung ist nicht eindeutig, da es mehrere Lösungen für eine Zeitdifferenz gibt.

Lösung: Bei Kopfbewegungen ändert sich systematisch der binaurale Schall und die Quellen werden eindeutig lokalisierbar.

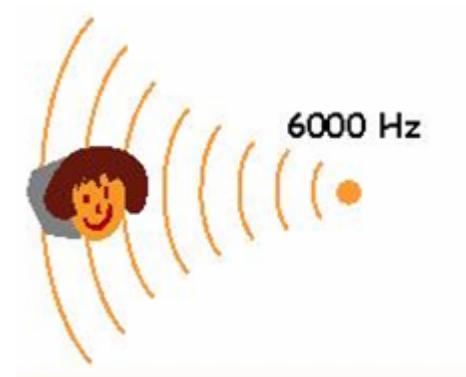




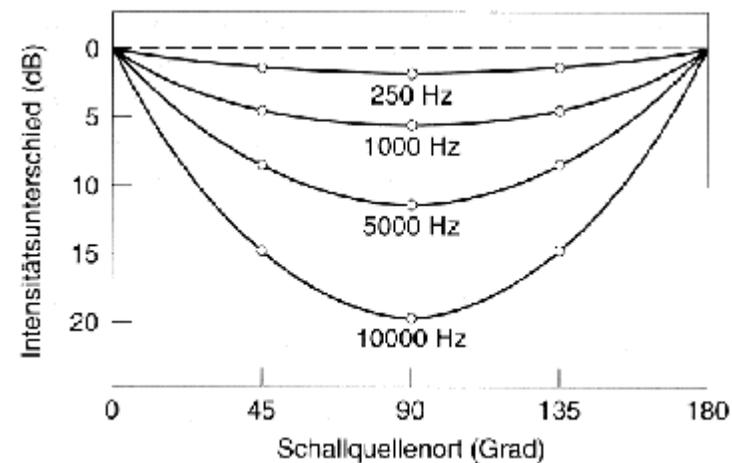
Wie lokalisiert man in der Azimutalebene?

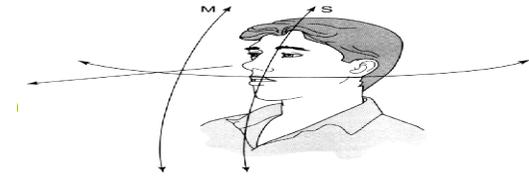


Prinzip der interauralen Pegeldifferenz:
Der Kopf ist ein Hindernis für seitliche Schallquellen. In seinem Schatten reduziert sich die Intensität – primär für höherfrequente Töne.



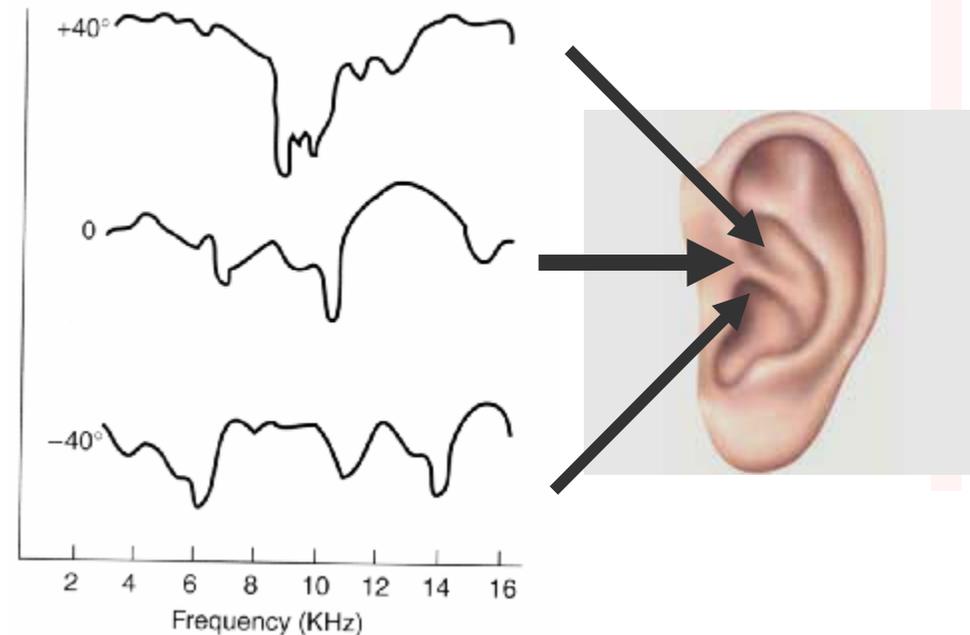
Systematische Abschwächung der Pegeldifferenz mit steigender Frequenz des Tons





Wie lokalisiert man in der Vertikalebene?

