

Instrumentenkunde und Akustik

Akustische und psychoakustische Grundlagen der Musik

Prof. Dr. Christoph Seibert

IMWI Institut für Musikanformatik
und Musikwissenschaft

University of Music
Hochschule
für Musik
Karlsruhe



Grundlagen der Akustik

Was ist Akustik?

Gegenstand der Akustik als wissenschaftlicher Disziplin ist

- die Erzeugung von Schall
- die Ausbreitung von Schall
- die Messung von Schall
- die Wahrnehmung von Schall

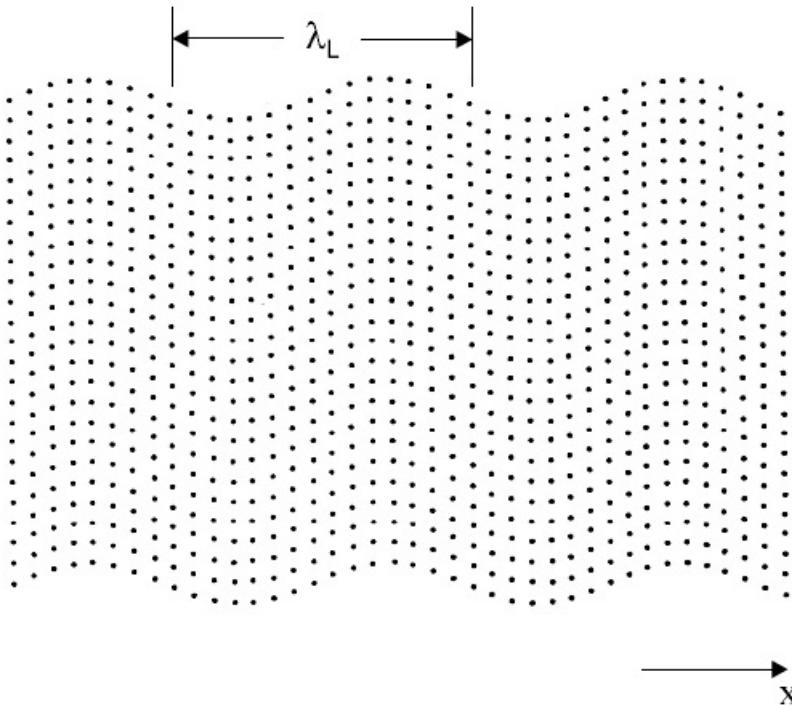
„Schall ist [...] ein physikalisches Phänomen, bei dem sich elastische Verformungen als Schwingungen um einen Gleichgewichtszustand durch ein Medium in Form von Wellen ausbreiten.“

(Weinzierl 2014, 3)

Je nach Medium, in dem sich diese Wellen ausbreiten, wird unterschieden zwischen:

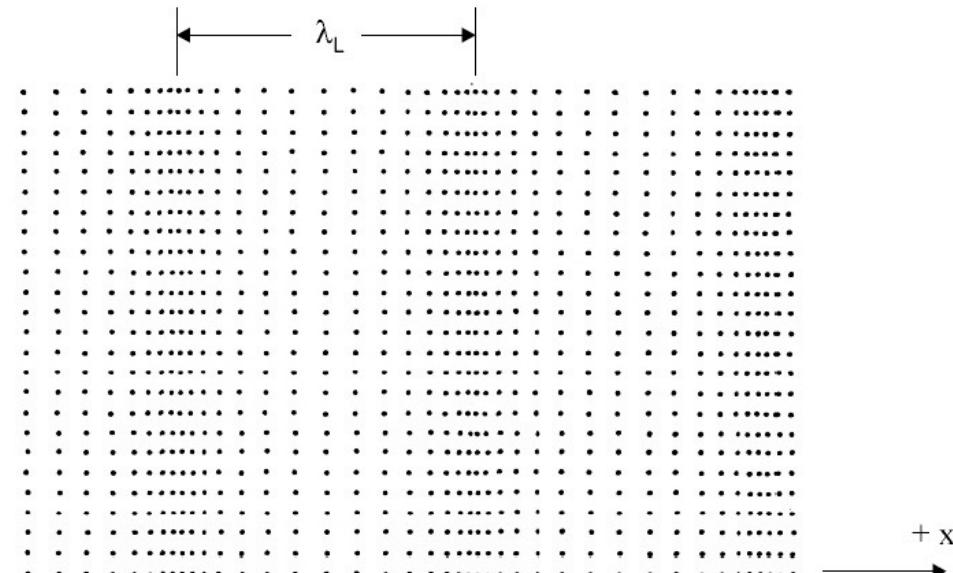
- Körperschall
- Flüssigkeitsschall
- Luftschall

Zwei verschiedene Schwingungsformen:



Transversalwelle

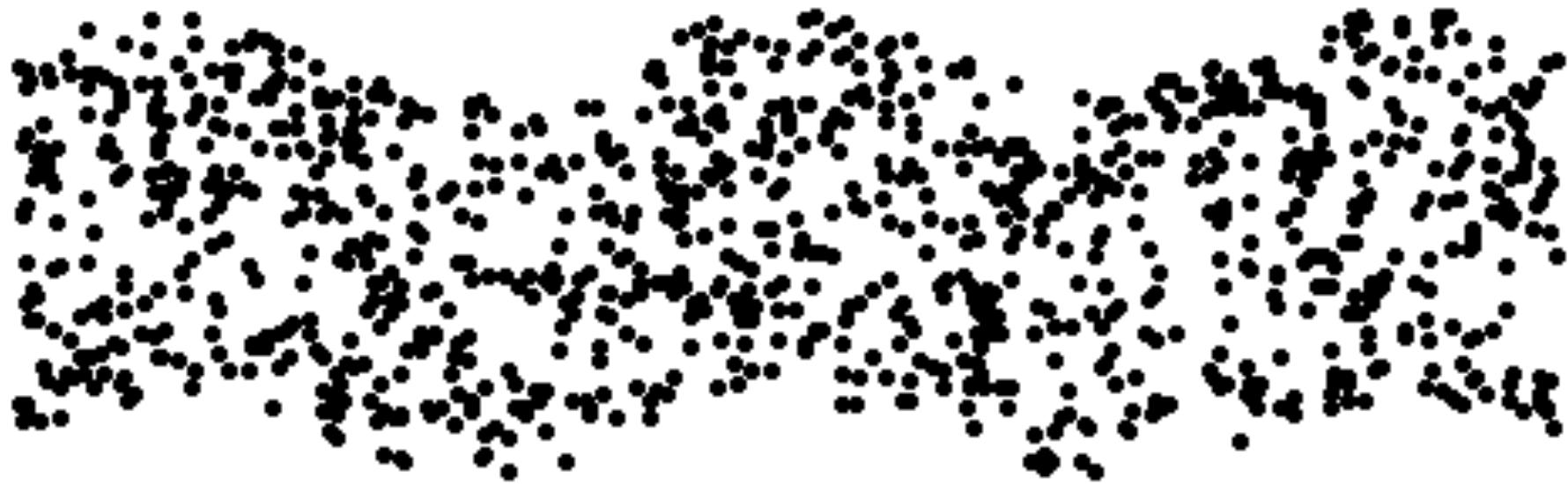
Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage erfolgt orthogonal zur Ausbreitungsrichtung (vgl. Körperschall, z.B. schwingender Resonanzkörper)



Longitudinalwelle

Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage erfolgt in Ausbreitungsrichtung (vgl. Luftschall, z.B. schwingende Luftsäule in einer Querflöte)

Zwei verschiedene Schwingungsformen:

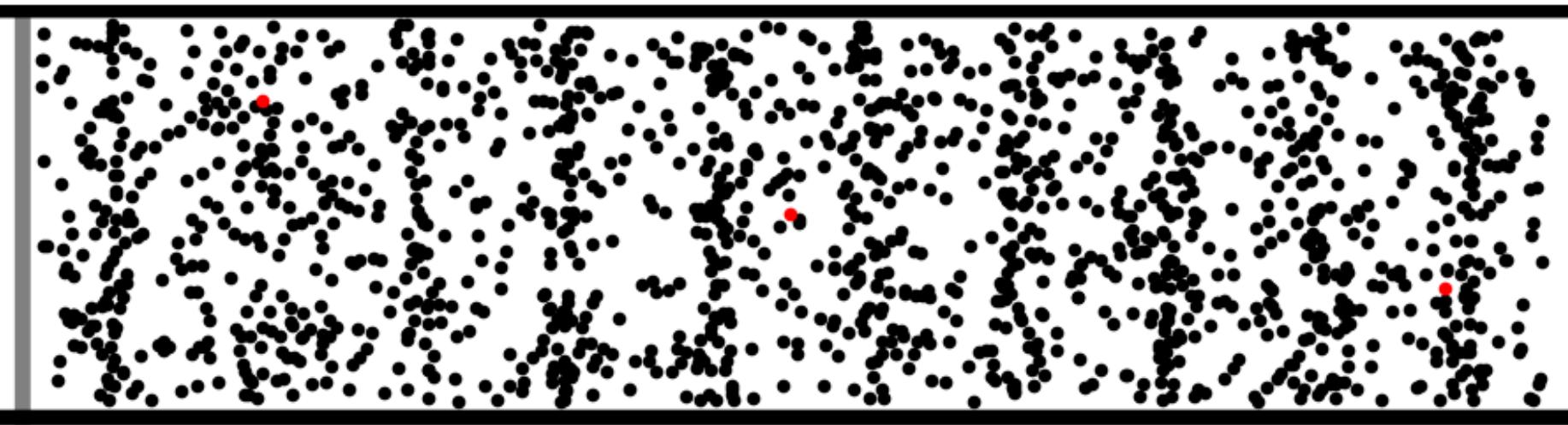


Transversalwelle

Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage erfolgt orthogonal zur Ausbreitungsrichtung (vgl. Körperschall, z.B. schwingender Resonanzkörper)

Animation: Daniel A. Russell (2011, 2015), <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>

Zwei verschiedene Schwingungsformen:



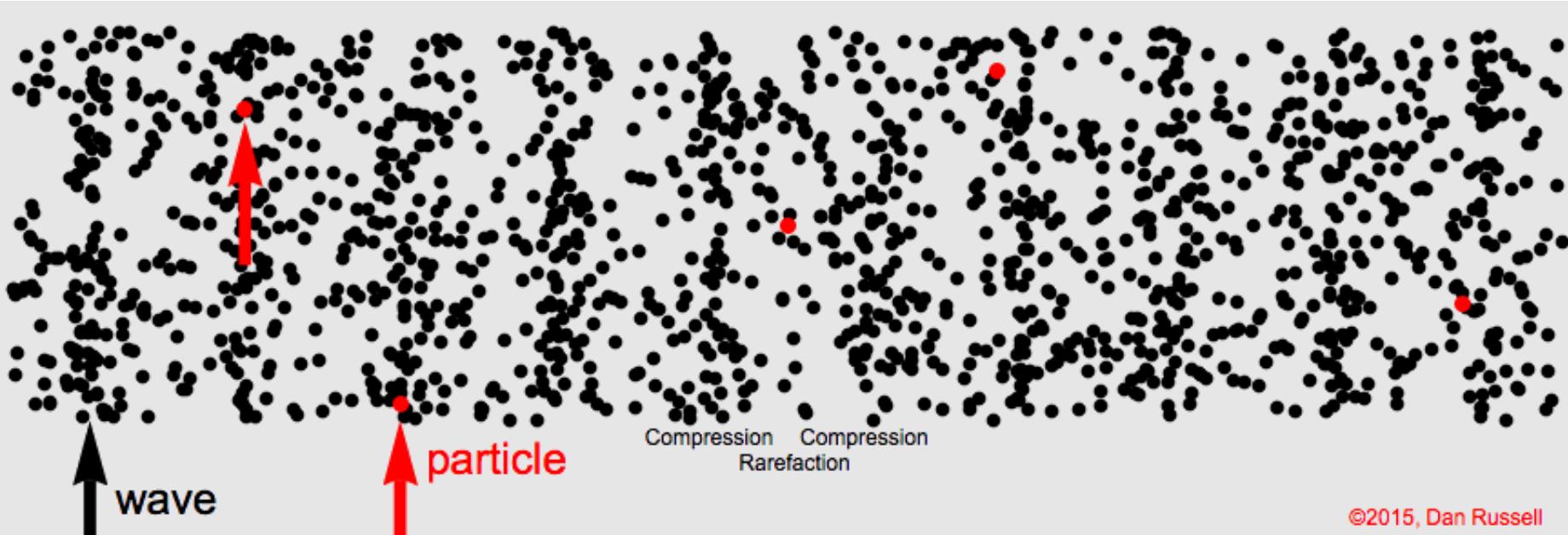
©2011. Dan Russell

Longitudinalwelle

Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage erfolgt in Ausbreitungsrichtung
(vgl. Luftschall, z.B. schwingende Luftsäule in einer Querflöte)

Animation: Daniel A. Russell (2011, 2015), <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>

Zwei verschiedene Schwingungsformen:



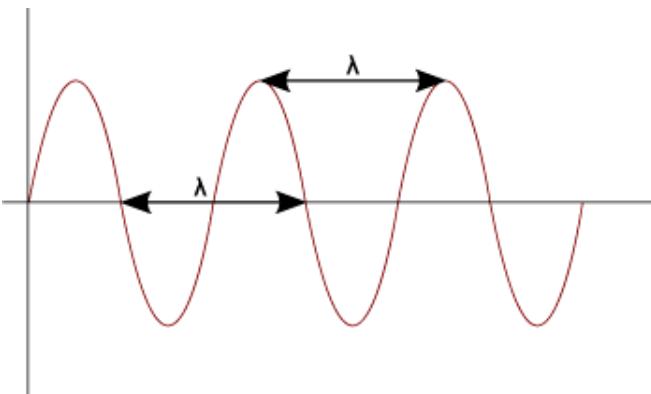
©2015, Dan Russell

Longitudinalwelle

Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage erfolgt in Ausbreitungsrichtung
(vgl. Luftschall, z.B. schwingende Luftsäule in einer Querflöte)

Animation: Daniel A. Russell (2015), <https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>

Die Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage lässt sich wie folgt charakterisieren (hier am Beispiel einer einfachen Sinusschwingung):

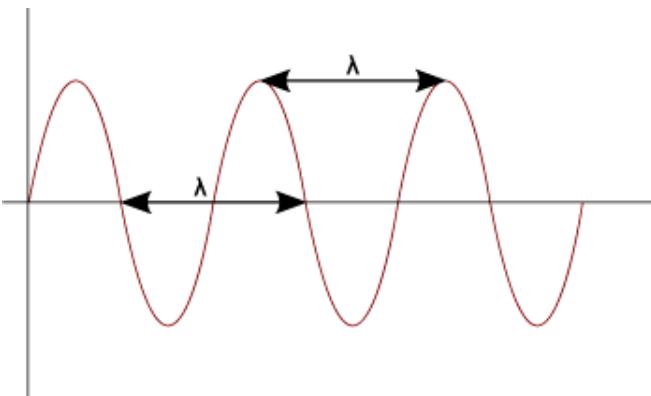


Die **Wellenlänge λ** (*griechisch: lambda*) entspricht dem kleinsten Abstand zweier Punkte gleicher Phase, d.h. mit der gleichen aktuellen Position der Auslenkung um die Ruhelage innerhalb des periodischen Schwingungsverlaufs.

Die Wellenlänge entspricht zeitlich der **Periodendauer T** , d.h. der Dauer in dem ein Teilchen eine komplette Schwingungsperiode durchläuft.

Die Wellenlänge beschreibt räumliche periodische Vorgänge, die Periodendauer beschreibt zeitliche periodische Vorgänge.

Die Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage lässt sich wie folgt charakterisieren (hier am Beispiel einer einfachen Sinusschwingung):



Die Wellenlänge λ steht (ebenso wie die Periodendauer T) im Zusammenhang mit der **Frequenz f** einer periodischen Schwingung. Hierbei gilt:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

mit c = Schallgeschwindigkeit

Exkurs: Die Schallgeschwindigkeit in einem idealen Gas ergibt sich aus:

$$c = \sqrt{\frac{kRT}{M_{mol}}}$$

mit

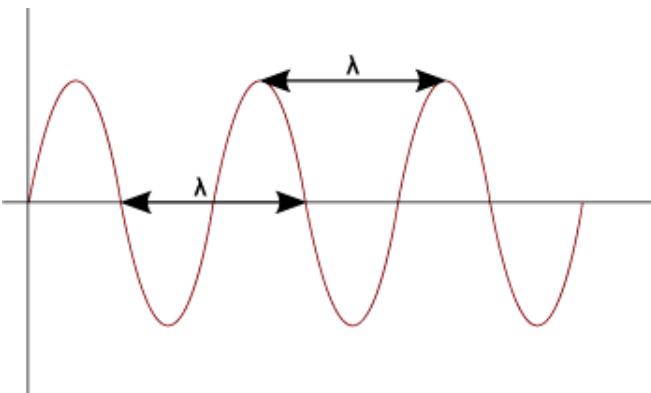
$$\text{Universelle Gaskonstante } R = 8,314 \frac{J}{mol \cdot Kelvin}$$

Adiabatenexponent $\kappa \approx 1,4$ (für zweiatomige Gase wie Sauerstoff)

$$\text{Molare Masse } M_{mol} \approx 0,029 \frac{kg}{mol}$$

Temperatur T [Kelvin]

Die Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage lässt sich wie folgt charakterisieren (hier am Beispiel einer einfachen Sinusschwingung):



Die Wellenlänge λ steht (ebenso wie die Periodendauer T) im Zusammenhang mit der **Frequenz f** einer periodischen Schwingung. Hierbei gilt:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

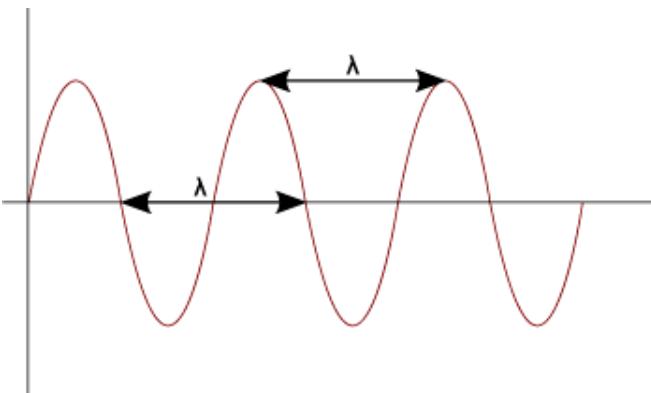
mit c = Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit c ist temperaturabhängig und beträgt bei 20°C etwa 343,5 m/s. Näherungsweise gilt:

$$c_{Luft} \approx (331 + 0,6 \vartheta) \frac{m}{s}$$

Mit ϑ = Temperatur in °C (gültig für den Temperaturbereich $-20^{\circ}\text{C} < \vartheta < +40^{\circ}\text{C}$)

Die Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage lässt sich wie folgt charakterisieren (hier am Beispiel einer einfachen Sinusschwingung):



Die Wellenlänge λ steht (ebenso wie die Periodendauer T) im Zusammenhang mit der **Frequenz f** einer periodischen Schwingung. Hierbei gilt:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

mit c = Schallgeschwindigkeit

Das heißt: je größer die Wellenlänge (bzw. die Periodendauer), desto niedriger die Frequenz (und auch die wahrgenommene Tonhöhe).

