

Akustik Workshop im Modellversuch Multisensuelles Design

Anselm Goertz

Raumakustik: Grundlagen, Messtechnik und Simulationen

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	3
1.1	RAUMAKUSTIK.....	3
1.2	INTEGRATION IN DAS LEHRPROGRAMM DER HOCHSCHULE.....	5
2	GRUNDLAGEN ERSTER TEIL.....	6
2.1	WIE ENTSTEHT SCHALL ?	6
2.2	SCHWINGUNG.....	7
2.3	SCHALLAUSBREITUNG.....	8
2.4	LUFTSCHALL, KÖRPERSCHALL,	9
2.5	SCHALLDRUCK UND SCHALLDRUCKPEGEL.....	9
2.6	FREQUENZVERHÄLTNISSE	11
2.7	GERÄUSCHE, TÖNE, KLÄNGE, ETC.....	14
2.8	ZEITVERHALTEN EINES GERÄUSCHES	17
2.9	ZEITSIGNALE UND FREQUENZSPEKTREN	18
2.10	ÜBERTRAGUNGSFUNKTION	23
2.10.1	<i>Lineare Verzerrungen</i>	24
2.10.2	<i>Nichtlineare Verzerrungen</i>	26
3	GRUNDLAGEN ZWEITER TEIL.....	27
3.1	SCHALLQUELLEN	27
3.1.1	<i>Punktquellen, Linienquellen und Flächenstrahler</i>	27
3.1.2	<i>Richtverhalten</i>	30
3.1.3	<i>Herkömmlicher Lautsprecher</i>	31
3.2	DAS MENSCHLICHE GEHÖR	34
3.2.1	<i>Hörfläche und Lautstärkepegel</i>	35
3.2.2	<i>Richtungshören</i>	37
4	PHÄNOMENE DER RAUMAKUSTIK UND SCHALLAUSBREITUNG.....	39
4.1	ÜBERTRAGUNGSSTRECKE RAUM	39
4.2	GRENZFLÄCHEN	42
4.3	REFLEXION, ABSORPTION, DISSIPATION, TRANSMISSION	43
4.4	ABSORBER	45
4.5	DIFFUSE STREUUNG	47
4.6	BEUGUNG.....	48
4.7	GEWÖLBTE FLÄCHEN.....	49
4.8	BRECHUNG.....	50
5	MESSTECHNISCHEN GRÖßEN IN DER RAUMAKUSTIK	52
5.1	DIE NACHHALLZEIT	53
5.2	WEITERE RAUMAKUSTISCHE PARAMETER	57
6	RAUMAKUSTISCHE MODELLE	58
6.1	MODELLMESSTECHNIK.....	58
6.2	DIE ENTWICKLUNG DER COMPUTERSIMULATION IN DER RAUMAKUSTIK.....	58
6.3	PC SIMULATION MIT SPIEGELQUELLEN UND STRAHLENVERFOLGUNG.....	59
7	LITERATURLISTE ZUM THEMA	63

Dieses Skript wurde im Dezember 2001 erstmals als Grundlage zum Akustik Workshop der Arbeitsgruppe Multisensuelles Design an der Burg Giebichenstein, Hochschule für Kunst und Design Halle erstellt und soll in Zukunft dem Verlauf der Seminarbeiträge und den Interessen der Studierenden angepasst werden. Für Anregungen, Verbesserungsvorschläge und Erweiterungen sind die Herausgeber jederzeit dankbar.

Im PDF-Format mit Hörbeispielen steht dieses Skript auf dem Server der Burg Giebichenstein, Hochschule für Kunst und Design Halle, unter www.burg-halle.de/~msens zum Download bereit.

Herausgeber: Arbeitsgruppe Multisensuelles Design an der Burg Giebichenstein,
Hochschule für Kunst und Design Halle

Text: Anselm Goertz

Grafiken: Anselm Goertz und Matthias Behne

Korrektur: Heike Langguth

Organisation: Steffen Weber

PDF-Bearbeitung: Steffen Weber

Hörbeispiele: Anselm Goertz

Copyright © 2001 by Anselm Goertz, Aachen

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Skript darf zur Verwendung bei Studienzwecken oder im Lehrbetrieb mit entsprechendem Quellnachweis vervielfältigt werden.