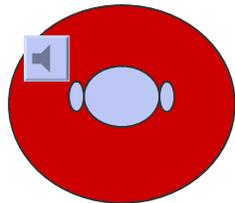
Reflektionen an der Ohrmuschel
Verschiedene Frequenzbereiche werden im äußeren auditiven System (Ohrmuschel, äußere Gehörgang) unterschiedlich übertragen.
Das Wissen über die Veränderung der spektralen Empfindlichkeit wird wahrscheinlich eingesetzt, um den Eintrittswinkel des Schalls zu berechnen.



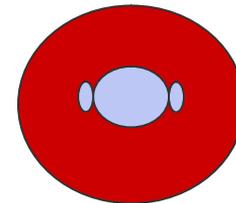
Kritischer Test:

- Andrücken der Ohrmuschel
- Reine Sinustöne

Zwei Mechanismen

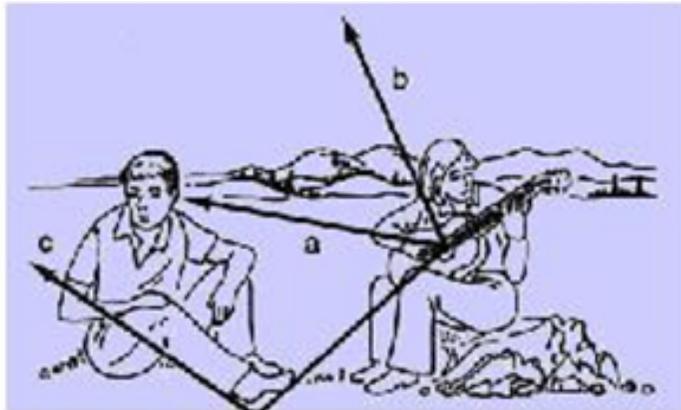


Schallquelle im Greifraum (<math>< 1\text{m}</math>)
Sehr gute Distanzschätzung über die interaurale Pegeldifferenz. Die Differenzen (4 – 20 dB) können auch zur Distanzschätzung verwendet werden.



Schallquelle im extrapersonalen Raum (>1m)
Verschiedene Schätzmechanismen, z.B. das Wissen um die Verringerung der Lautheit bei zunehmender Entfernung (6 dB Reduktion bei Verdopplung der Entfernung), die Veränderung der Tonhöhe oder die Bewegungsparallaxe.

Entfernungsschätzung in offenen Räumen

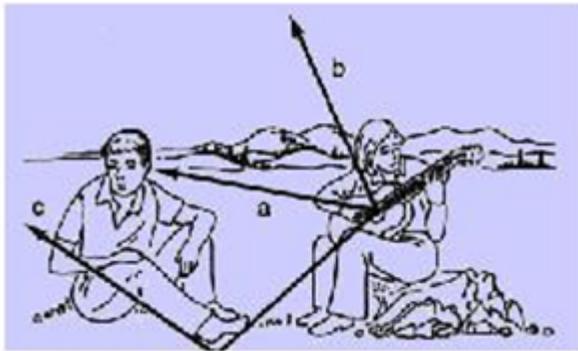


Schätzmechanismus „Lautheit“
In offenen Räumen nimmt der Schalldruck um 6dB bei Verdoppelung der Entfernung ab.