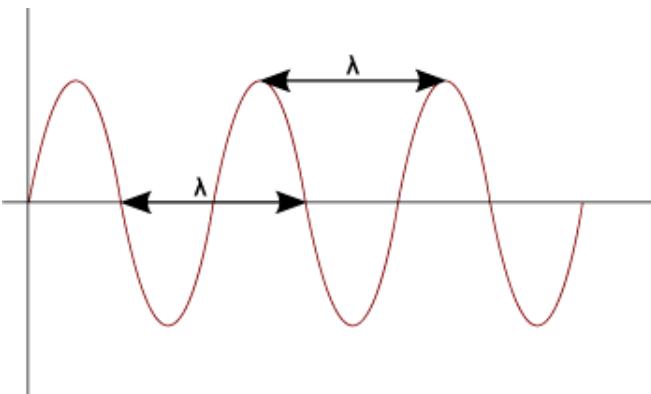
Entsprechend gilt für die Periodendauer:

$$f = \frac{1}{T}$$

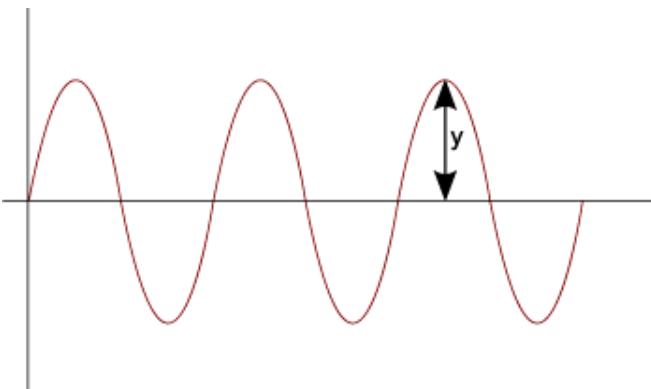
Die Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage lässt sich wie folgt charakterisieren (hier am Beispiel einer einfachen Sinusschwingung):

Frequenz in Hz	Wellenlänge in m	
20	17,150	Die Wellenlänge λ steht (ebenso wie die Periodendauer T) im Zusammenhang mit der Frequenz f einer periodischen Schwingung. Hierbei gilt:
30	11,433	
40	8,575	
50	6,860	
80	4,288	
100	3,430	$\lambda = \frac{c}{f}$
200	1,715	mit c = Schallgeschwindigkeit
300	1,143	
400	0,858	Das heißt: je größer die Wellenlänge (bzw. die Periodendauer),
500	0,686	desto niedriger die Frequenz (und auch die wahrgenommene
800	0,429	Tonhöhe).
1000	0,343	
2000	0,172	Entsprechend gilt für die Periodendauer:
3000	0,114	
4000	0,086	
5000	0,069	$f = \frac{1}{T}$
8000	0,043	
10000	0,034	
20000	0,017	

Die Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage lässt sich wie folgt charakterisieren (hier am Beispiel einer einfachen Sinusschwingung):



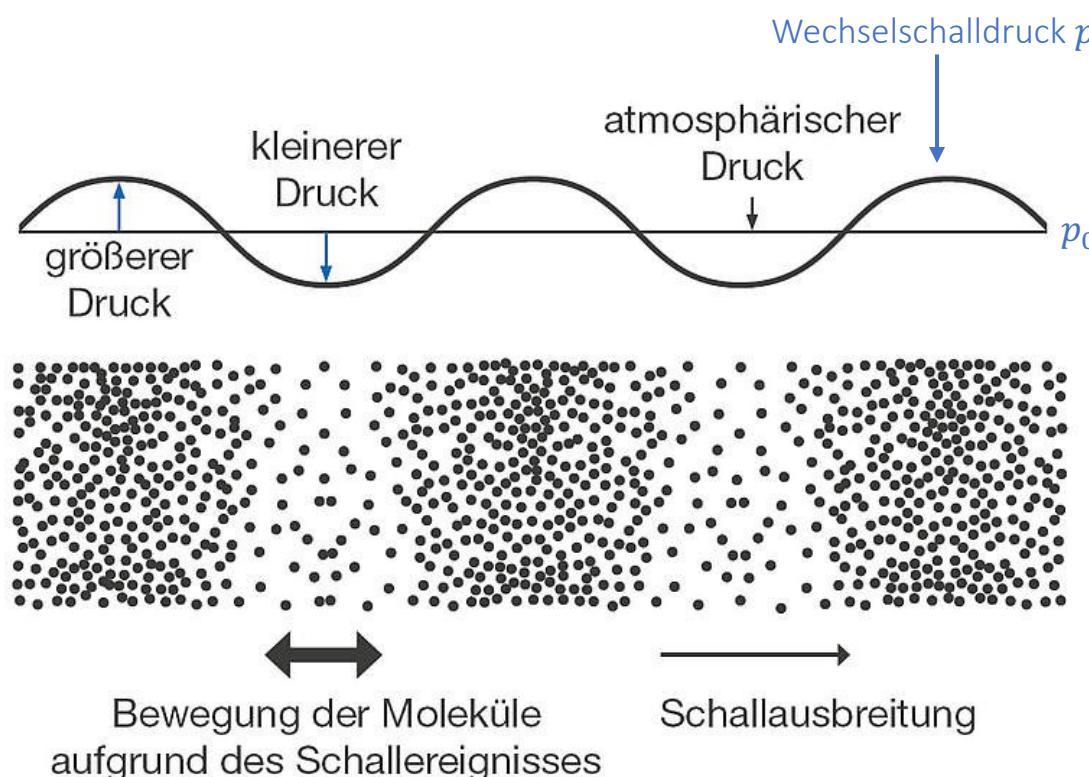
Die **Wellenlänge λ** (griechisch: *lambda*) entspricht dem kleinsten Abstand zweier Punkte gleicher Phase, d.h. mit der gleichen aktuellen Position der Auslenkung um die Ruhelage innerhalb des periodischen Schwingungsverlaufs.



Die Größe der Auslenkung der Teilchen um ihre Ruhelage (hier y) entspricht der **Amplitude** der Schwingung. Eine größere Amplitude führt letztlich zu einem größeren Lautstärkeindruck.

(vgl. Schalldruck)

Die Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage führt zu lokalen Luftdruckänderungen (Abweichungen vom statischen Luftdruck p_0) die als **Schalldruck** p bezeichnet werden.

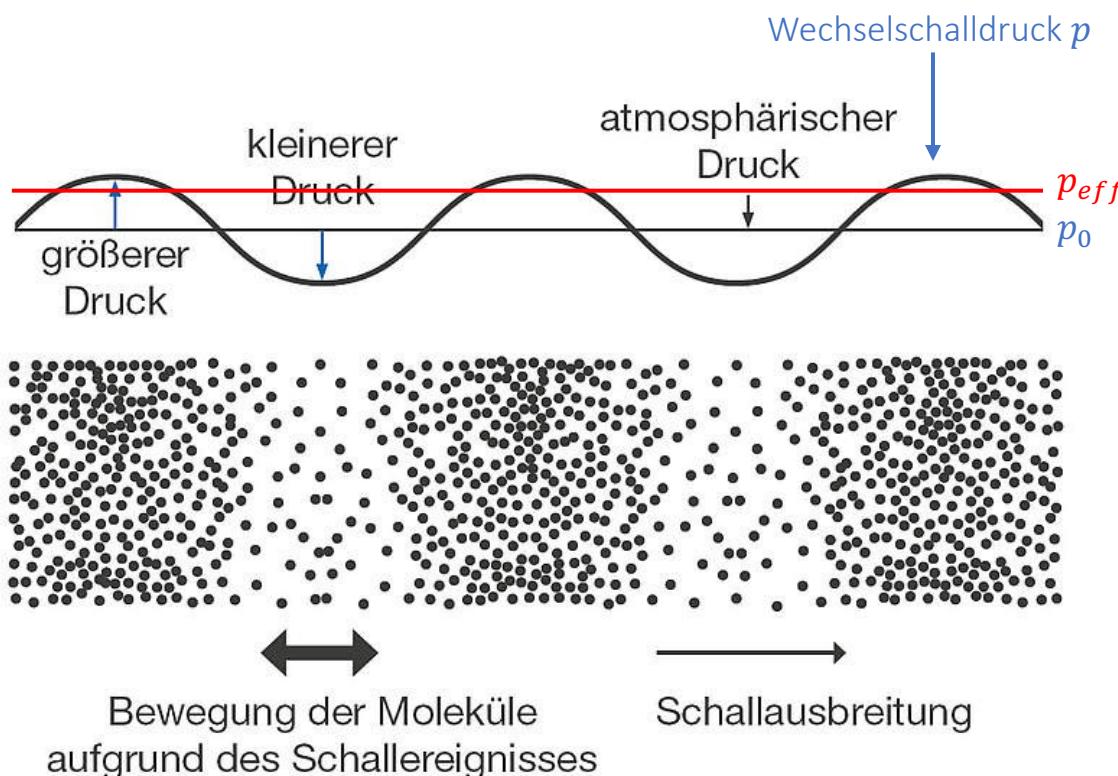


Der Gesamtschalldruck setzt sich zusammen aus dem statischen Luftdruck (atmosphärischen Druck) p_0 und dem Wechselchalldruck p .

$$p_{ges} = p_0 + p$$

Der Schalldruck wird in der Einheit Pascal $[Pa] = [N/m^2]$ angegeben.

Die Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage führt zu lokalen Luftdruckänderungen (Abweichungen vom statischen Luftdruck p_0) die als **Schalldruck** p bezeichnet werden.

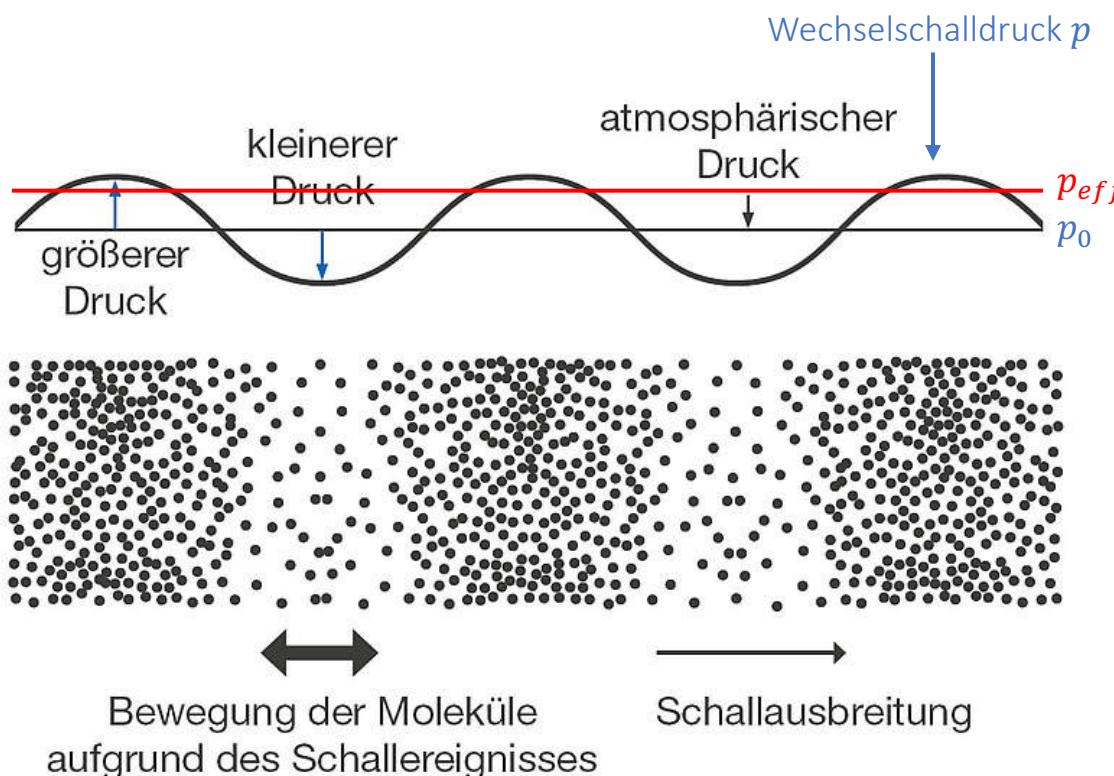


Während der Wechselchalldruck p die zeitliche Veränderung um die Ruhelage beschreibt, drückt der Effektivwert p_{eff} die Stärke des Schalldrucks als Einzahlwert aus.

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} = \sqrt{\overline{p^2}}$$

Berechnet wird also die Wurzel aus dem Mittelwert des Quadrats („root mean square“). Entsprechend wird der Effektivwert auch mit RMS abgekürzt.

Die Schwingung der Teilchen eines Mediums um die Ruhelage führt zu lokalen Luftdruckänderungen (Abweichungen vom statischen Luftdruck p_0) die als **Schalldruck** p bezeichnet werden.



Während der Wechselchalldruck p die zeitliche Veränderung um die Ruhelage beschreibt, drückt der Effektivwert p_{eff} die Stärke des Schalldrucks als Einzahlwert aus.

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} = \sqrt{\overline{p^2}}$$

Näherungsweise gilt:

$$p_{eff} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} p_{max}$$

D.h. der Effektivwert ist etwa um den Faktor 0,71 niedriger als der Maximalwert.

Um die auftretenden großen Schalldruckunterschiede besser handhaben zu können, wird in der Regel nicht der Schalldruck [Pa], sondern der Schalldruckpegel L_p in Dezibel [dB] verwendet.

Der Schalldruckpegel ist das 20fache logarithmierte Verhältnis des Schalldrucks zu einem vereinbarten Bezugsschalldruck p_0 .

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) dB$$

Als Bezugsschalldruck dient die sogenannte Ruhehörerschwelle.

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$$

Um die auftretenden großen Schalldruckunterschiede besser handhaben zu können, wird in der Regel nicht der Schalldruck p [Pa], sondern der Schalldruckpegel L_p in Dezibel [dB] verwendet.

Mit Kenntnis des Bezugsschalldrucks p_0 lässt sich aus einem Pegelwert der entsprechende Schalldruck berechnen.

Beispiel: Welchem Schalldruck p entspricht ein Schalldruckpegel von 94 dB SPL (SPL = sound pressure level)?

Um die auftretenden großen Schalldruckunterschiede besser handhaben zu können, wird in der Regel nicht der Schalldruck p [Pa], sondern der Schalldruckpegel L_p in Dezibel [dB] verwendet.

Mit Kenntnis des Bezugsschalldrucks p_0 lässt sich aus einem Pegelwert der entsprechende Schalldruck berechnen.

Beispiel: Welchem Schalldruck p entspricht ein Schalldruckpegel von 94 dB SPL (SPL = sound pressure level)?

$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}} \text{ Pa}$$

$$2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{94}{20}} \approx 1 \text{ Pa}$$

Statt einem absoluten Schalldruckpegel mit entsprechendem Schalldruck, kann auch das Verhältnis zweier Schalldrücke zueinander als Pegel ausgedrückt werden.

Der Relativpegel ergibt sich aus dem Verhältnis eines Schalldrucks p_1 zu einem anderem Schalldruck p_2 .

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p_1}{p_2} \right) dB$$

In diesem Fall entspricht eine Erhöhung des Pegels um 6 dB einer Verdopplung des Schalldrucks:

$$10^{\frac{L_p}{20}} = \frac{p_1}{p_2}$$

$$10^{\frac{6}{20}} \approx 2$$

Schalldruck und Schalldruckpegel von Alltagsgeräuschen und für musikalische Schallsignale an einem typischen Hörplatz:

	Schalldruck p [Pa]	Schalldruckpegel L _p [dB SPL]
Hörschwelle bei 1 kHz	$2 \cdot 10^{-5}$	0
Aufmerksames Publikum im Konzertaal	$2 \cdot 10^{-3}$	40
Sinfonieorchester im <i>piano</i>	$2 \cdot 10^{-2}$	60
Sinfonieorchester im <i>forte</i>	$2 \cdot 10^{-1}$	80
Sinfonieorchester im im <i>fortissimo am Dirigentenplatz</i>	2	100
Start von Düsenflugzeugen aus 200 m Entfernung	20	120
Schmerzgrenze	200	140

Neben dem Schalldruckpegel sind der Schallintensitätspegel und der Schallleistungspegel noch wichtige Kenngrößen. Diese sind jedoch abweichend definiert:

Pegelgröße	Definition	Bezugsgröße
Schallleistungspegel	$10\log\left(\frac{P}{P_0}\right) \text{ dB}$	$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$
Schallintensitätspegel	$10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) \text{ dB}$	$I_0 = 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$
Schalldruckpegel	$10\log\left(\frac{p^2}{p_0^2}\right) \text{ dB} = 20\log\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ dB}$	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

Schallleistung: abgegebene Schallenergie pro Zeiteinheit

Schallintensität: Schallleistung, die je Flächeneinheit durch eine durchschallte Fläche tritt

Beziehung zwischen Schallleistung(spegel), Schallintensität(speigel) und Schalldruck(pegel):

Pegelgröße	Bedeutung	Bezugsgröße
Schallleistungspegel	abgegebene Schallenergie einer Schallquelle pro Zeiteinheit unabhängig von Ort und Entfernung → „Ursache“	$P = I \cdot A = p \cdot v \cdot A$ Schallleistung = Produkt aus Schallintensität I und der durchschallten Fläche A
Schallintensitätspegel	Schallleistung, die je Flächeneinheit durch eine durchschallte Fläche tritt	$I = p \cdot v [W/m^2]$ Schallintensität = Produkt aus Schalldruck $p [Pa]$ und Schallschnelle $v [m/s]$
Schalldruckpegel	an einem bestimmten Punkt verursachter Schalldruck → „Wirkung“	$p = \frac{F}{A}$ Schallwechseldruck p = auf die Fläche A wirkende Kraft F je Flächeninhalt von A

Schallintensitätspegel vs. Schalldruckpegel:

Verhältnis der Intensität einer sinusförmigen Schallwelle I zum Wert der durchschnittlichen Druckänderung Δp in Luft.

$$I = \frac{\Delta p^2}{c\delta}$$

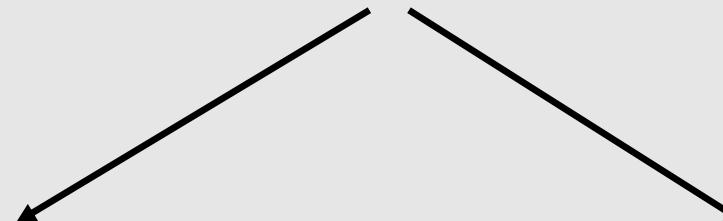


Da sich die Schallgeschwindigkeit c und die Luftdichte δ in natürlichen Umgebungen vergleichsweise geringfügig ändern, kann deren Einfluss vernachlässigt werden.

Näherungsweise gilt:

Die Schallintensität ist proportional zur Druckänderung.

$$I \sim p^2$$



Schallintensität

Schalldruck

$$10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ dB}$$

$$10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB}$$

Pegel-Änderung	Spannung Schalldruck	Schallleistung Schallintensität
+40 dB	100	10000
+30 dB	31,6	1000
+20 dB	10	100
+10 dB	3,16 = $\sqrt{10}$	10
+6 dB	2,0 = Verdopplung	4,0
+3 dB	1,414-fach = $\sqrt{2}$	2,0 = Verdopplung
----- ±0 dB -----	----- 1,0 -----	----- 1,0 -----
-3 dB	0,707-fach	0,5 = Halbierung
-6 dB	0,5 = Halbierung	0,25
-10 dB	0,316	0,1
-20 dB	0,100	0,01
-30 dB	0,0316	0,001
-40 dB	0,0100	0,0001
Log. Größe	Feldgröße	Energiegröße
dB-Änderung	Amplitudenfaktor	Leistungsfaktor

Quelle:
[http://www.sengpielaudio.com/
Rechner-schallgroessen.htm](http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgroessen.htm)

Schalldruck vs Schallintensität

Der **Schalldruck** (Amplitude) nimmt bei zunehmender Entfernung von der Schallquelle mit $1/r$ ab (reziprokes Abstandsgesetz).

Der **Schalldruckpegel** nimmt bei Verdopplung des Abstands um **(-)6 dB** ab, also auf **1/2 (50 %)** des Schalldruck-Anfangswerts.

Die **Schallintensität** (Energie) nimmt bei zunehmender Entfernung von der Quelle mit $1/r^2$ ab (reziprokes Quadratgesetz).

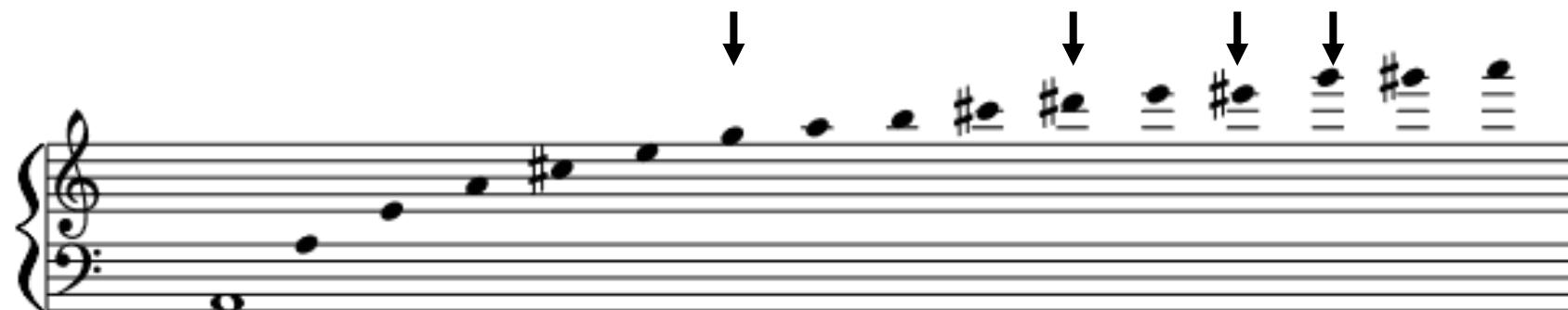
Der **Schallintensitätspegel** nimmt bei Verdopplung des Abstands um **(-)6 dB** ab, also auf **1/4 (25 %)** des Intensitäts-Anfangswerts.