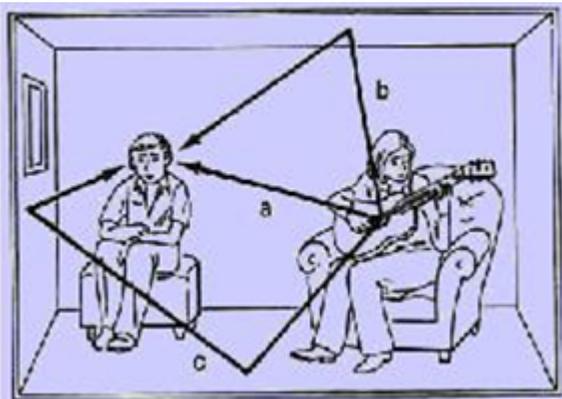
Schätzmechanismus „Tonhöhe“
Entfernte Schallquellen klingen dumpfer, da hohe Frequenzen eher absorbiert werden.

Schätzmechanismus
„Bewegungsparallaxe“
Bei Eigenbewegung scheinen sich nahe Schallquellen schneller in die Gegenrichtung zu bewegen.

Entfernungsschätzung in geschlossenen Räumen



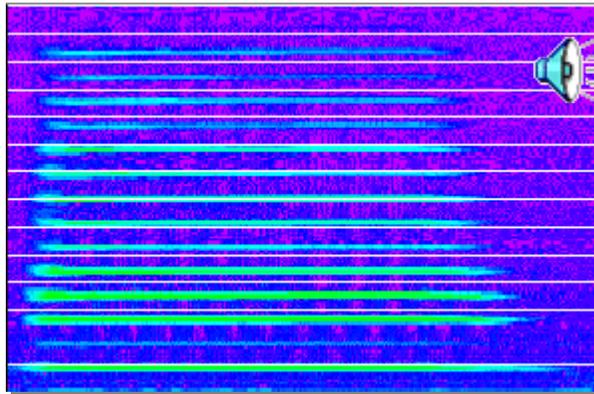
Schallquellen im Freien:
Primärer Schall



Schallquellen in Räumen:
Primärer Schall + Reflektierter Schall

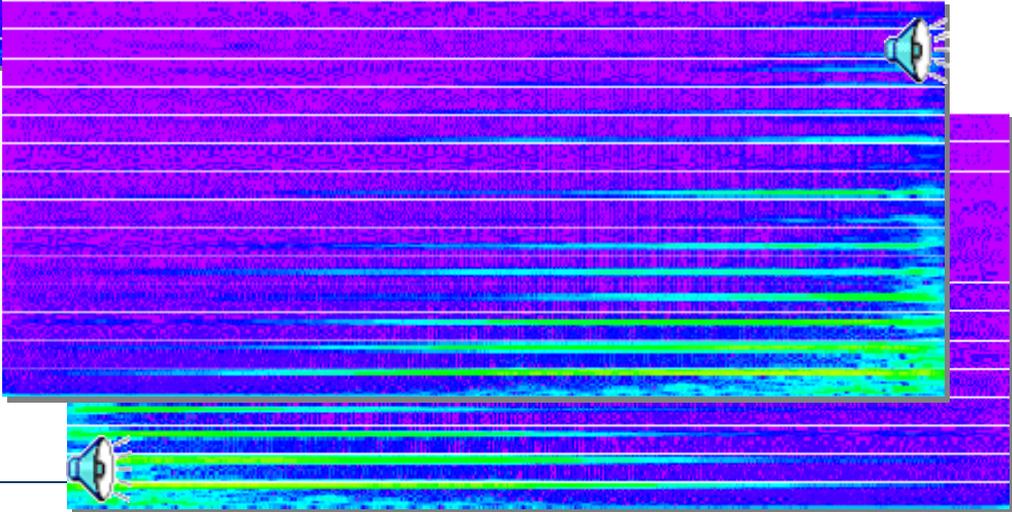
Verhältnis zwischen der Lautstärke des primären und reflektierten Schalls dient zur Distanzschätzung

Problem der Raumakustik:
Wie verändert das Verhältnis zwischen dem primären und reflektierten Schall die Wahrnehmung des Klang?
Wichtig ist die Nachhallzeit: Zeit, bis die Schallenergie auf 1/1000 des ursprünglichen Schalldrucks gefallen ist.