Musikalische Akustik

Grundfrequenz und Obertöne von Instrumentalklängen

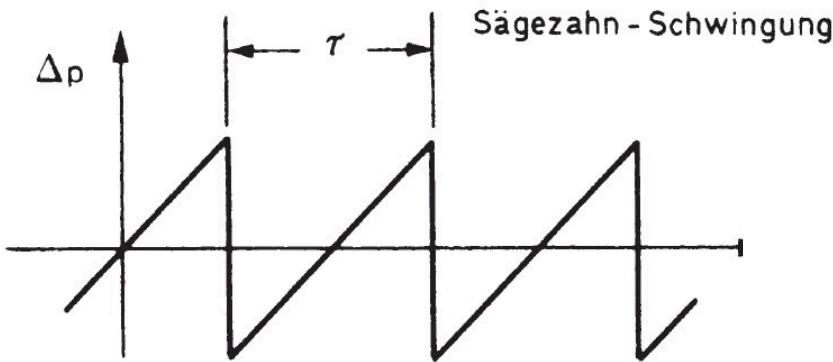
Ein Instrumentalklang besteht nicht aus einem einzelnen Ton einer Frequenz, sondern aus einer Überlagerung des Grundtons mit ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz. Diese ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz heißen Harmonische, Teiltöne, Partialtöne oder Obertöne.

Während die Grundfrequenz für den Tonhöheneindruck verantwortlich ist, bestimmt die Zusammensetzung der Obertöne die Klangfarbe.



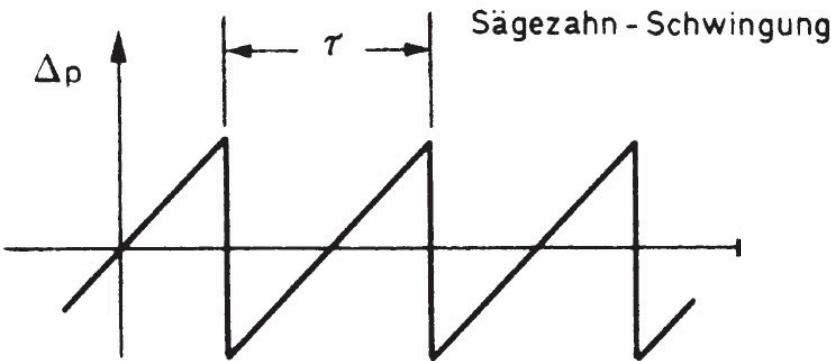
Oberton	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Ordnungszahl (Harmonische, Teilton, Partialton)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Frequenz [Hz]	110	220	330	440	550	660	770	880	990	1100	1210	1320	1430	1540	1650	1760

Überlagerung von Schwingungen

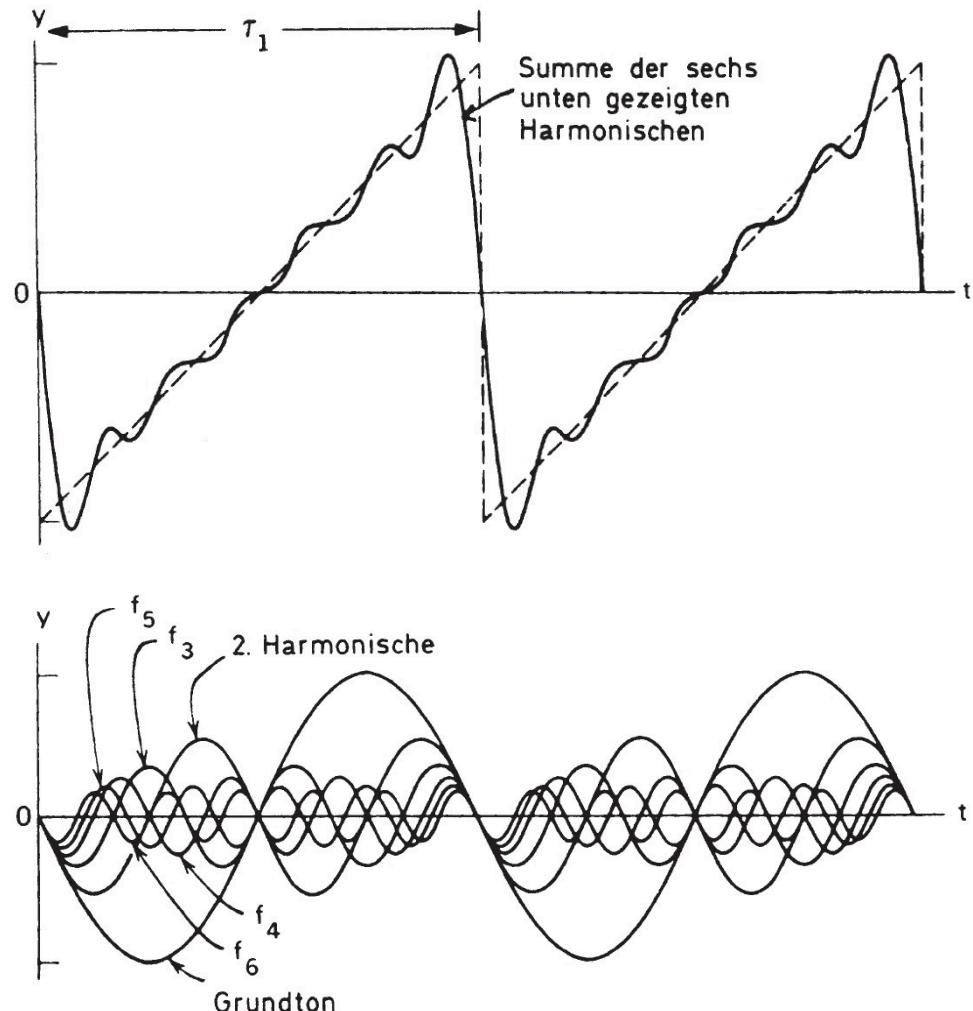


Darstellung einer Sägezahn-Schwingung, der idealisierten Schwingungsform einer gestrichenen Saite.

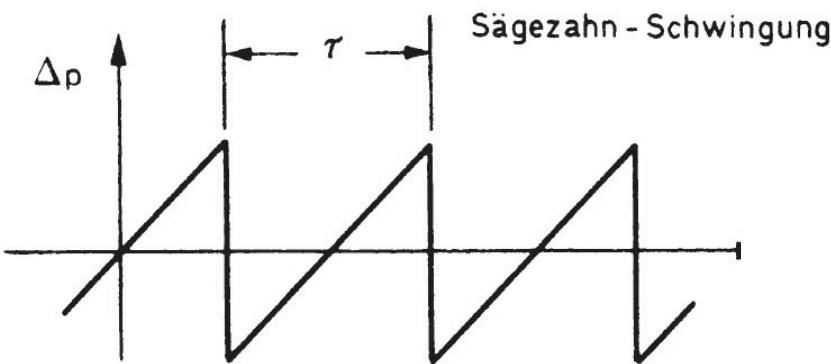
Überlagerung von Schwingungen



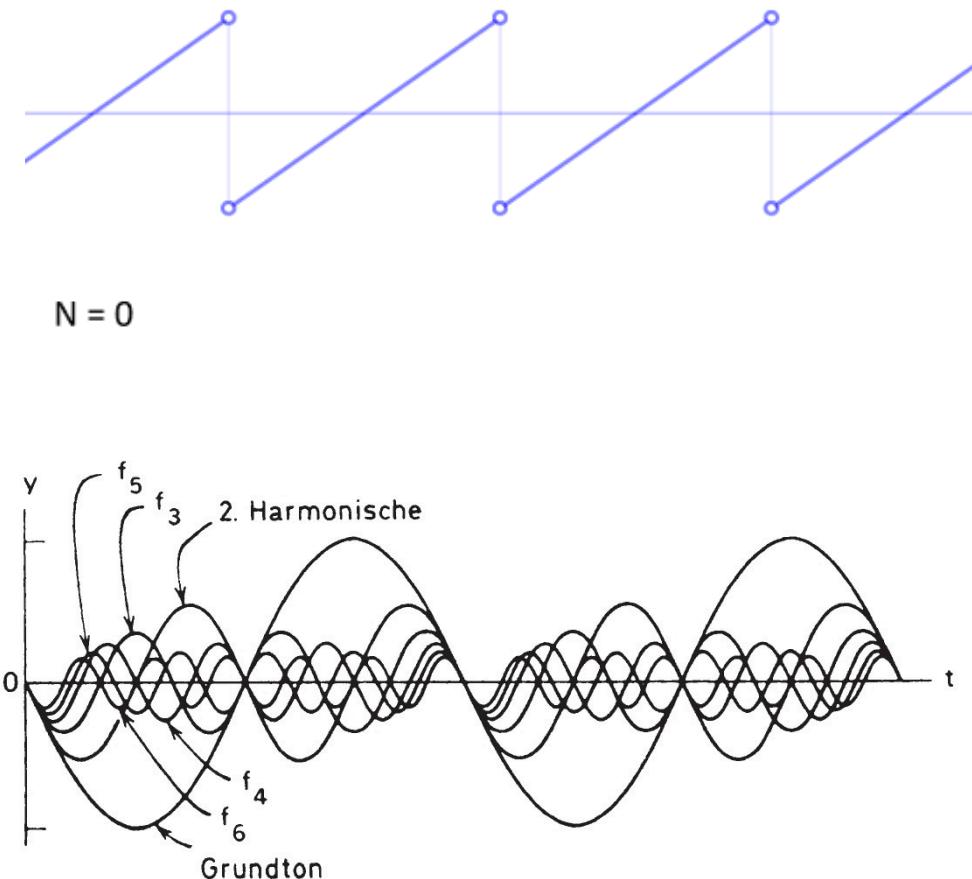
Annäherung einer Sägezahn-Schwingung, durch die Überlagerung von Sinusschwingungen (Fourier-Synthese).

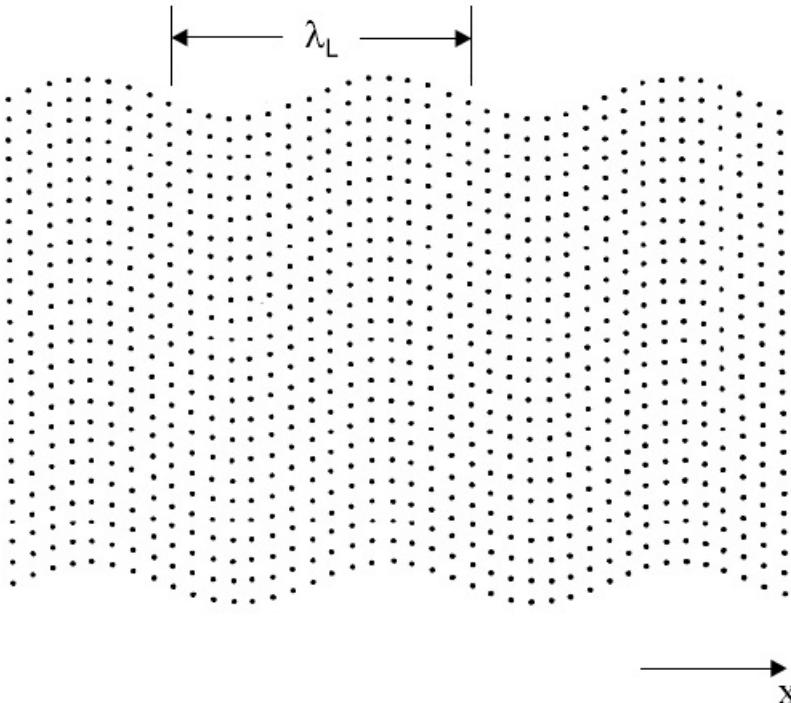


Überlagerung von Schwingungen

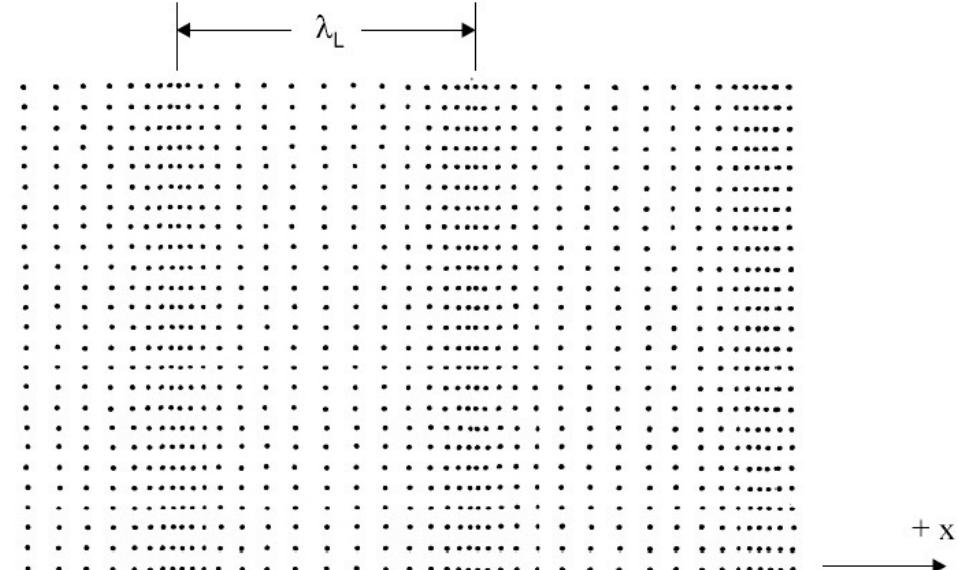


Annäherung einer Sägezahn-Schwingung, durch die Überlagerung von Sinusschwingungen (Fourier-Synthese).

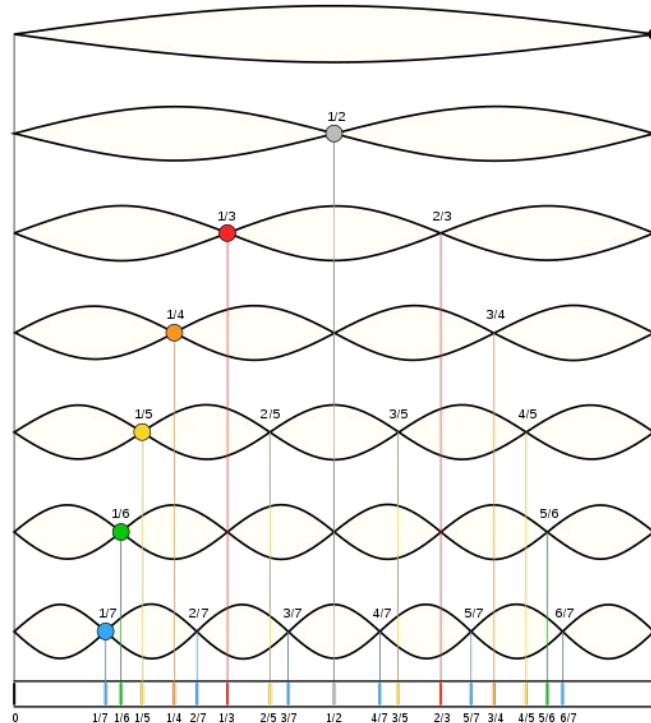




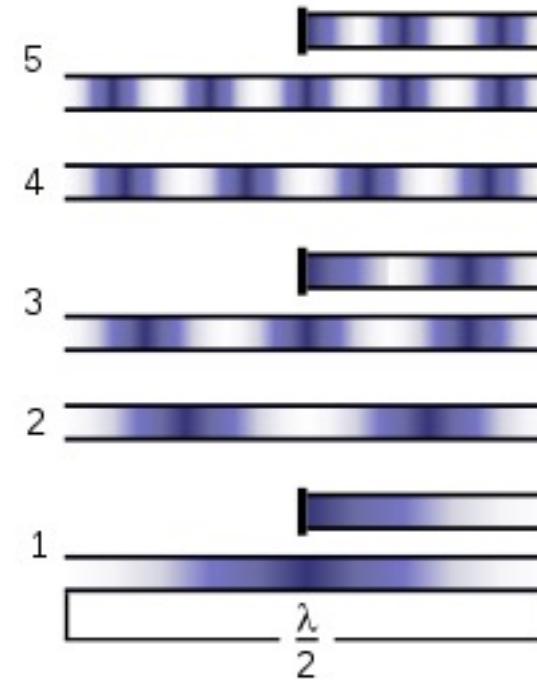
Transversalwelle
(z.B. schwingende Saite)



Longitudinalwelle
(z.B. Querflöte)

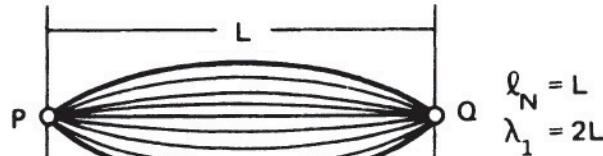


Grundschwingung und Harmonische einer Transversalwelle
(z.B. schwingende Saite)



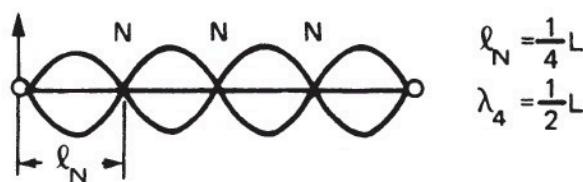
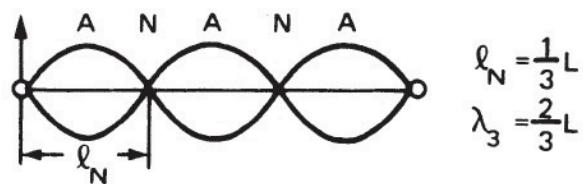
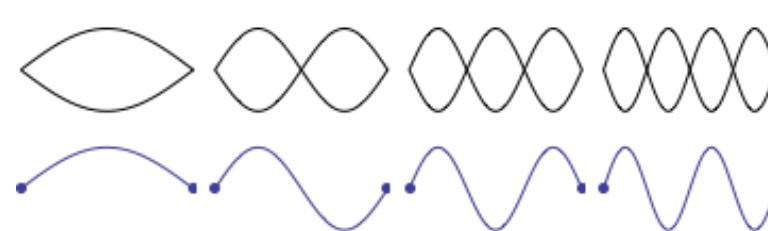
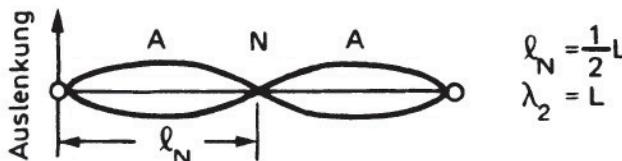
Grundschwingung und Harmonische einer Longitudinalwelle

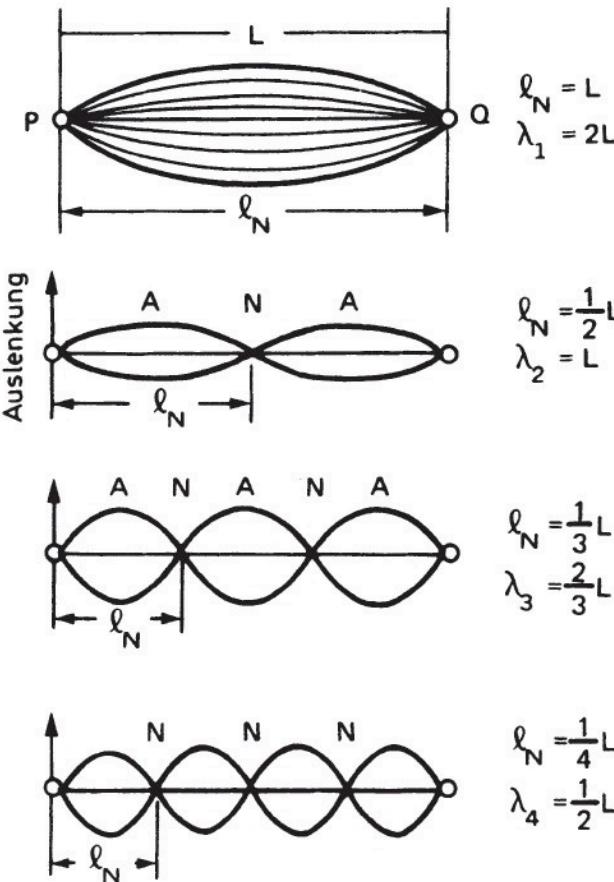
- bei offenen Röhren (z.B. Querflöte)
- Bei gedackten Röhren (z.B. Oboe)



Grundschwingung und Harmonische einer schwingenden Saite

Es sind nur Wellenformen möglich, bei denen sich in P und Q ein Schwingungsknoten befindet.





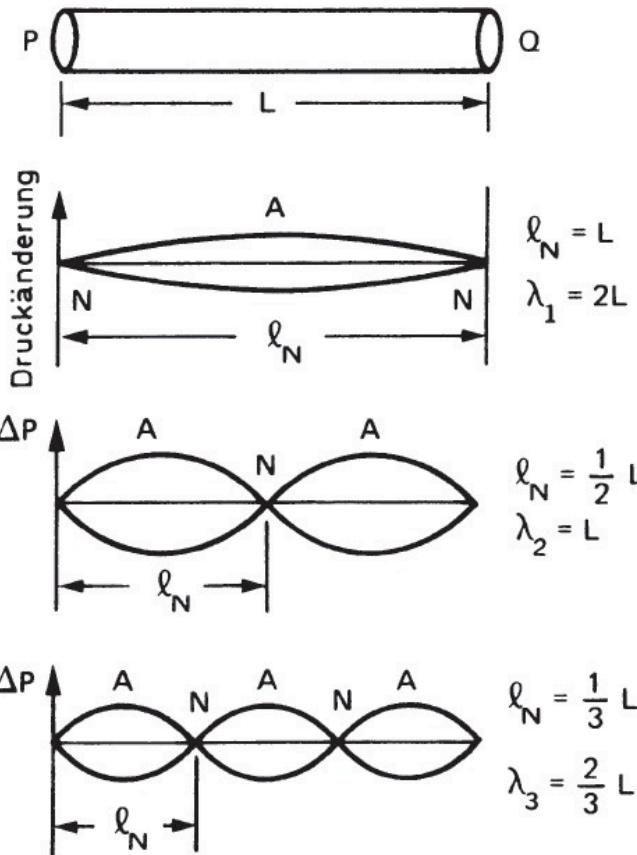
Grundschwingung und Harmonische einer schwingenden Saite

Es sind nur Wellenformen möglich, bei denen sich in P und Q ein Schwingungsknoten befindet.

In Abhängigkeit von der Länge der Saite L sind nur folgende Wellenlängen möglich:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}$$

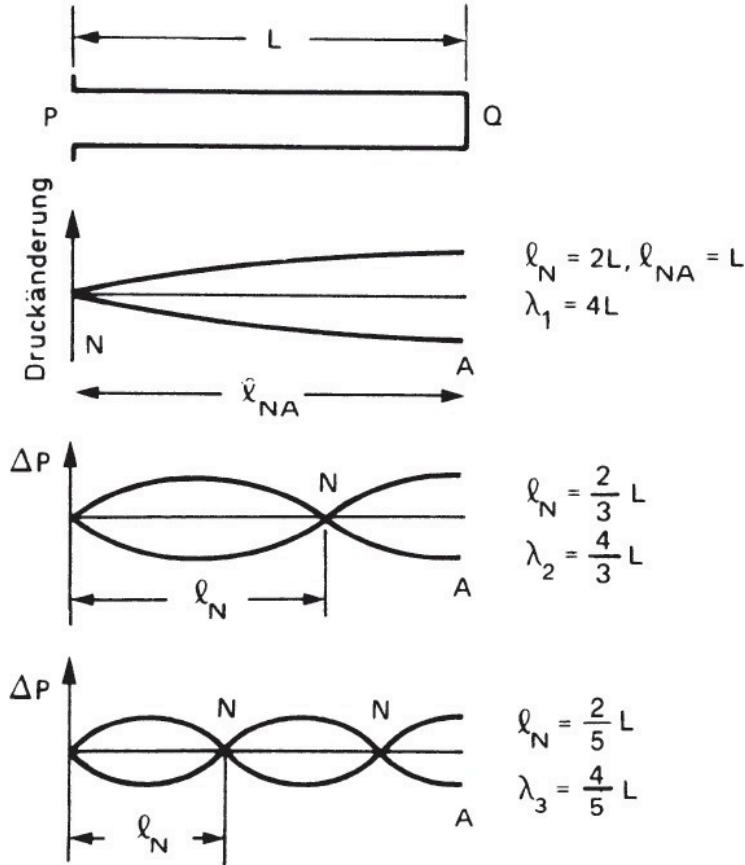
Eine Saite kann daher nur in ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz schwingen.



Grundschwingung und Harmonische in einer beidseitig offen Röhre

Es sind nur Wellenformen möglich, bei denen sich an den offenen Enden P und Q ein Druckknoten befindet.

Die Luftsäule kann daher nur in ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz schwingen.

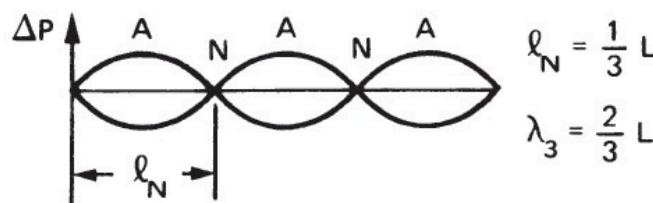
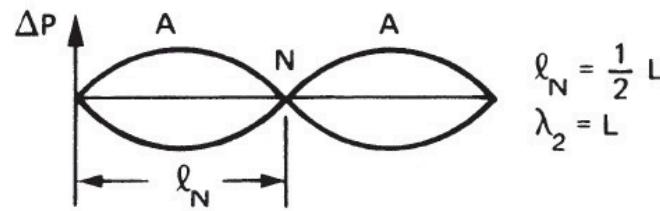
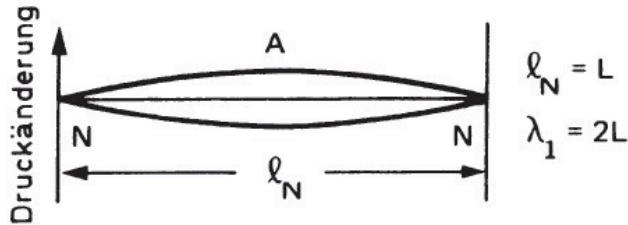
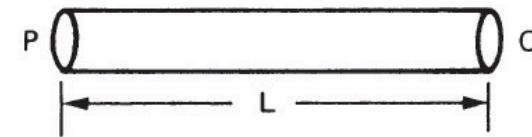


Grundschwingung und Harmonische in einer gedackten (einseitig geschlossenen) Röhre

Es sind nur Wellenformen möglich, die einen Druckknoten am offenen und einen Druckbauch am geschlossenen Ende aufweisen.

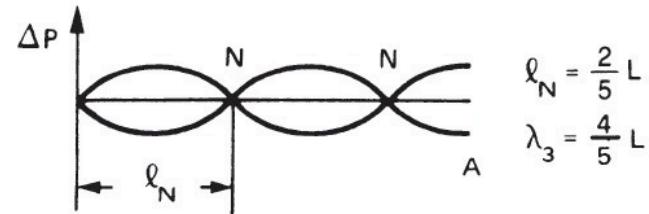
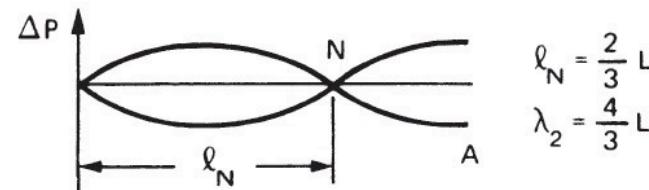
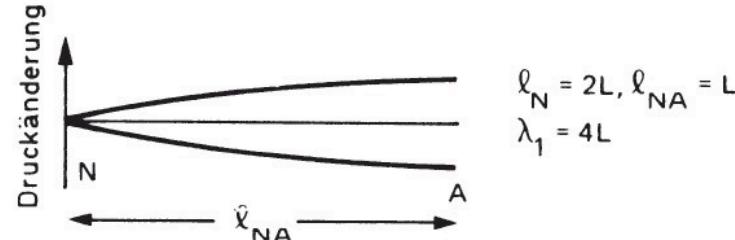
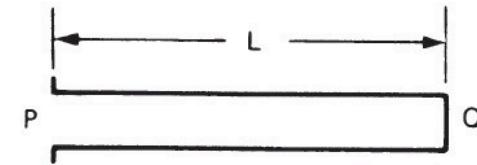
Die Luftsäule kann daher nur in ungeraden ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz schwingen.

Die Grundfrequenz einer gedackten Röhre liegt eine Oktave tiefer als die Grundfrequenz einer beidseitig offenen Röhre gleicher Länge.

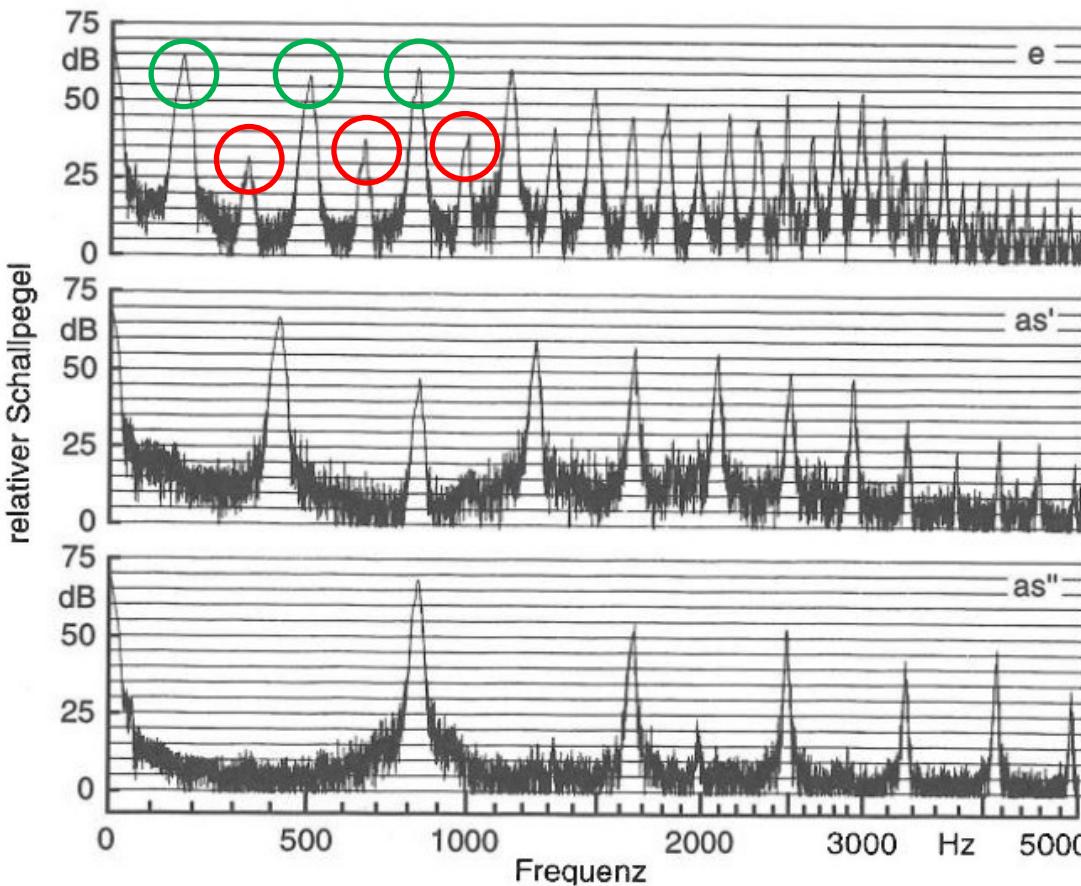


Beidseitig offene Röhre

(Abb. Roederer 2000, 156 und 158)



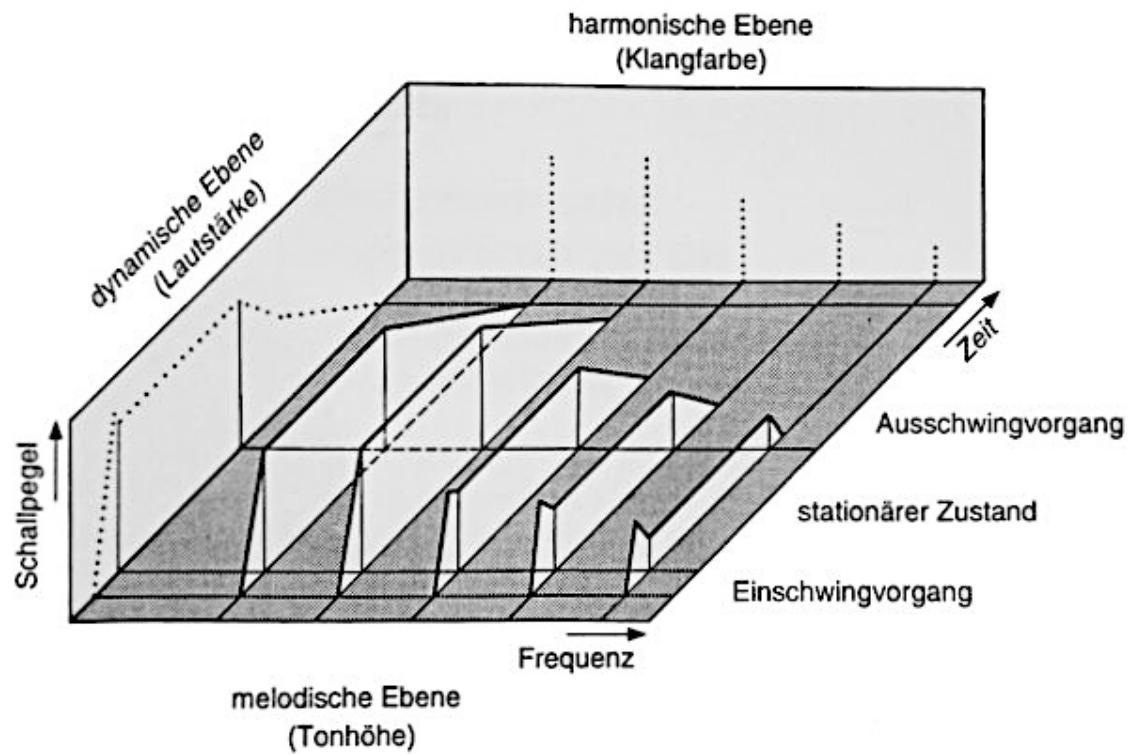
Gedackte (einseitig geschlossene) Röhre



Frequenzspektrum verschiedener Klarinettentöne

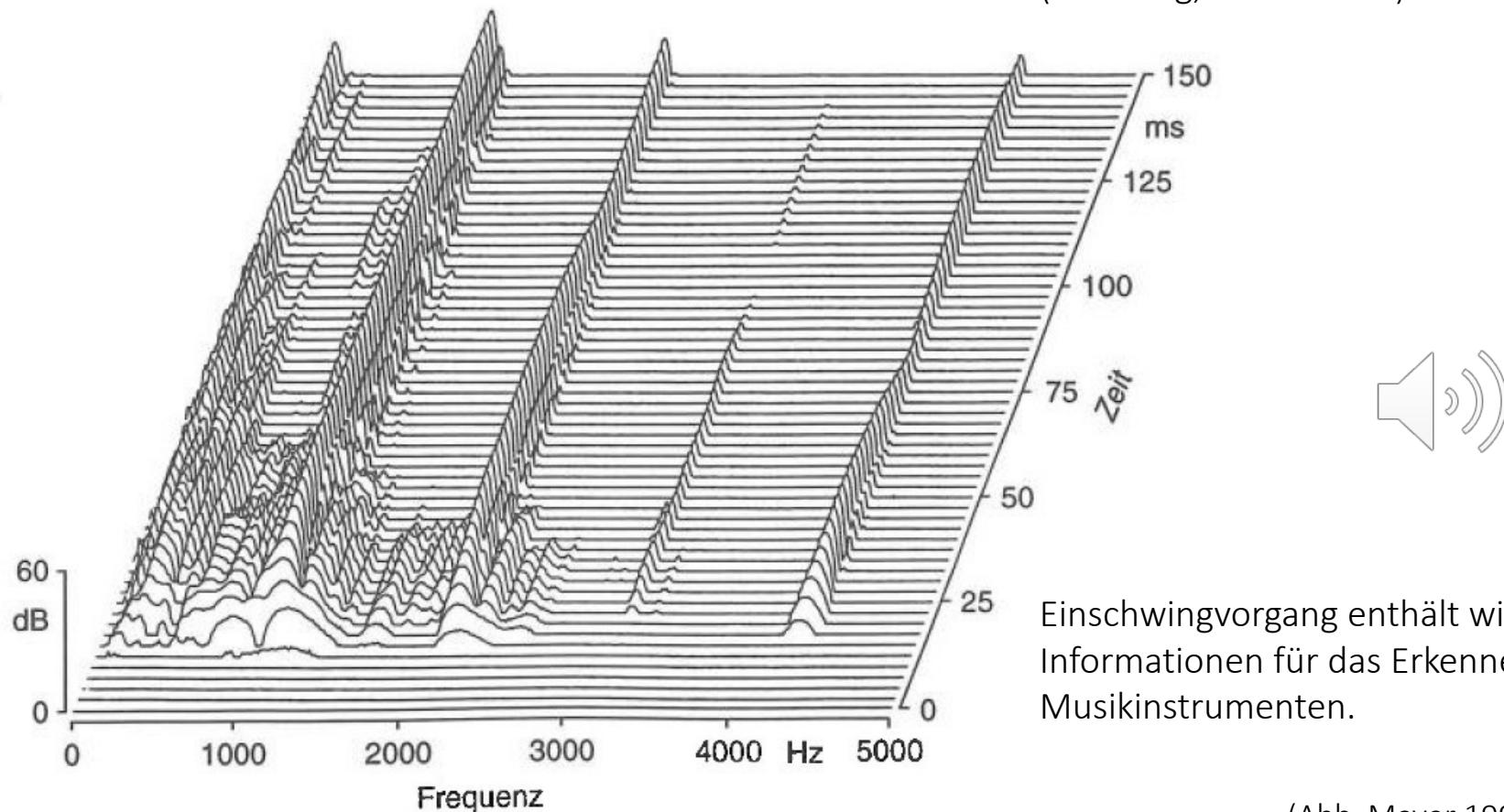
Bei der Klarinette mit ihrer einseitig geschlossenen Röhre (Rohrblattinstrument) zeigt das Frequenzspektrum eine stärkerer Ausprägung der ungeraden Partialtöne (grün) im Vergleich zu den geraden Partialtönen (rot).