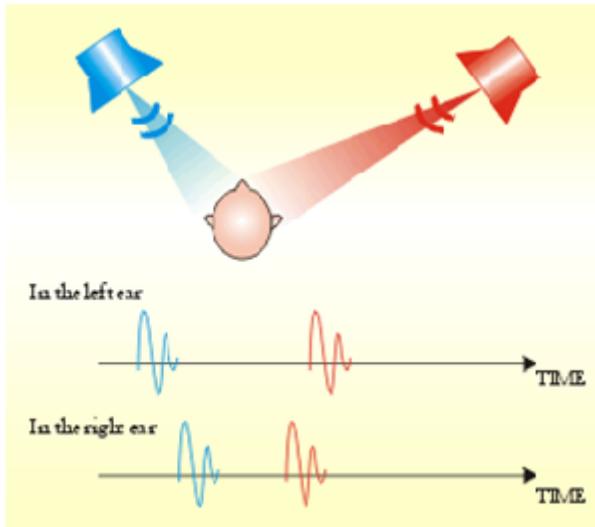


Kurze Nachhallzeit:
Gut für Sprache (<1s),
schlecht für Musik (>1s).
Die Musik wirkt ‚tot‘

Lange Nachhallzeit:
Gut für Musik (>1s), aber
abhängig vom Instrument. Zu
langer Nachhall macht die
Musik ‚breiig‘

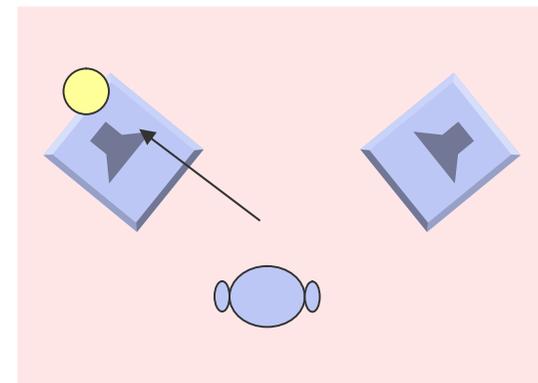
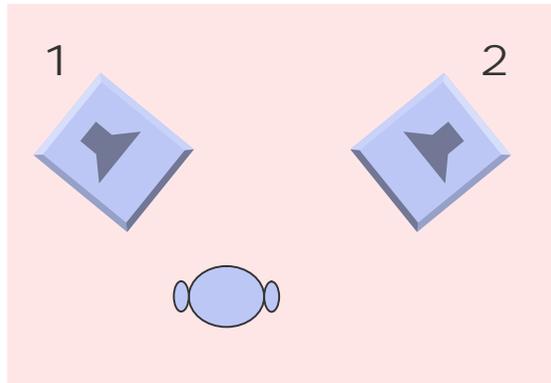
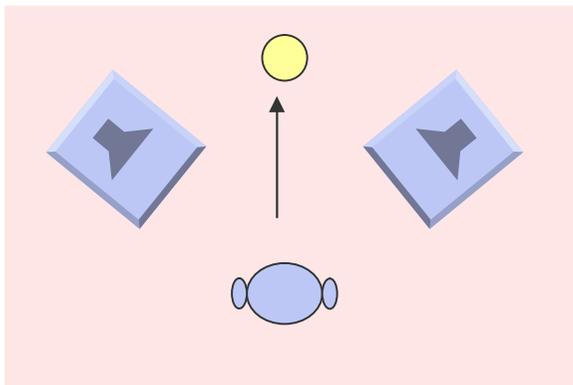


Präzedenzeffekt
(Gesetz der ersten Wellenfront)