Zeitlicher Verlauf eines Klangspektrums
(schematisch)

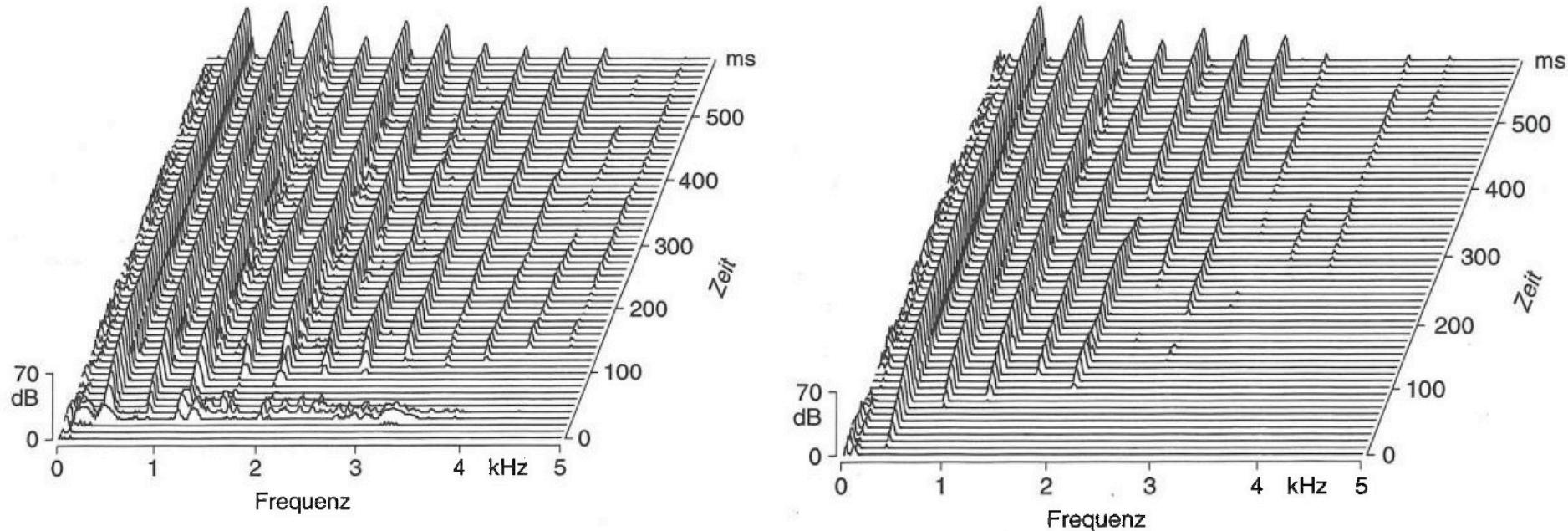


(Abb. Mayer 1999, 27)

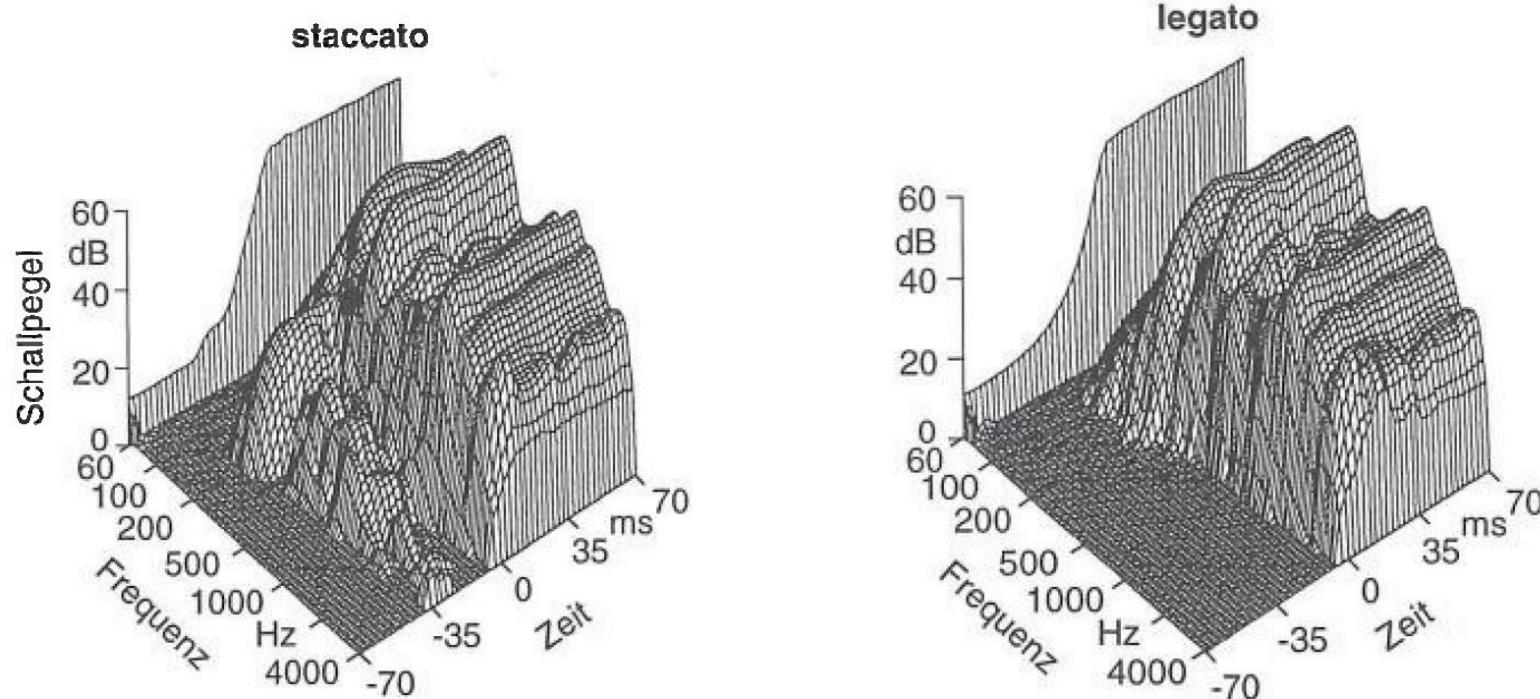
Zeitlicher Verlauf eines Klangspektrums
(Messung, Klavierton c)



(Abb. Mayer 1999, 27)



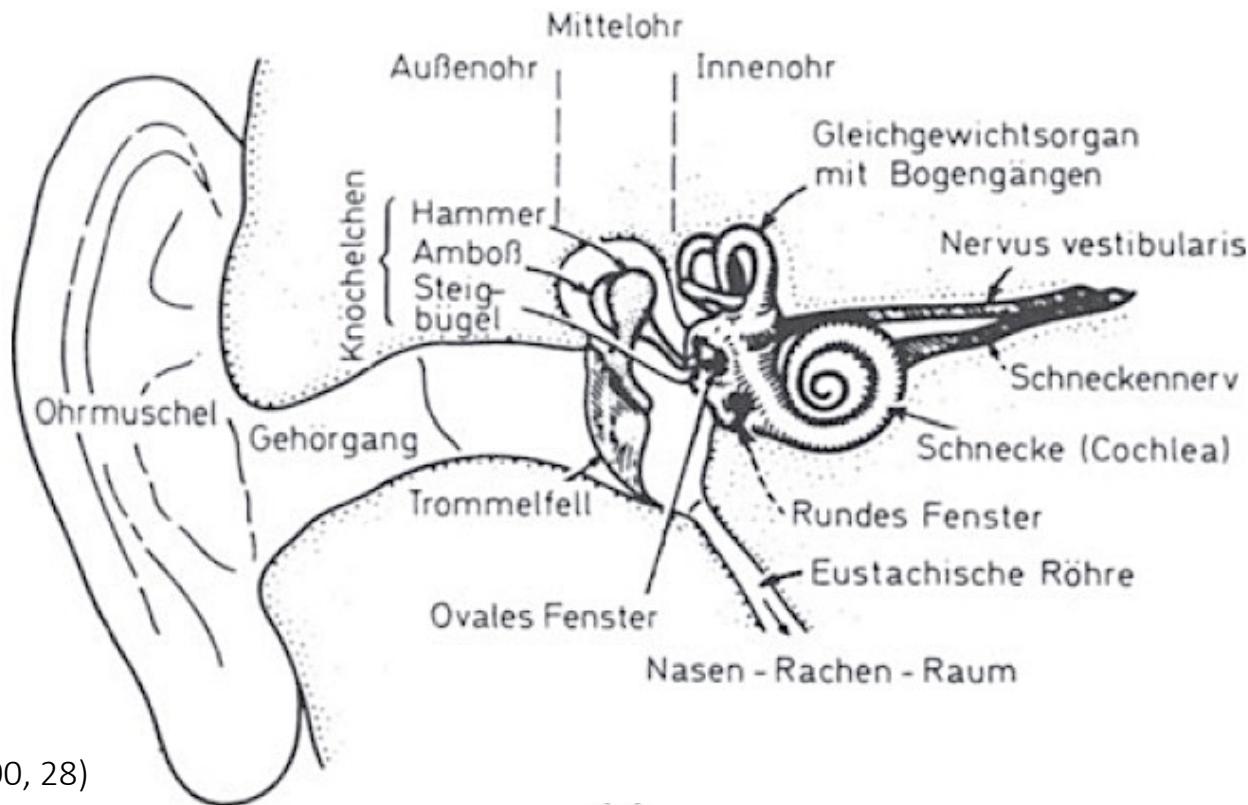
Einfluss des Tonansatzes auf den zeitlichen Verlauf des Frequenzspektrum eines Flötentones (g)
(links: scharf, rechts: weich).



Einfluss der Artikulation auf den zeitlichen Verlauf des Frequenzspektrum eines Klaviertones (c)
(links: staccato, rechts: legato).

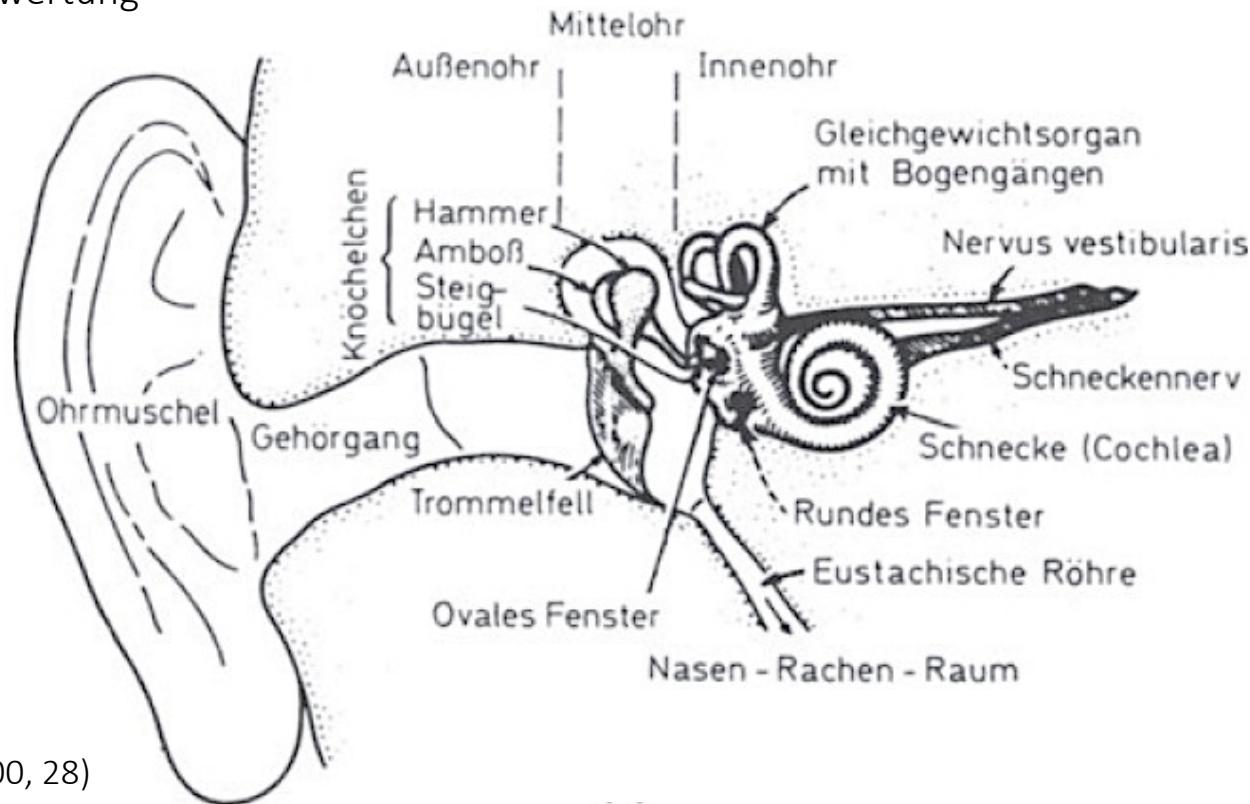
Psychoakustik

Das menschliche Ohr



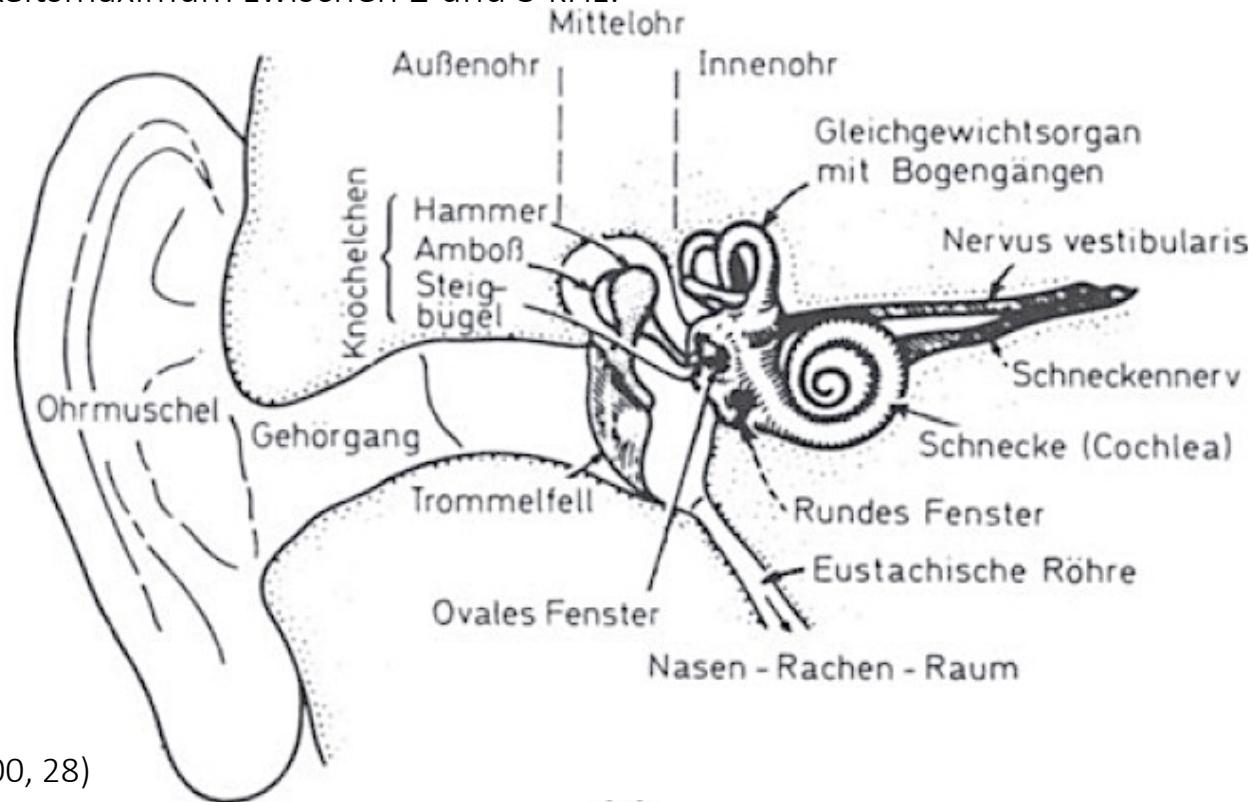
Außenohr (Ohrmuschel und Gehörgang):

- Schallsammlung
- Richtungsbewertung
- Spektrale Bewertung



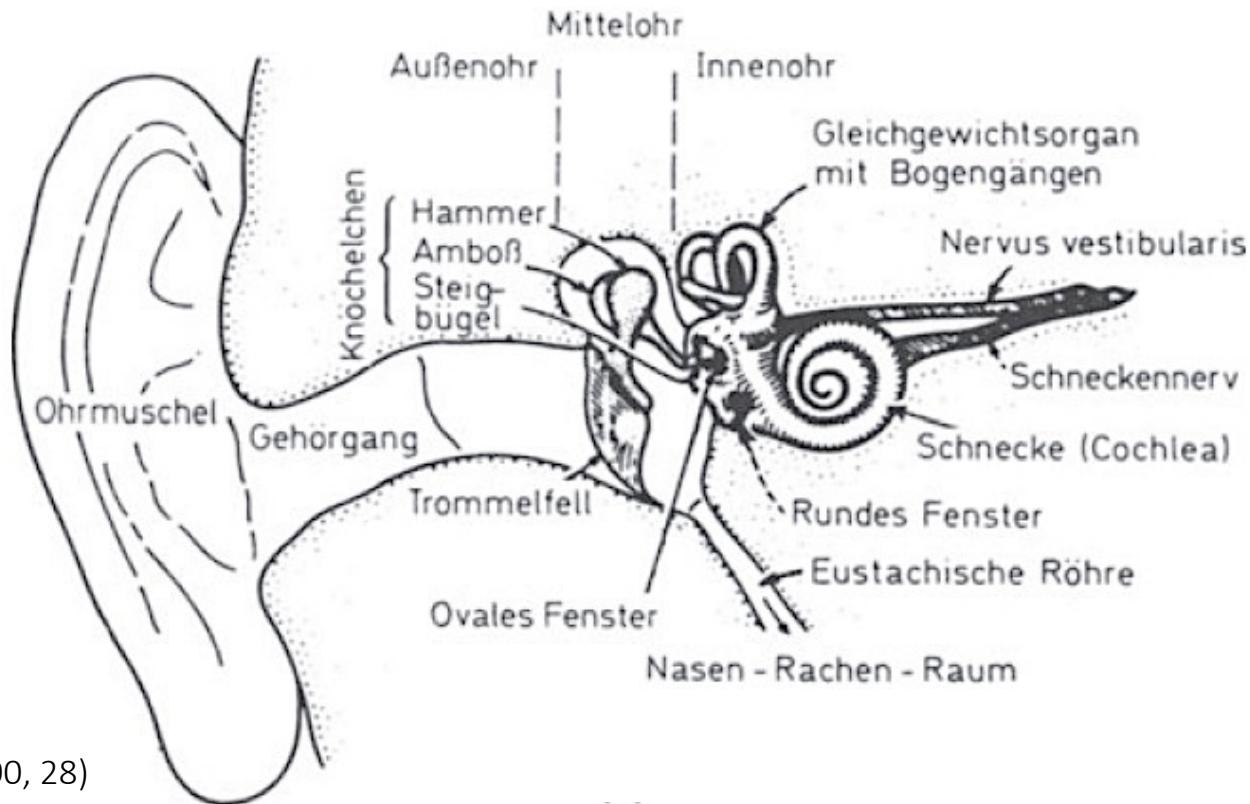
Gehörgang:

- Länge ca. 28-32 mm, Durchmesser ca. 8 mm
- Entspricht gedackter Röhre mit Grundfrequenz bei $\lambda/4$.
- Empfindlichkeitsmaximum zwischen 2 und 5 kHz.



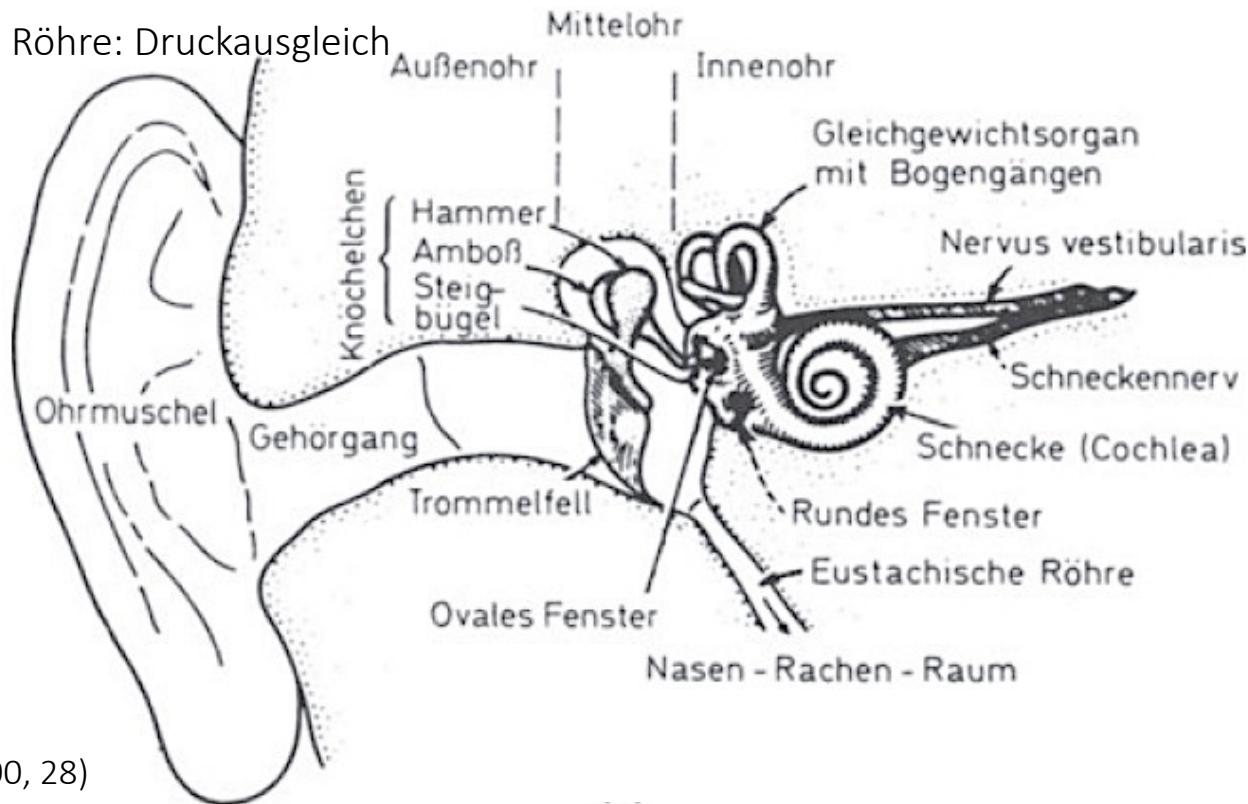
Mittelohr (Funktion):