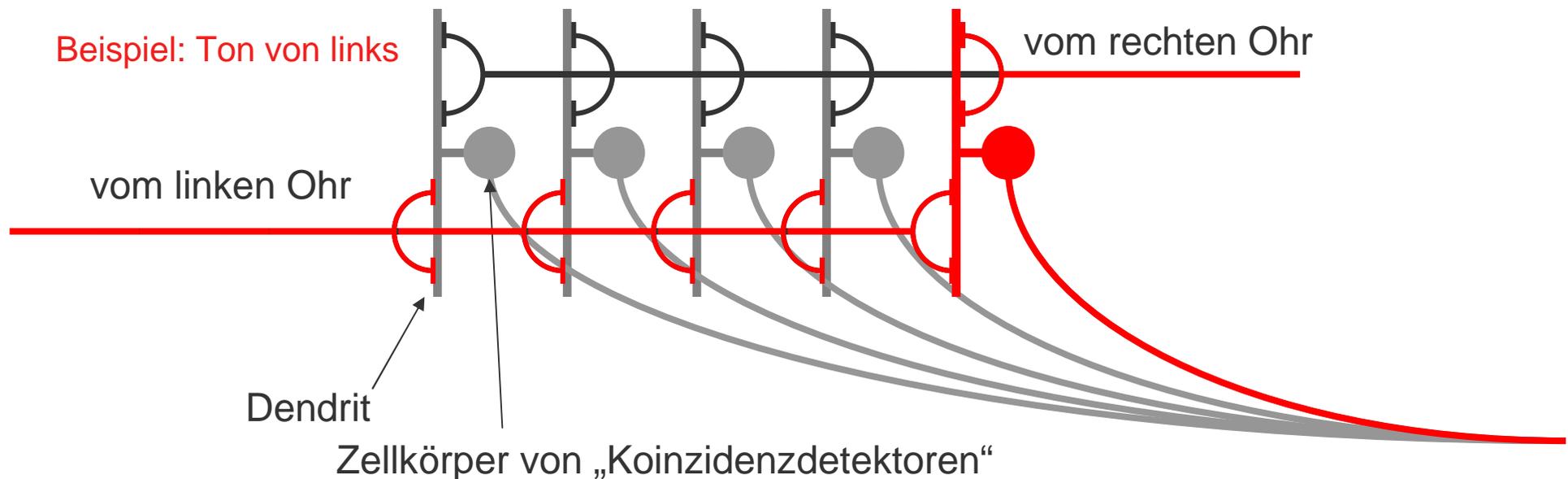
Kurzfassung:
Die erste Wellenfront, die das Ohr erreicht, bestimmt die Lokalisation. Der Rest beeinflusst die Wahrnehmungsqualität

Spezialfälle:
Lokalisation bei gleichzeitiger Darbietung.
Lokalisation bei Verzögerung von 1-5ms.





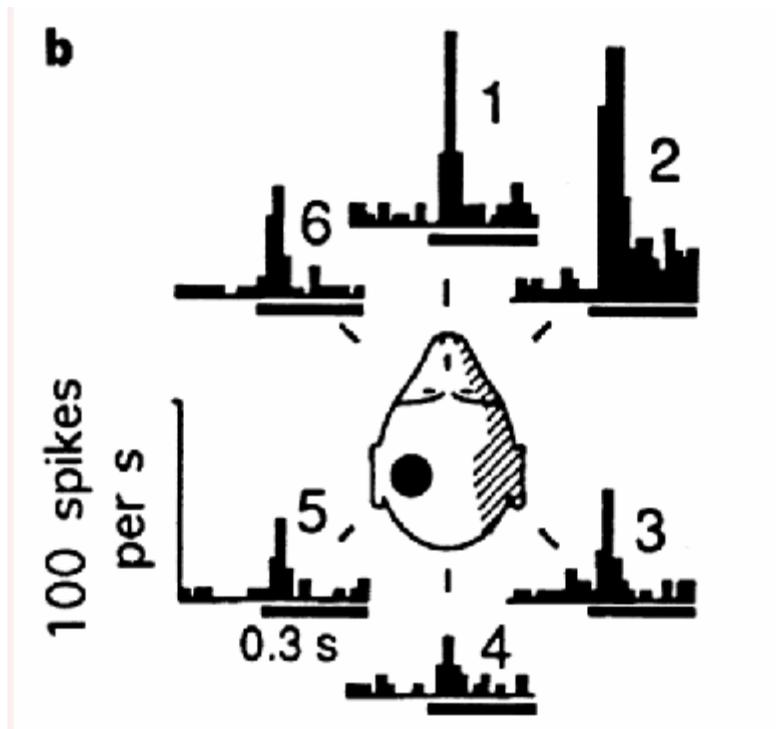
Repräsentation der Hörtraumes



Detektoren für die interaurale Zeitdifferenz: Schon in der subkortikalen auditiven Verarbeitung (obere Olive) beim Rhesusaffen zu finden. Möglicherweise die Basis für eine Repräsentation des Hörtraumes im Kortex.



Repräsentation der Hörraumes

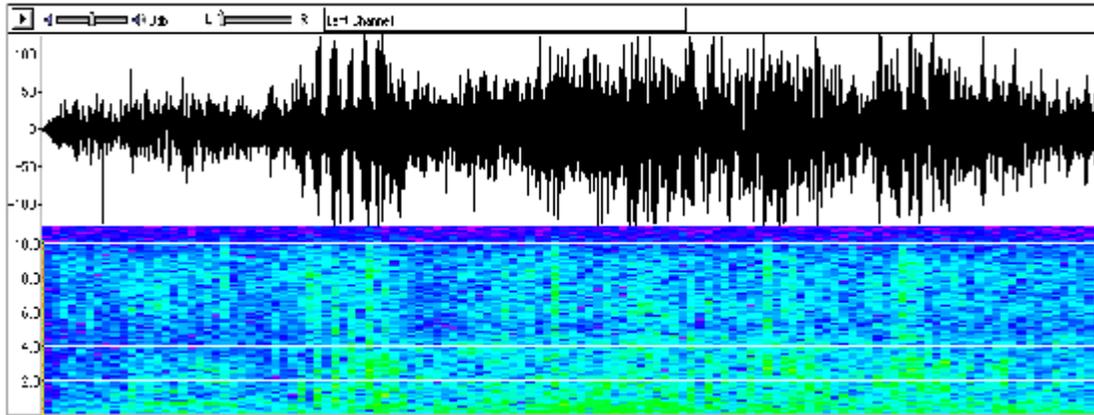


Direkte Evidenz für eine Repräsentation des Hörraumes im multimodalen Kortex (prämotorisches Areal).

Aber:

1. Richtungskodierung nur für Reize im Greifraum.
2. Gleiche Spezifität für visuelle und taktile Reize.

<http://www.hoerspielbox.de/frameset.htm>



Wie werden aus kaum trennbaren Schallereignissen einzelne bedeutsame Signal gemacht?



Ähnliches Problem bei der visuellen Objekterkennung: Wie segmentiert man verschiedene Objekte?

Gestaltpsychologie des Hörens

Prinzip 1: Herkunftsort

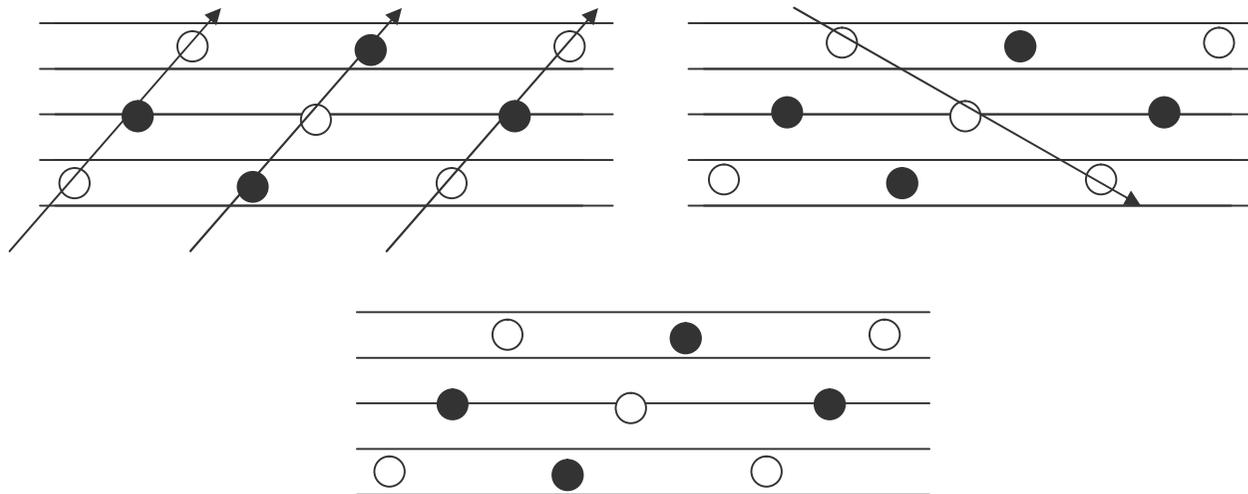
Schallereignisse, die von einem bestimmten Ort herkommen oder sich langsam bewegen, stammen in der Regel von einer Schallquelle