- Umsetzung von Luftschwingung in mechanische Schwingung
- Druckverstärkung



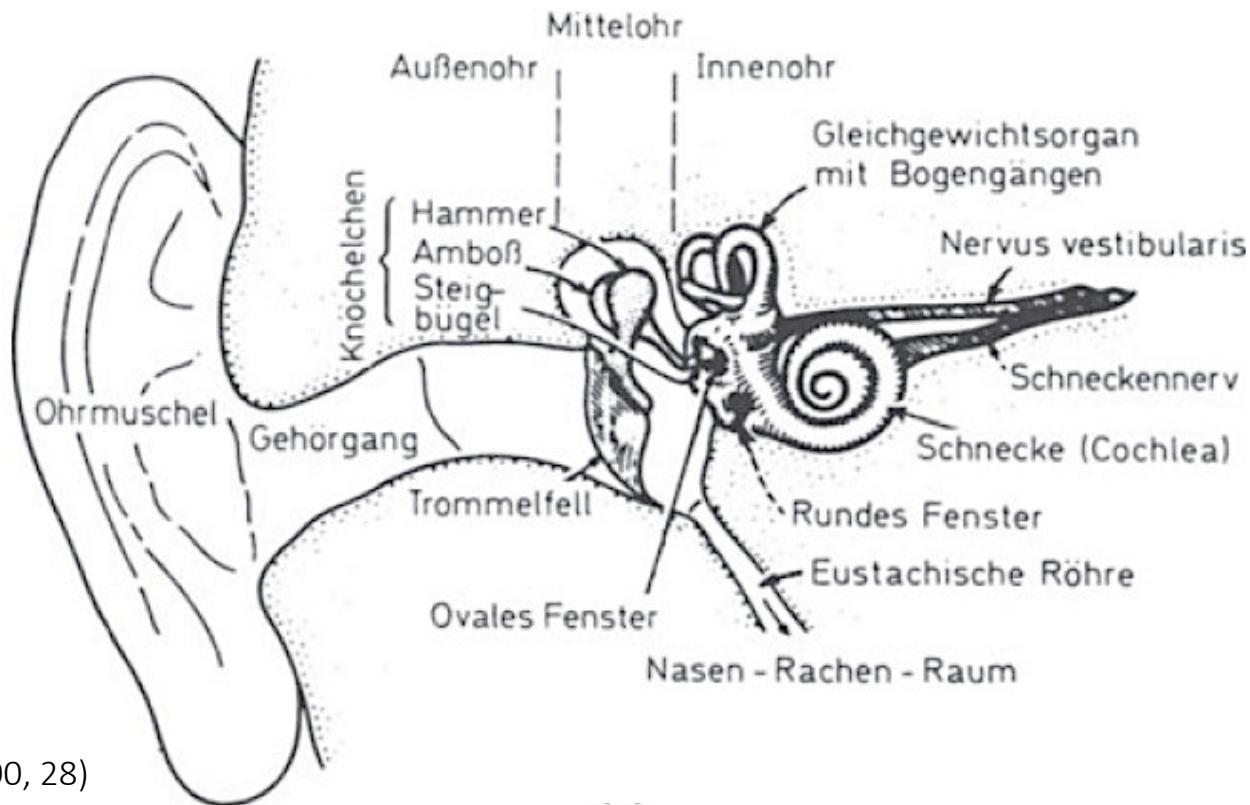
Mittelohr (Aufbau):

- Trommelfell
- Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss, Steigbügel):
Verstärkung durch Hebelwirkung und Flächenreduktion
- Eustachische Röhre: Druckausgleich

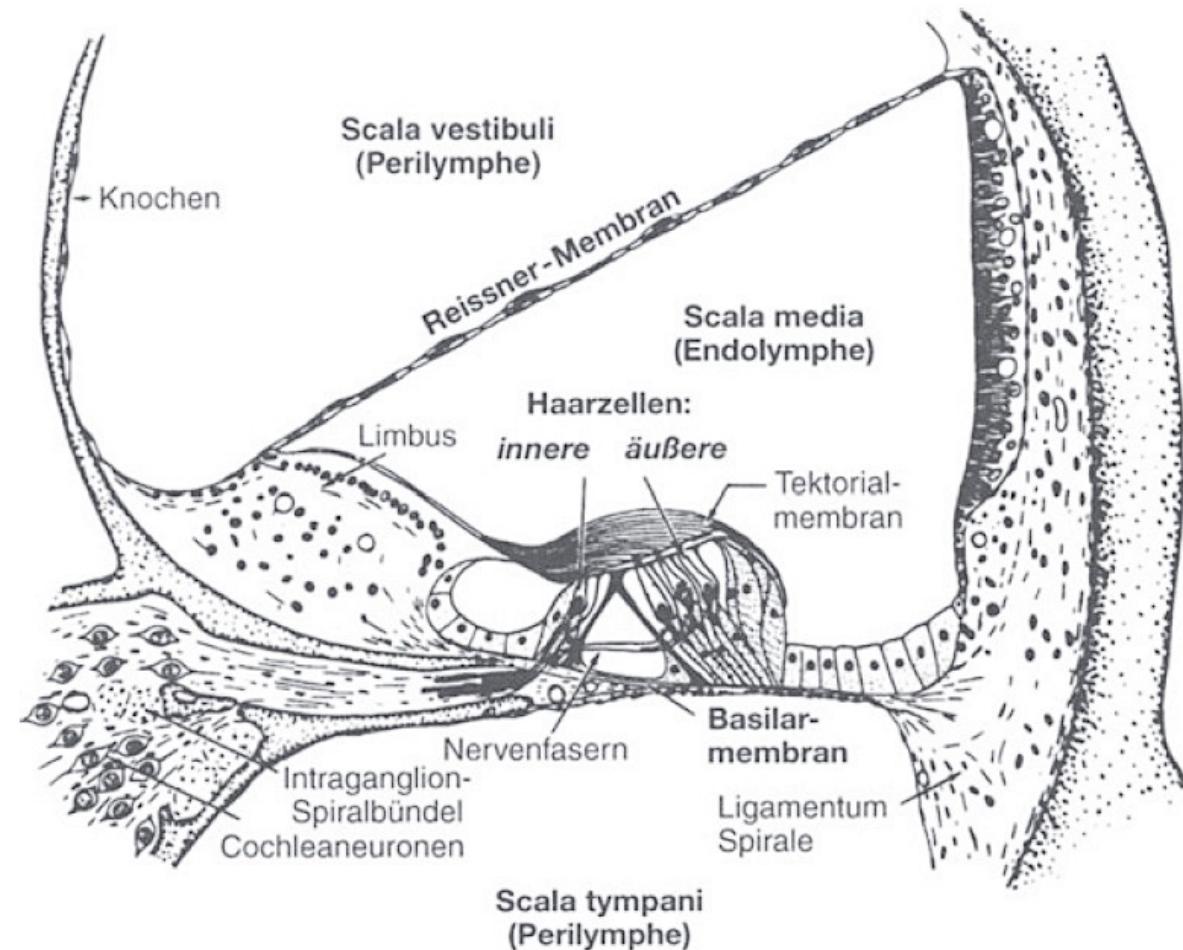


Innenohr:

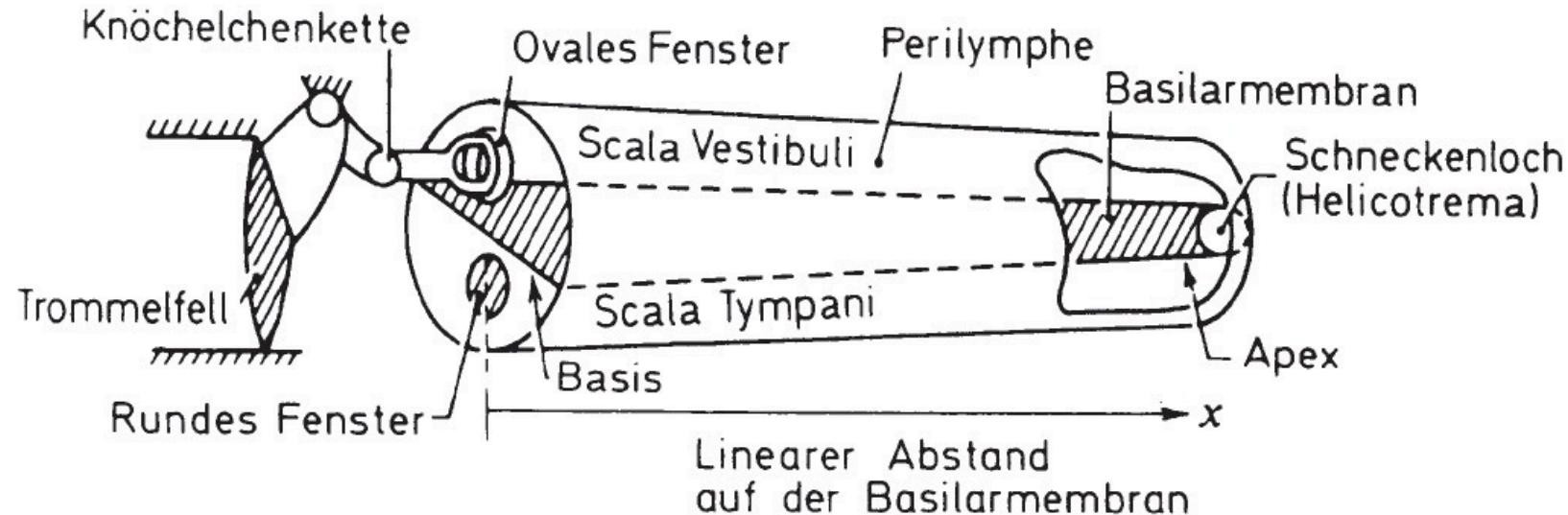
- Cochlea mit Basilarmembran als Ort der Frequenzanalyse



Cochlea



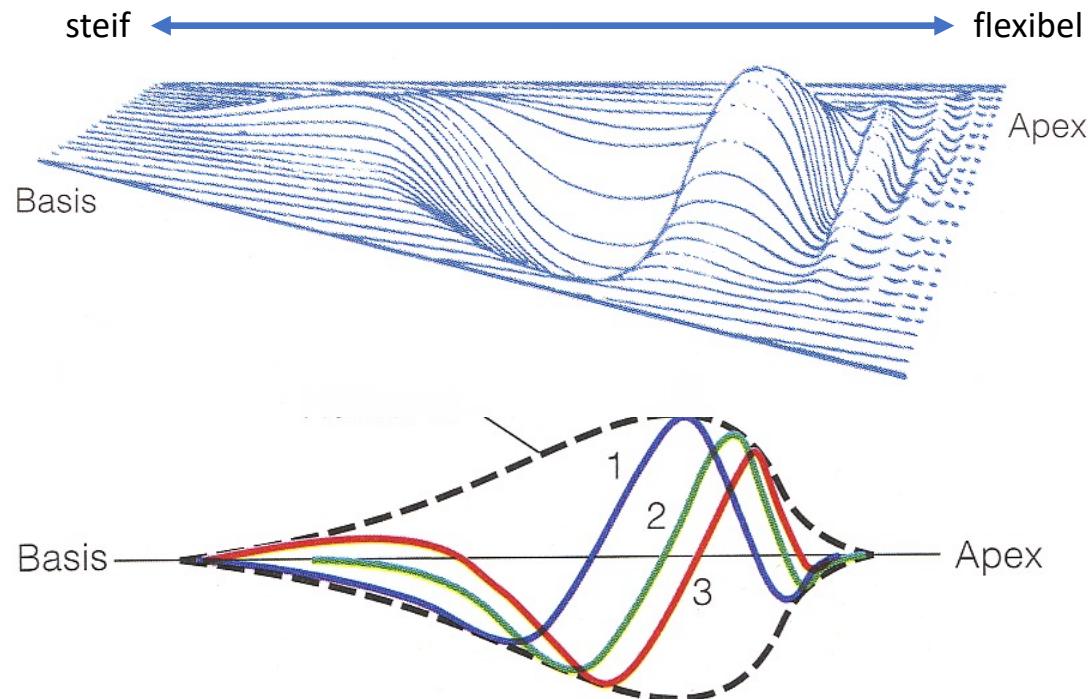
Cochlea



Basilarmembran: Wanderwellen-Theorie

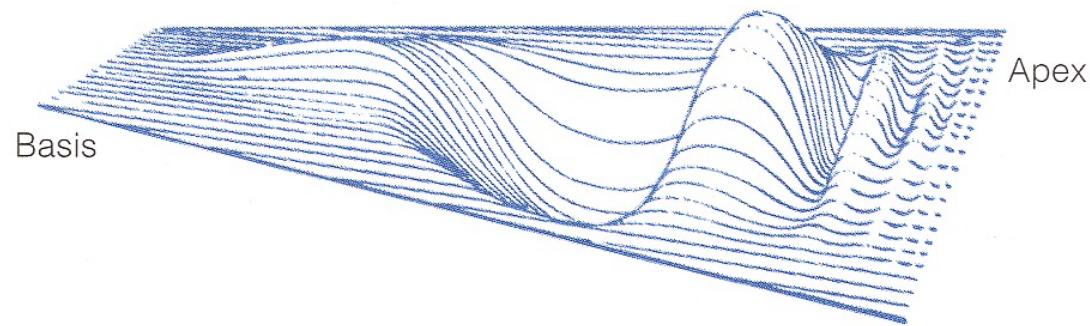
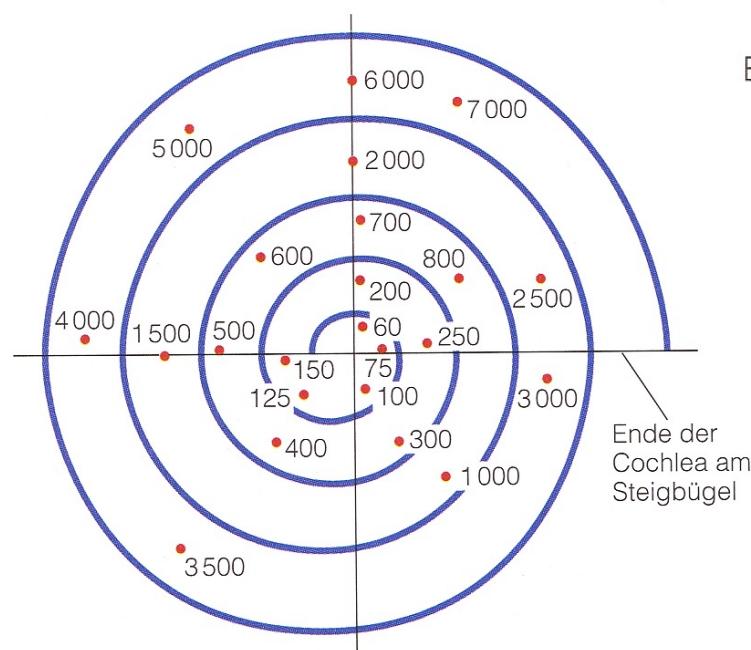
(Georg von Békésy)

- Für jede Frequenz gibt es auf der Basilarmembran einen Resonanzpunkt, an dem die Amplitude der Hüllkurve der Wanderwelle ihr Maximum erreicht.
- In diesem Bereich werden die Haarzellen aktiviert.
- Der Ort der ansprechenden Haarzellen definiert die wahrgenommene Tonhöhe.
- Je tiefer die Frequenz, desto näher liegt der Bereich der aktivierten Haarzellen am Apex und umgekehrt.



Basilarmembran

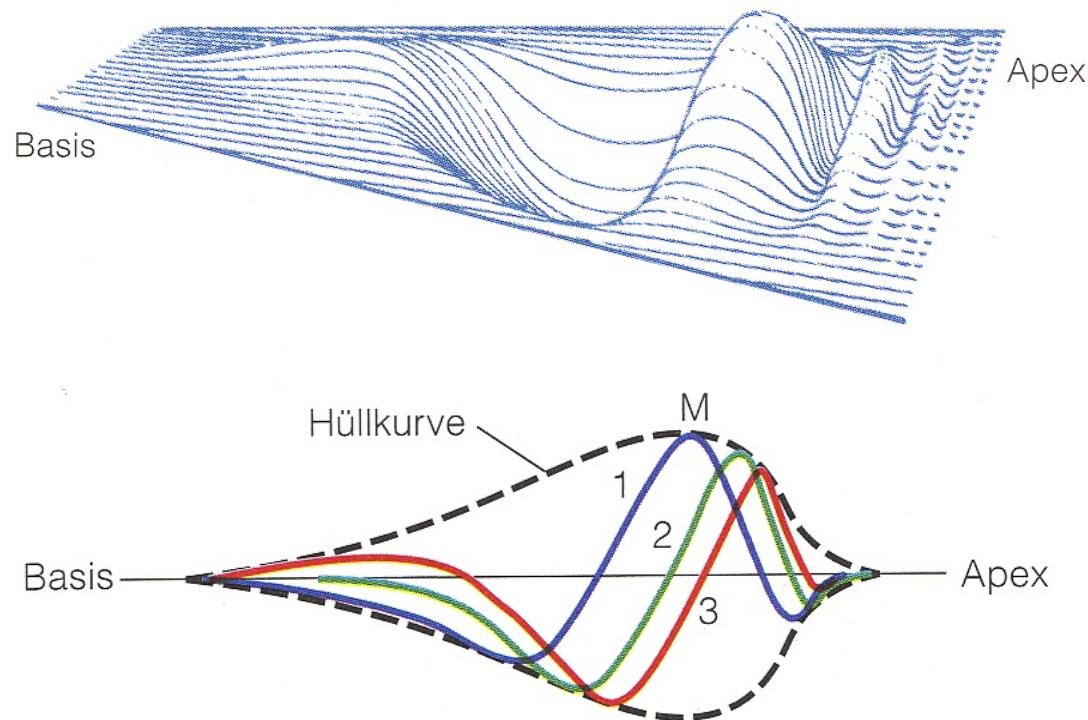
Tonotope Karte der Cochlea des Meerschweinchens mit den Orten der maximalen Antwort für jede Frequenz.



Ende der
Cochlea am
Steigbügel

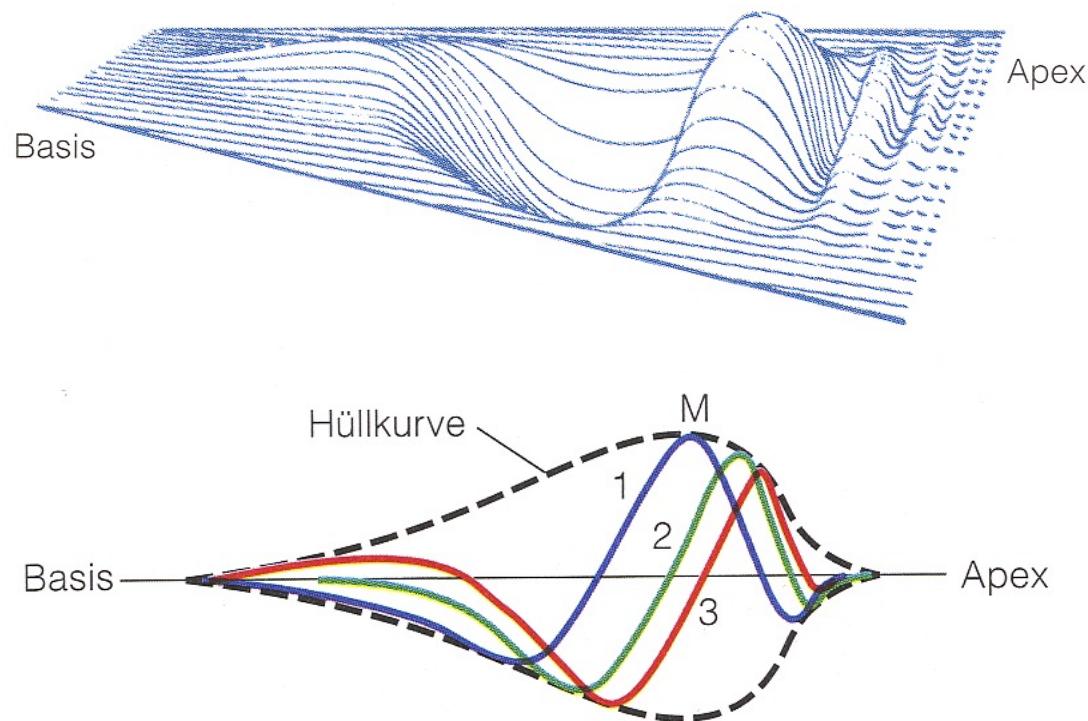
Mängel der klassischen Wanderwellen-Theorie von Békésy

- Frequenzauflösungsvermögen kann nicht vollständig erklärt werden
- Maximale Auslenkung ist in Wirklichkeit schmäler und höher
- Frequenzauflösung kann z.B. durch Sauerstoffmangel beeinträchtigt werden.
- Deshalb ist keine rein passiv-mechanische Erklärung möglich