Gestaltpsychologie des Hörens



Prinzip 2: Ähnlichkeit der Klangfarbe

Musiktöne mit ähnlicher Klangfarbe werden in der Wahrnehmung zusammengefasst (auditive Sequenzgliederung)

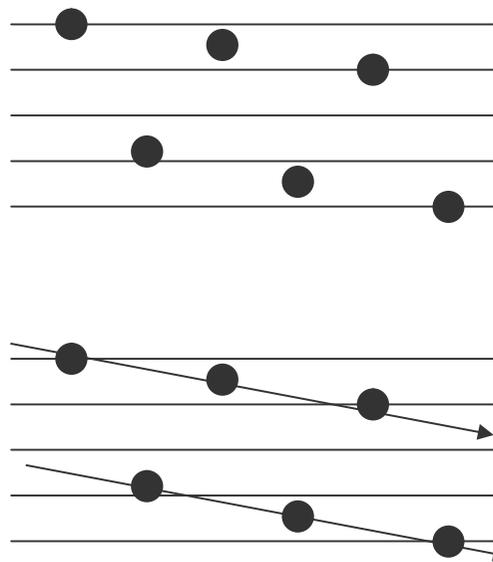


Gestaltpsychologie des Hörens



Prinzip 3: Ähnlichkeit der Tonhöhe

Musiköne mit ähnlicher Tonhöhe werden in der Wahrnehmung zusammengefasst



Hohe Melodie

Tiefe Melodie

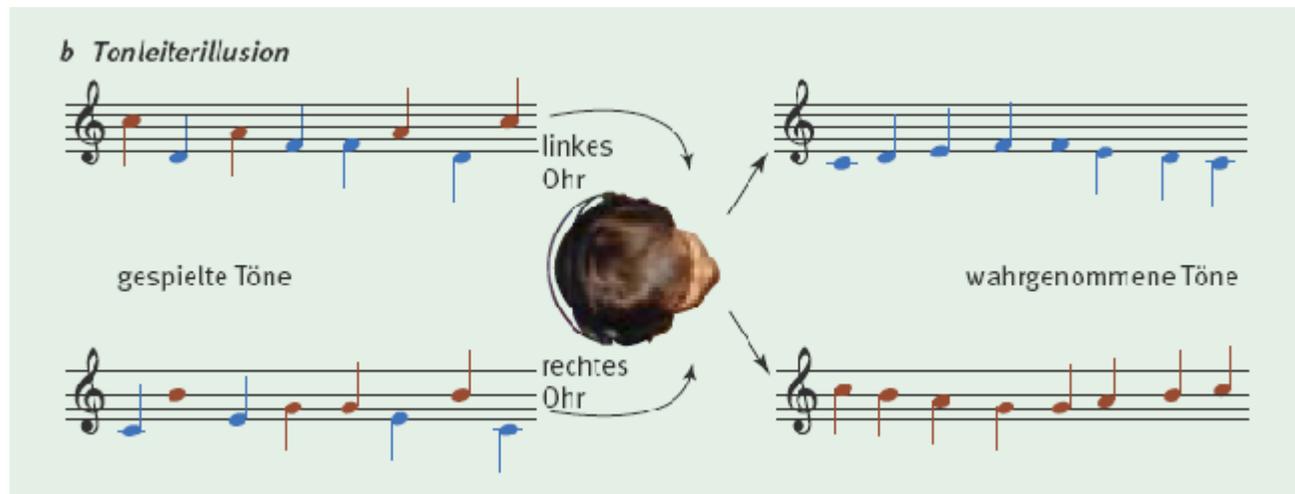
Bach - Komposition

Gestaltpsychologie des Hörens

<http://asa.aip.org/sound/cd/demo27a.au>

Prinzip 3: Ähnlichkeit der Tonhöhe

Tonleiter-Illusion (Deutsch, 1975): Räumliche Umgruppierung der Tonreize machen den Effekt einer ‚guten Tongestalt‘



Gestaltpsychologie des Hörens

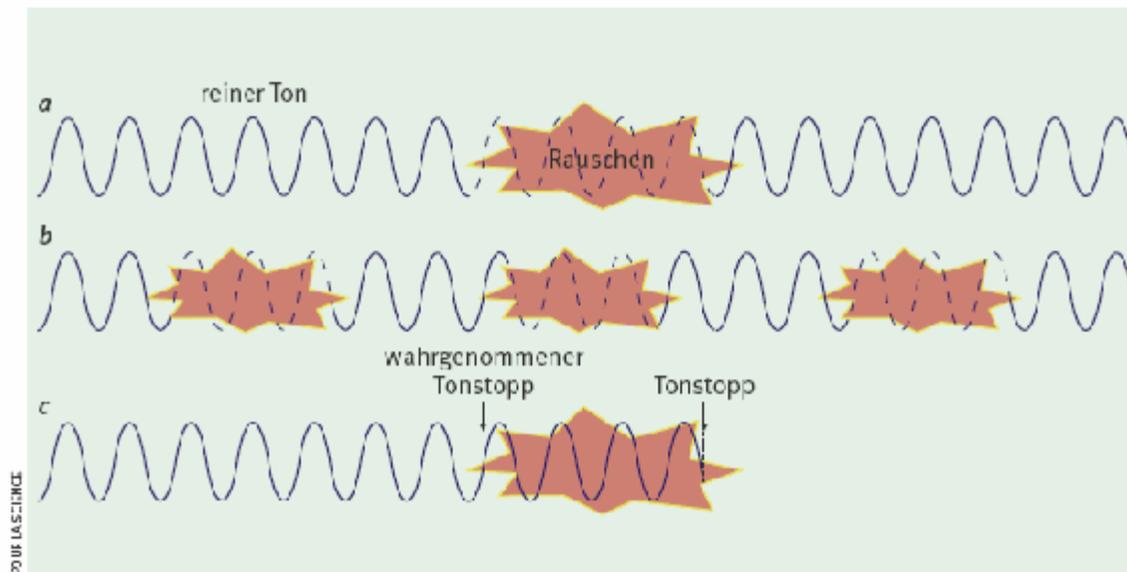
Prinzip 4: Zeitliche Nähe

Musiköne, die in rascher Folge nacheinander dargeboten werden, werden demselben Ursprung zugeordnet (arbeitet zusammen mit Prinzip 3).

Gestaltpsychologie des Hörens

Prinzip 5: Gute Verlaufsgestalt

Musiktöne, die eine regelmäßige Abfolge darstellen, haben in der Regel denselben Ursprung.



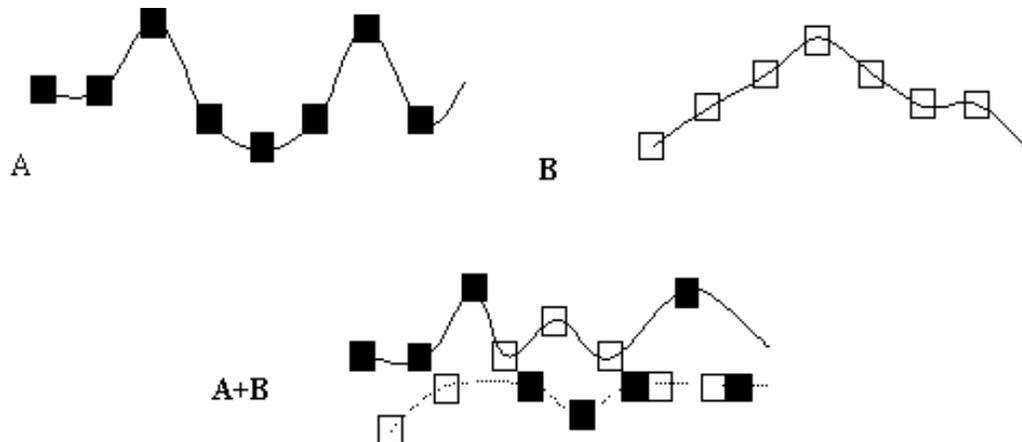
Unterbricht ein kurzes Rauschen einen Ton, so wird er trotzdem an kontinuierlich wahrgenommen.

Rauschen am Tonende führt auch zum Abbruch der Tonwahrnehmung.

Gestaltpsychologie des Hörens

Prinzip 5: Gedächtnisschema für Melodien

Vorangegangene Erfahrung und Erwartung beeinflusst das Hören von Melodien.



Zwei bekannte Melodien (A,B) können nur dann bei einer gemischten Darbietung differenziert werden, wenn man vorher die Titel genannt bekommt.