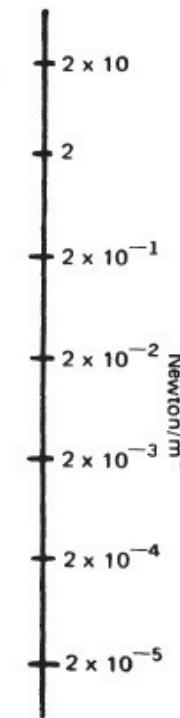
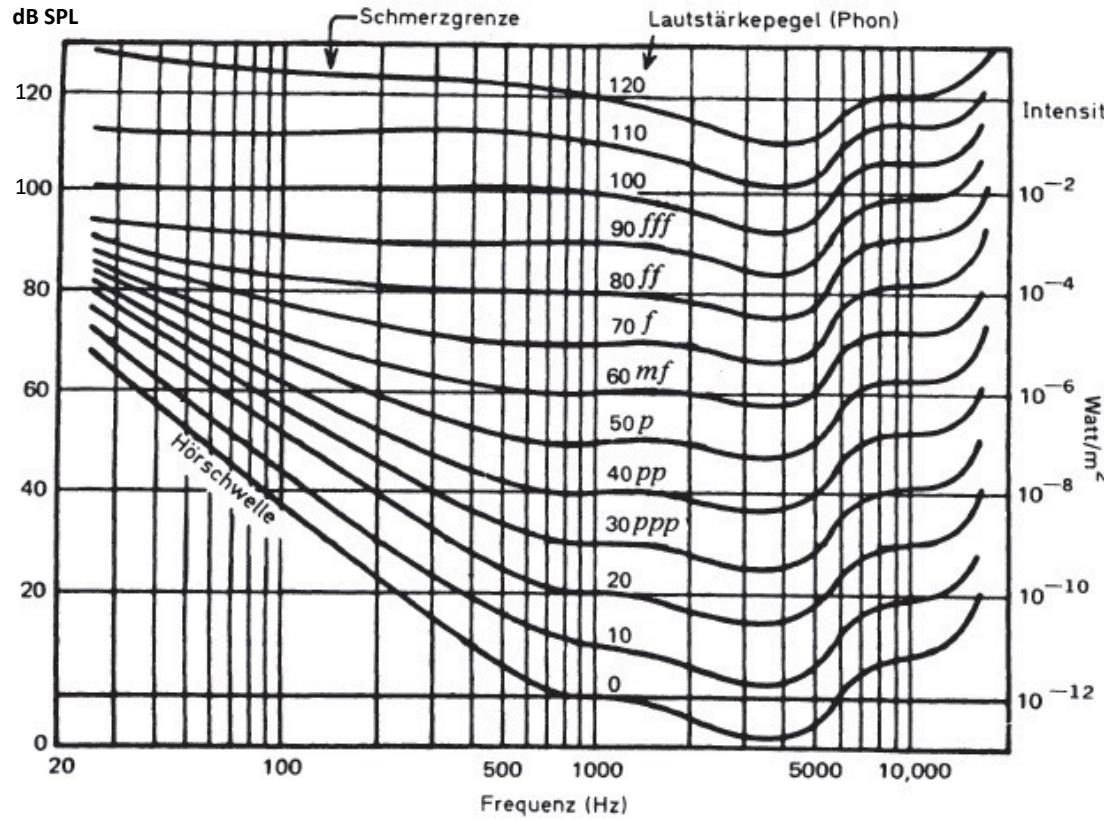


Ergänzung der klassischen Wanderwellen-Theorie von Békésy

- Berücksichtigung der aktiven Prozesse in den äußeren Haarzellen (motile Antwort)
- Äußere Haarzellen können die Auslenkung der Basilarmembran aktiv verstärken.
- Hierdurch Verstärkung (im niedrigen Intensitätsbereich) und Verbesserung der Frequenzauflösung
- Begleiterscheinung: otoakustische Emissionen

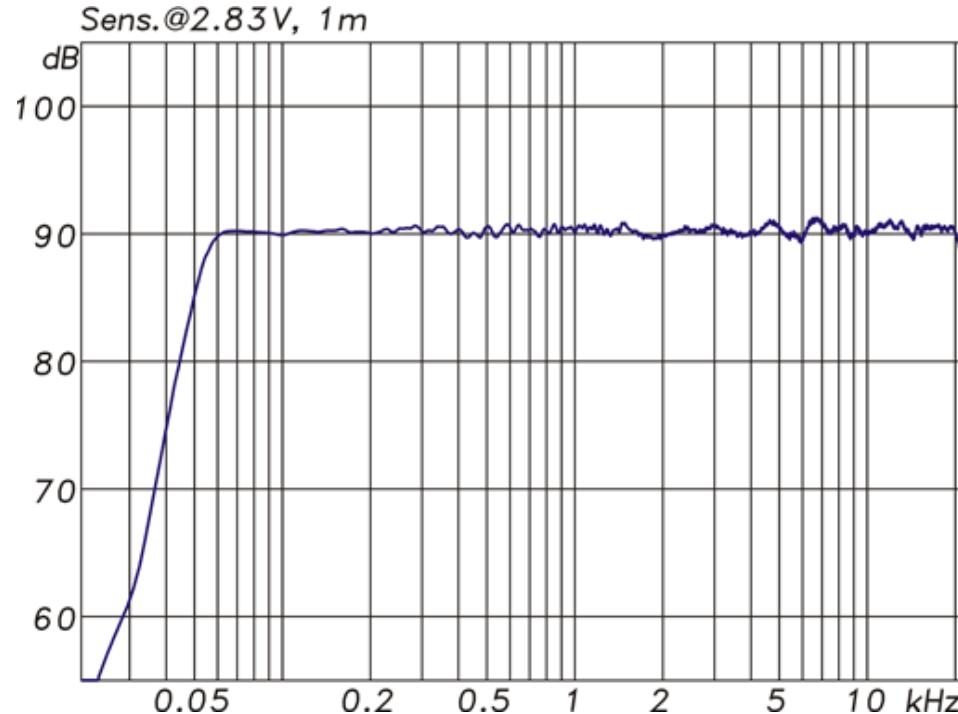


Isophone und Lautstärkepegel (phon)

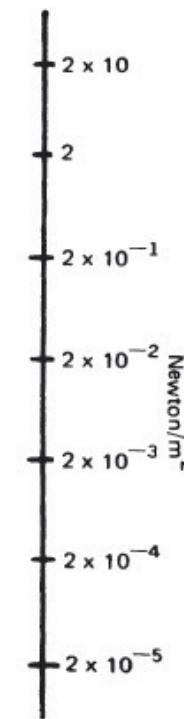
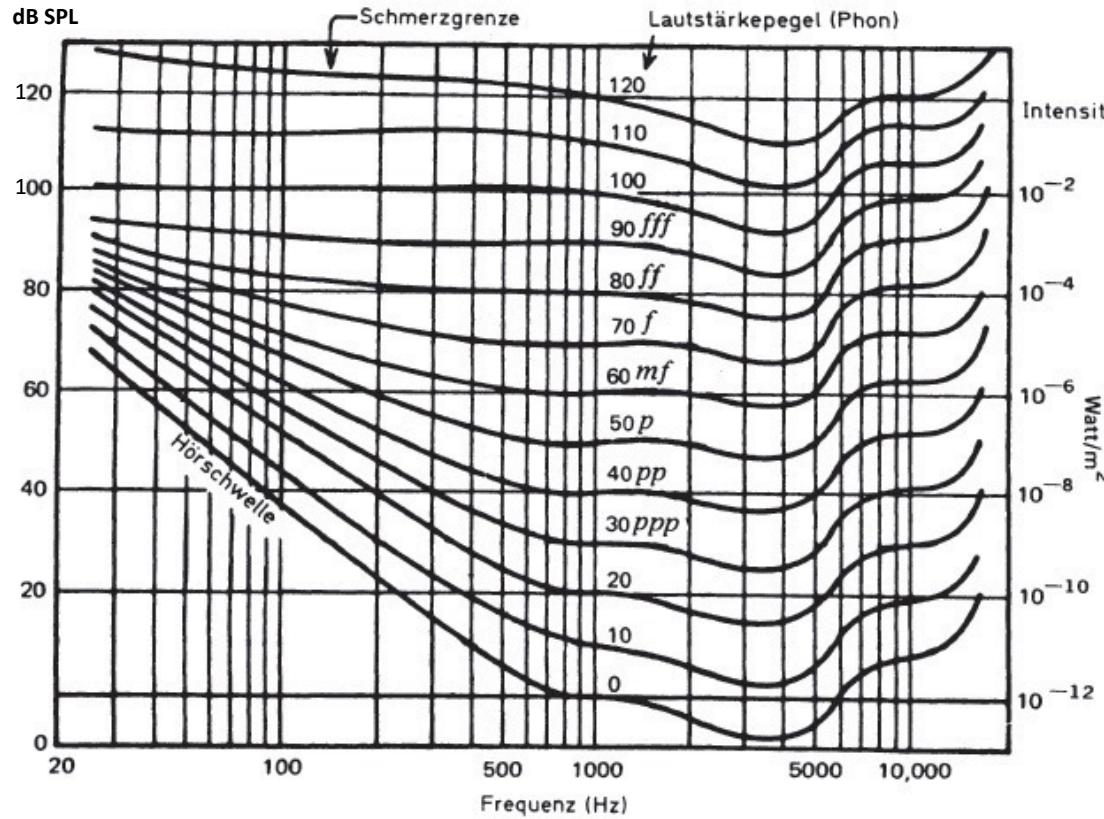


Jeder Schall, der einen Lautstärkepegel von 80 Phon aufweist, ist so laut wie ein 1-kHz-Ton mit einem Schalldruck von 80 dB SPL.

Zum Vergleich: Frequenzgang eines Studiomonitor (Neumann KH120)

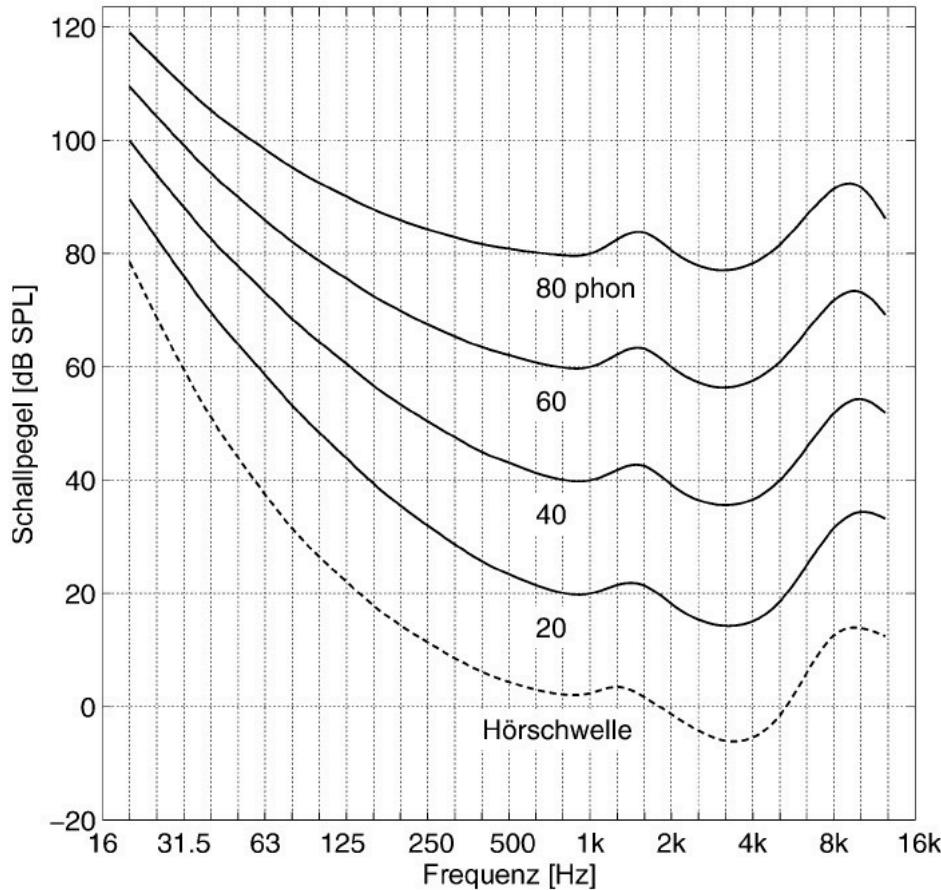


Isophone und Lautstärkepegel (phon)

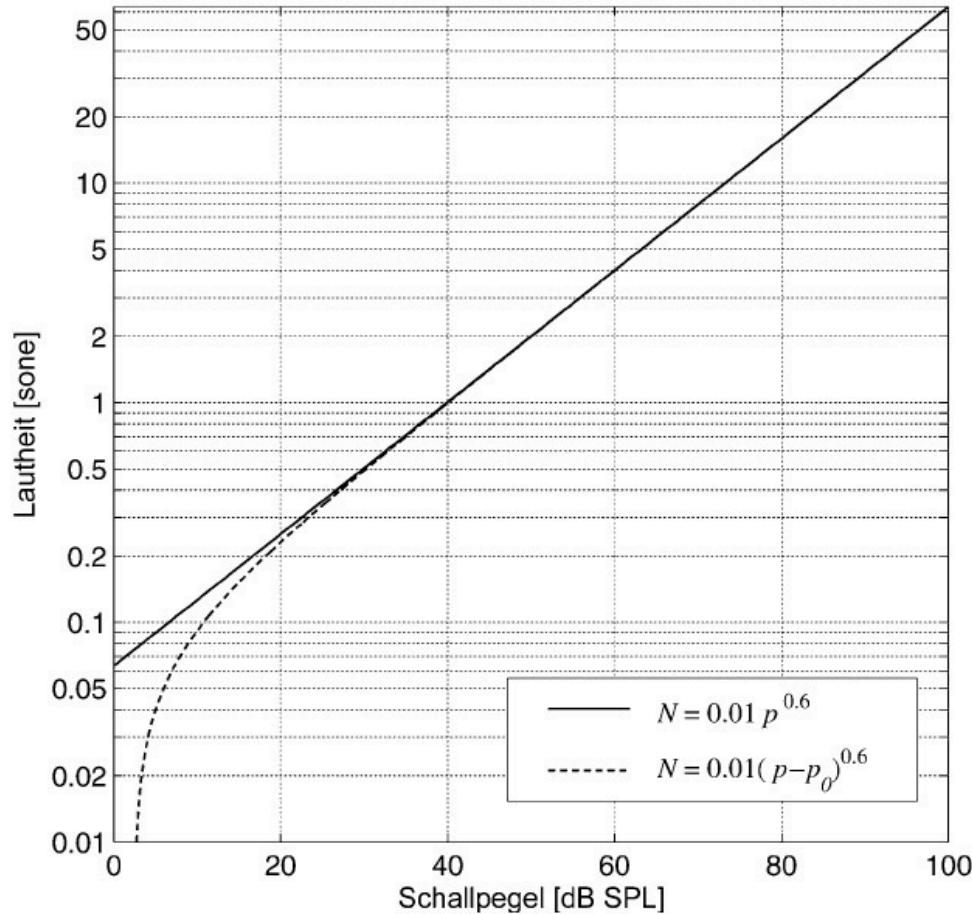


Jeder Schall, der einen Lautstärkepegel von 80 Phon aufweist, ist so laut wie ein 1-kHz-Ton mit einem Schalldruck von 80 dB SPL.

Isophone und Lautstärkepegel (Phon)



Lautheit (Sone)



Die Lautheit gibt das Verhältnis der Lautheitsempfindung zweier Töne zueinander an.

Die Lautheit (N) lässt sich nach Stevens als Potenzfunktion des Schalldrucks beschreiben:

$$N = k \cdot p^n$$

Durch Messungen ergibt sich

$$N = 0,01 \cdot p^{0,6}$$

Daraus folgt:

Eine Erhöhung des Schallpegels um 10 dB entspricht einer Verdopplung der Lautheit.

Festlegung: 40 dB SPL entspricht 1 Sone
50 dB SPL entspricht 2 Sone

Pegel-Änderung	Lautstärke Lautheit	Spannung Schalldruck	Schallleistung Schallintensität
+40 dB	16	100	10000
+30 dB	8	31,6	1000
+20 dB	4	10	100
+10 dB	2,0 = Verdopplung	$3,16 = \sqrt{10}$	10
+6 dB	1,52-fach	2,0 = Verdopplung	4,0
+3 dB	1,23-fach	$1,414\text{-fach} = \sqrt{2}$	2,0 = Verdopplung
----- ±0 dB -----	----- 1,0 -----	----- 1,0 -----	----- 1,0 -----
-3 dB	0,816-fach	0,707-fach	0,5 = Halbierung
-6 dB	0,660-fach	0,5 = Halbierung	0,25
-10 dB	0,5 = Halbierung	0,316	0,1
-20 dB	0,25	0,100	0,01
-30 dB	0,125	0,0316	0,001
-40 dB	0,0625	0,0100	0,0001
Log. Größe	Psychogröße	Feldgröße	Energiegröße
dB-Änderung	Lautstärkefaktor	Amplitudenfaktor	Leistungsfaktor

Quelle:
[http://www.sengpielaudio.com/
Rechner-schallgroessen.htm](http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgroessen.htm)

Spektrale Verdeckung

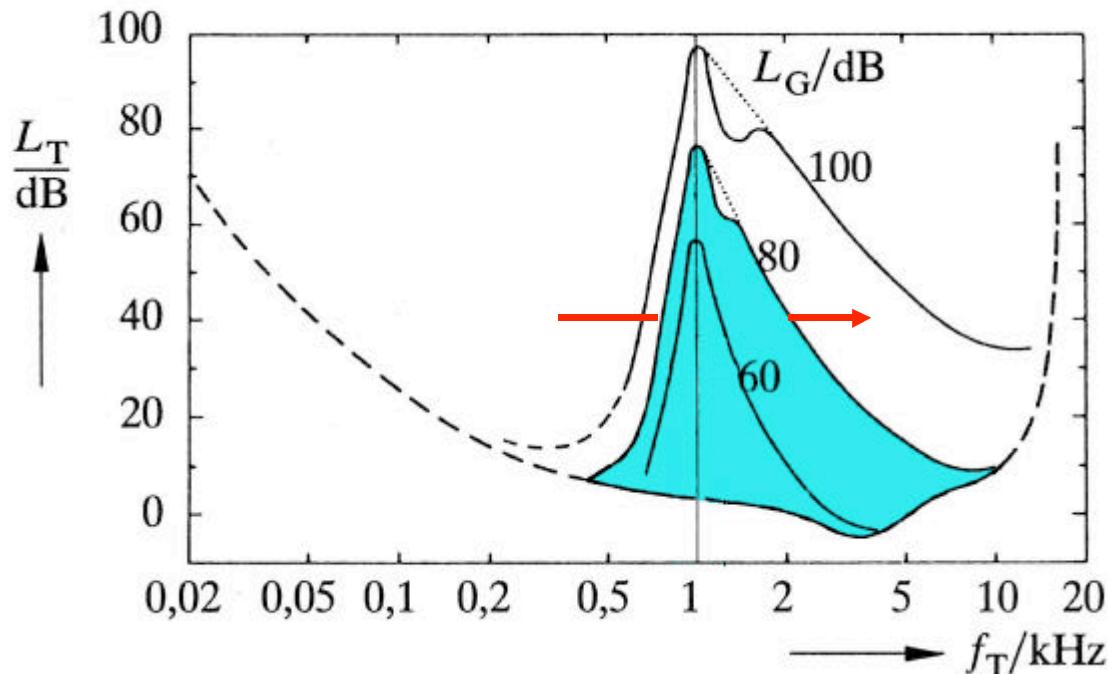
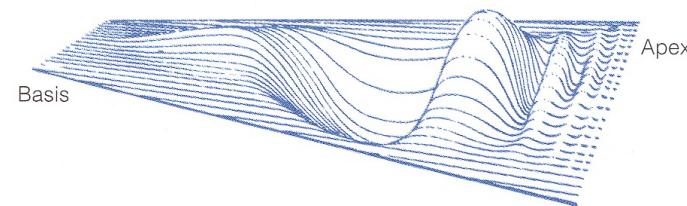


Abb.: Anhebung der Wahrnehmungsschwelle bei Anwesenheit eines Maskierungssignals von 1 kHz mit dem Störpegel L_G .

- Ein Ton kann die Wahrnehmung eines anderen gleichzeitig dargebotenen Tones maskieren oder abschwächen (auditive Maskierung).
- Der Maskierungseffekt ist zu hohen Frequenzen hin stärker ausgeprägt. Dies ist auf die Schwingungseigenschaften der Basilarmembran zurückzuführen



Spektrale Verdeckung

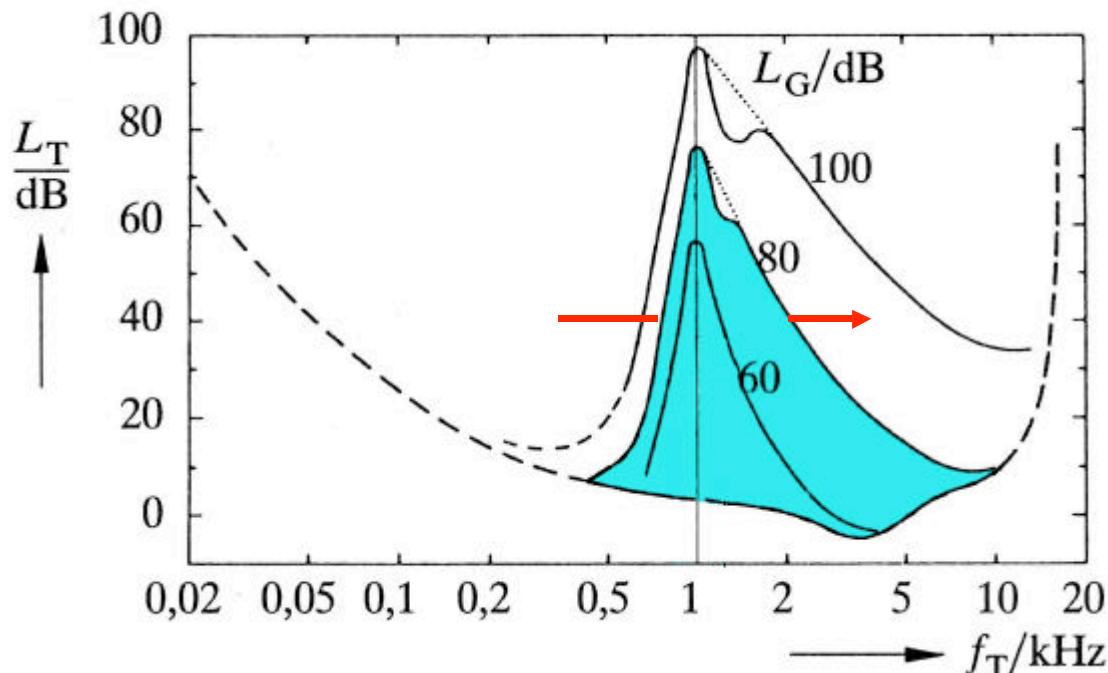


Abb.: Anhebung der Wahrnehmungsschwelle bei Anwesenheit eines Maskierungssignals von 1 kHz mit dem Störpegel L_G .

- Ein Ton kann die Wahrnehmung eines anderen gleichzeitig dargebotenen Tones maskieren oder abschwächen (auditive Maskierung).
- Der Maskierungseffekt ist zu hohen Frequenzen hin stärker ausgeprägt. Dies ist auf die Schwingungseigenschaften der Basilarmembran zurückzuführen
- Technische Anwendung: MPEG-1, Layer 3 (mp3)

Raumakustik

Schallleistung

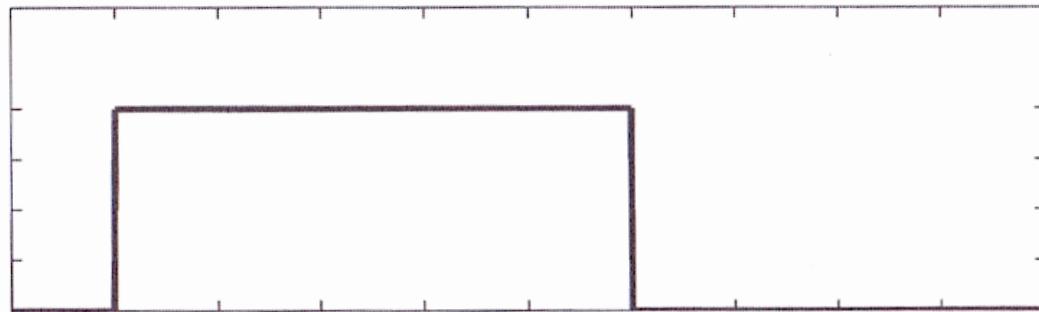
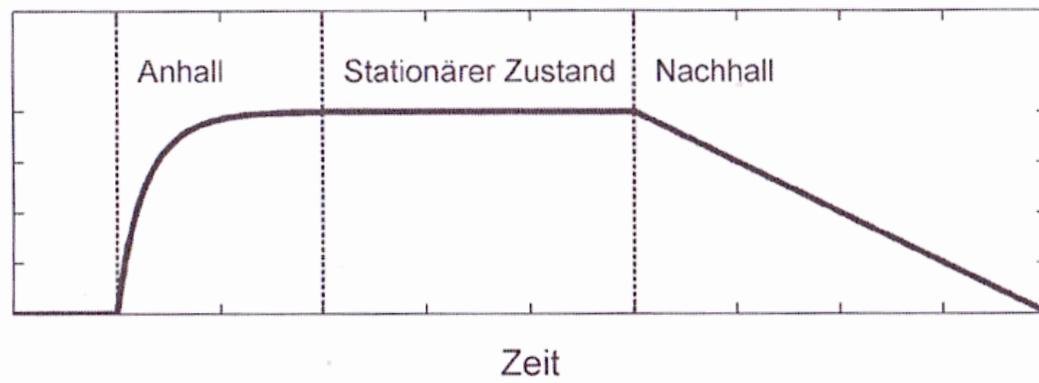


Abb.: Zeitliche Entwicklung des diffusen Schallfelds (unten) nach dem An- und Abschalten einer stationären Schallquelle (oben)
(Weinzierl 2014, 479)

Schalldruckpegel



Nachhallzeit

Die **Nachhallzeit** T_{60} (oder auch einfach T) ist definiert als das Zeitintervall, innerhalb dessen der Schalldruck in einem Raum bei plötzlichem Verstummen der Schallquelle auf 1/1000 des Anfangswerts abfällt, was einer Abnahme des Schalldruckpegels von 60 dB entspricht.

Nachhallzeit

Berechnung der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Raumgröße und dem Absorptionsvermögen des Raumes:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{\sum_i \alpha_i S_i}$$

vereinfachte Form:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{A}$$

S_i = Größe der Begrenzungsflächen [m^2]

α_i = Absorptionsgrad der Begrenzungsflächen [0...1]

Nachhallzeit

Berechnung der Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Raumgröße und dem Absorptionsvermögen des Raumes:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{\sum_i \alpha_i S_i}$$

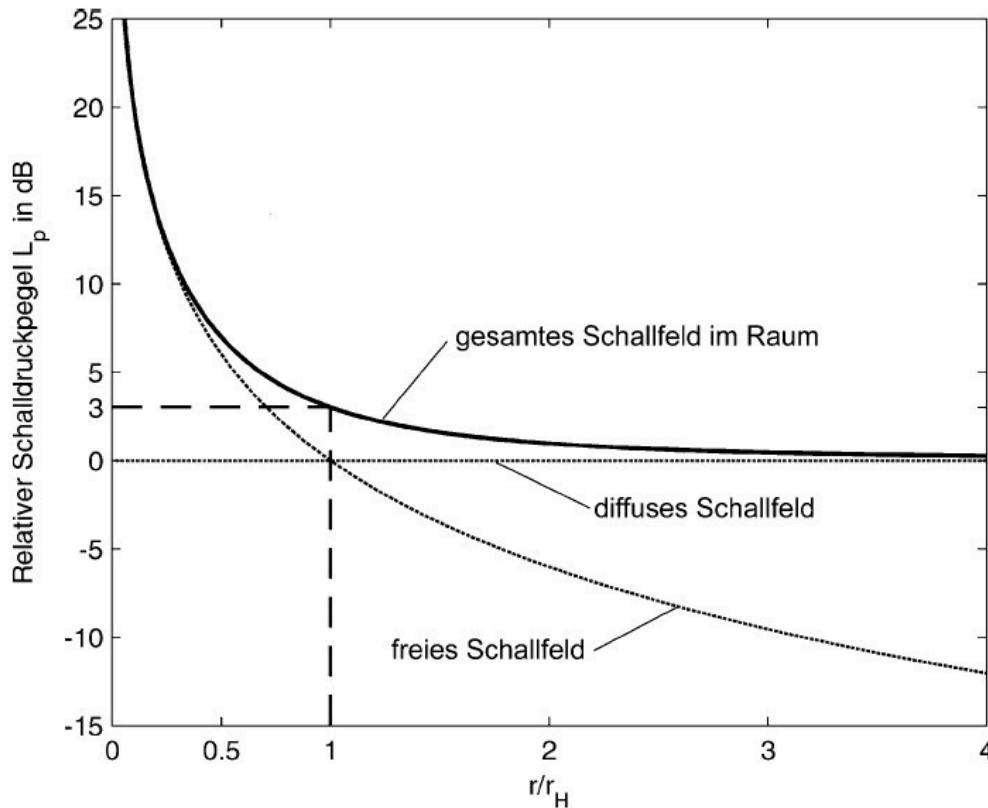
vereinfachte Form:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{A}$$

Beschreibung	Frequenz [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Holzparkett auf Schwellen über Beton	0,09	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04
Mittlere Absorption von Konzertsälen (ohne Bestuhlung)	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
Publikum auf Mäßig gepolsterter Bestuhlung	0,68	0,75	0,82	0,85	0,86	0,86

Tabelle: Beispiele für Absorptionsgrade (Mittelwerte über jeweils oktavbreite Frequenzbänder)
(vgl. Weinzierl 2014, 480)

Direktschall, Diffusschall, Hallradius



Für eine Punktformige Schallquelle nimmt der Schalldruck p umgekehrt proportional zur Entfernung r von der Quelle ab, d.h.

$$p \sim \frac{1}{r}$$

→ Abnahme des Schalldruckpegel um 6 dB bei Entfernungsverdopplung.

Abb.: Schalldruckpegel im Raum in Abhängigkeit von der Entfernung r zur Schallquelle, bezogen auf den Hallradius r_H (Ahnert und Tennhardt 2008, 184)

Direktschall, Diffusschall, Hallradius

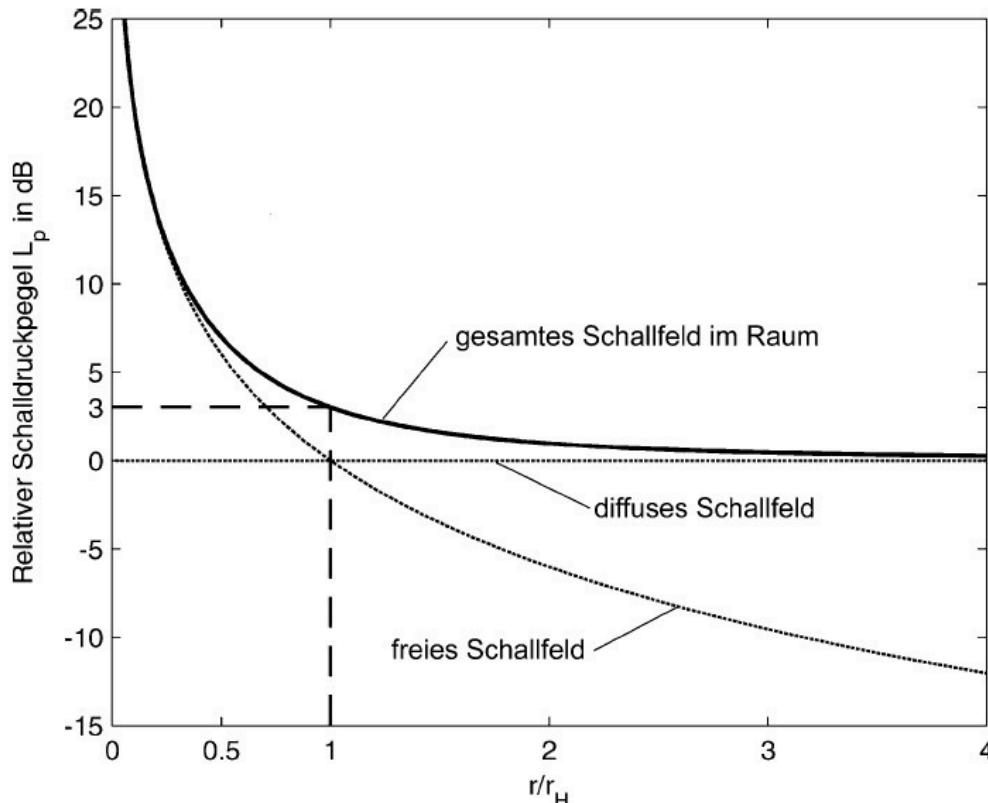


Abb.: Schalldruckpegel im Raum in Abhängigkeit von der Entfernung r zur Schallquelle, bezogen auf den Hallradius r_H (Ahnert und Tennhardt 2008, 184)

In unmittelbarer Umgebung der Quelle dominiert der direkte Schallanteil, weiter entfernt überwiegt der diffuse Schallanteil.

Der Punkt an dem direktes und diffuses Schallfeld denselben Schalldruckpegel aufweisen, markiert den Hallradius r_H .

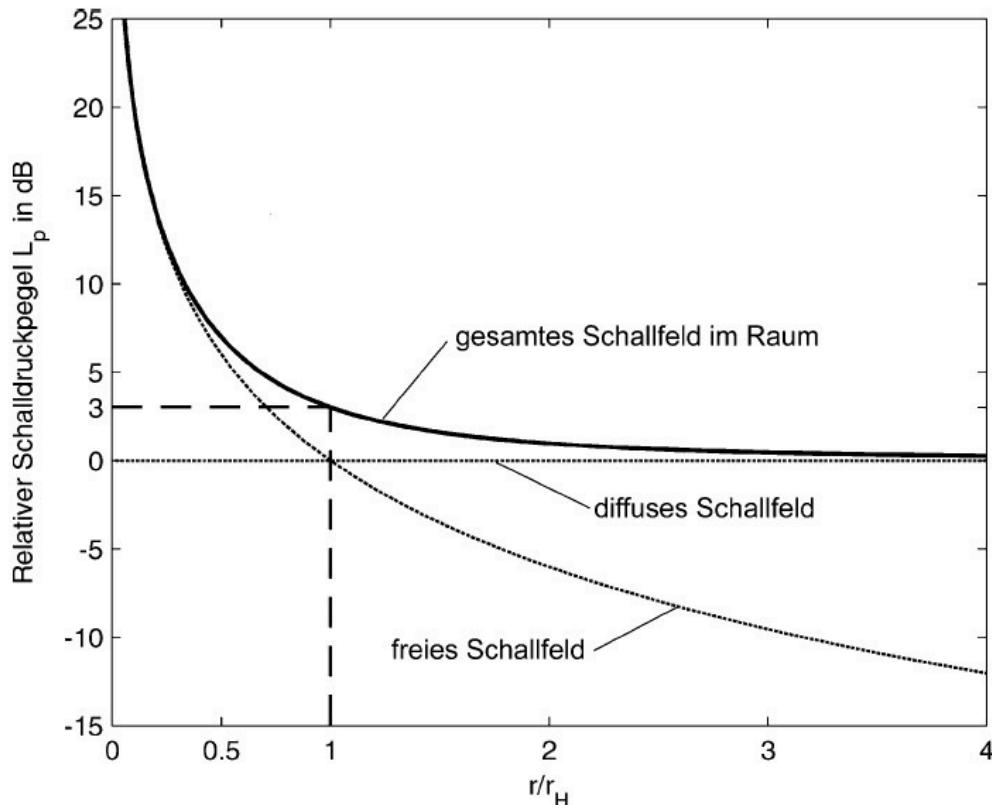
Es gilt:

$$r_H = 0,057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T}}$$

V = Raumvolumen [m^3]

T = Nachhallzeit [s]

Direktschall, Diffusschall, Hallradius



Beispiel: r_H bei Konzertsälen

typisches Raumvolumen: 20000 m^3

typische Nachhallzeit: 2 s

$$r_H \approx 5,7 \text{ m}$$

Abb.: Schalldruckpegel im Raum in Abhängigkeit von der Entfernung r zur Schallquelle, bezogen auf den Hallradius r_H (Ahnert und Tennhardt 2008, 184)

Geometrische Betrachtung der Raumantwort

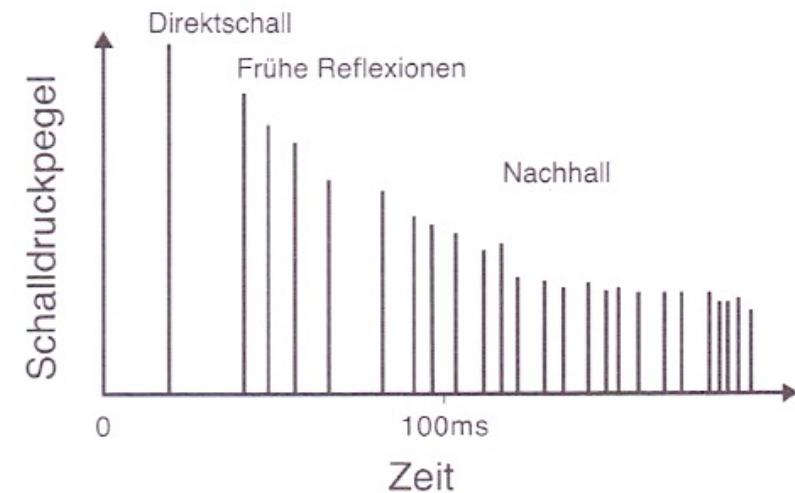
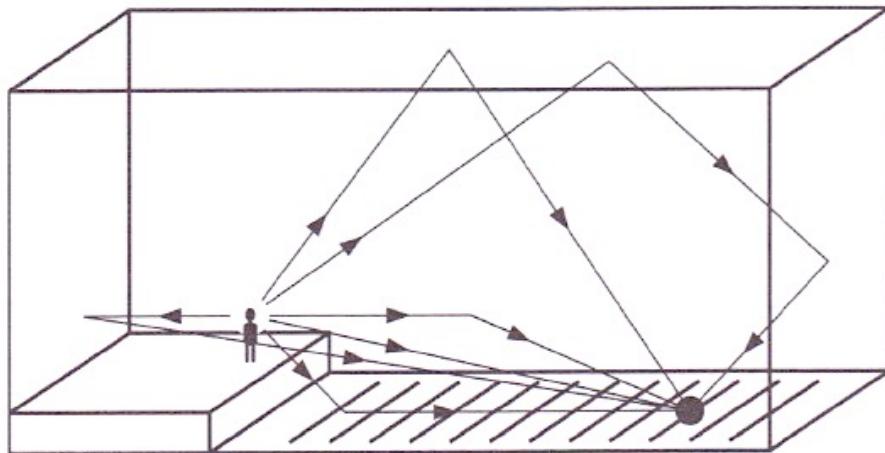


Abb.: An den Raumbegrenzungsflächen reflektierte Schallstrahlen (links). Resultierendes Reflektogramm mit der zeitlichen Abfolge und Energie der am Hörort eintreffenden Schallstrahlen (rechts).
(Weinzierl 2014, 482)

Modellierung einer Raumantwort mit einem Hall-Plugin



Quelle: <https://lexiconpro.com/en/products/pcm-native-reverb-plugin-bundle>

Wichtige raumakustische Aspekte vom Konzertsälen

- akustischen Entkopplung von Störgeräuschen mittels bauakustischer Maßnahmen
- Nachhallzeit (optimal nach DIN 18041: Konzertsaal ca. 2,0 s; Kammermusiksaal ca. 1,6 s; Opernhaus ca. 1,5 s; Sprechtheater ca. 1,0 s.)
- Klangfarbe des Raumklangs
- Verhältnis von Direkt- und Diffusschall am Hörplatz
- Verstärkung der Schallquellen am Hörplatz
- (realistische) räumliche Abbildung der Instrumenten-Aufstellung
- klangliche Umhüllung des Publikums

(vgl. Weinzierl 2014, 492)



ArtLab des Max-Planck-Institut für empirische Ästhetik

- Ahnert, Wolfgang und Tennhardt, Hanns-Peter (2008), Raumakustik, in: Stefan Weinzierl (Hrsg.): *Handbuch der Audiotechnik*. Berlin, Heidelberg. Springer, 181-266
- Dickreiter, M., et al. (2008), *Handbuch der Tonstudientechnik*. 2 Bände, 7. Auflage, München: Saur.
- Goldstein, Bruce (2008), *Wahrnehmungspsychologie. Der Grundkurs*. Berlin, Heidelberg: Springer/Spektrum.
- Hall, Donald E. (2008), *Musikalische Akustik: Ein Handbuch*. Mainz, Berlin, u.a.: Schott.
- Loy, Gareth (2007). *Musimathics. The Mathematical Foundations of Music*. 2 Bände, Cambridge, London: The MIT Press.
- Meyer, Jürgen (2015), *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*, 6. erweiterte Auflage, Bergkirchen: PPV Medien, Edition Bochinsky.
- Reuter, Christoph und Auhagen, Wolfgang (Hrsg.)(2014), *Musikalische Akustik*. Laaber: Laaber.
- Roederer, Juan G. (2000), *Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Weinzierl, Stefan (Hrsg.)(2014), *Akustische Grundlagen der Musik*. Laaber: Laaber.