Halle: Dezember 2001

1 Einleitung

Wo liegt die Intention des Raumakustik Seminars: Die Idee zu diesem Seminar entstand in der Planungsphase zum Thema "Multisensuelles Design". Neben dem klassischen Design und der Olfaktorik (Geruchslehre) sollte das Akustikdesign ein tragendes Element sein. Als typische Anwendungsfälle sind die Fachgebiete des Industriedesigns oder der Architektur zu nennen.

Das **Industriedesign** befasst sich in vielen Produktgruppen (Autos, Haushaltsgeräte) schon lange und sehr ausgiebig mit der gezielten Gestaltung von Geräuschen (z.B. Autotüren, Motorgeräusche, Staubsauger, Bierflasche ...). Auch wenn es nicht direkt um ein Sounddesign geht, entsteht in den "einfacheren Fällen" häufig der Kontakt zur Akustik über das Thema Lärmvermeidung. Als bekannte Beispiele in der Arbeitswelt können die von Büromaschinen (Drucker, PC, ...) ausgehenden unerwünschten Geräuschemissionen oder in noch stärkerem Maße der Maschinenlärm in Produktionshallen genannt werden. Außerhalb der Arbeitswelt gehört als Beispiel der Verkehrslärm zu einem allzeit präsenten Problem für einen Großteil der Bevölkerung.

In kleinerem Rahmen sind Lärmbelästigungen durch auf den ersten Blick harmlose Dinge zu bewerten, zu denen z.B. die Espressomaschine in der Gaststätte zählt. Fast jeder wird es aus eigener Erfahrung kennen, durch eine solche Maschine schon einmal abrupt im Gespräch unterbrochen worden zu sein. Gerade dieses einfache Beispiel eignet sich sehr gut, um einige Zusammenhänge in der Raumakustik zu verdeutlichen, so dass später nochmals darauf zurückgekommen werden soll.

Die **Architektur** wird zwangsläufig mit der Akustik in Form von Raum- und Bauakustik konfrontiert. Auch hier erstreckt sich das Feld von der Lärmvermeidung (z.B. Trittschalldämmung in Gebäuden), Lärmbekämpfung (Schalldämmung von Wänden, Fenstern,...) über die Raumakustik (Musikdarbietung, Sprachübertragung) bis hin zur gezielten Geräuscherzeugung zur Vermittlung bestimmter Stimmungen, als Wiedererkennungseffekt oder auch zur Kaschierung anderer Geräusche (z.B. Bankschalter).

Allen vorab genannten Beispielen ist ein und derselbe Vorgang gemeinsam:

- 1) Entstehung des Schalls an der Quelle [Sender]
- 2) Ausbreitung des Schalls im Raum oder im Freien [Übertragungsstrecke]
- 3) Wahrnehmung und Beurteilung des Schalls durch das menschliche Ohr [Empfänger]

Optional kann Punkt 2 um eine Wandlung des Schalls mit Hilfe eines Mikrophons in ein elektrisches Signal erweitert werden. Das elektrische Signal kann anschließend verstärkt, bearbeitet, übertragen oder auch gespeichert werden, um abschließend über einen Lautsprecher wieder in Schall gewandelt zu werden. Der Begriff Wandlung ist hier in beiden Fällen als Wandlung zwischen unterschiedlichen physikalischen Größen (Schallwellen und elektrische Schwingungen) zu verstehen.

1.1 Raumakustik

Dieses Seminar soll sich verstärkt mit dem Teilgebiet der Raumakustik und im erweiterten Sinne auch mit der Schallausbreitung im Freien (Beispiel: Freilichtbühne) befassen. Der Raumakustik kommt in sofern eine zentrale Bedeutung zu, als dass die hier beschriebenen Vorgänge von großer Wichtigkeit für die Wahrnehmung der Schallquelle sind. Beispiele finden sich hierfür in großer Zahl:

- Ein Raum mit unpassender Akustik (z.B. extrem viel Nachhall) vermindert die Sprachverständlichkeit drastisch.
- Echos von einer entfernten Rückwand verderben das Konzert.
- Ein halliger (lauter) Raum erzeugt eine unangenehme Atmosphäre.

Beispiel:

Als Beispiel sei noch einmal die Espressomaschine in der Gaststätte genannt. Die Maschine erzeugt durch Zischen von Dampf und ein knirschendes Mahlwerk eine Geräuschkombi in einem mittleren bis hohen Frequenzbereich, der vom Gehör besonders gut wahrgenommen wird. Es kommt hinzu, dass die Art des Geräusches genau den Frequenzbereich betrifft, in dem die für eine gute Sprachverständlichkeit besonders relevanten Zischlaute liegen.

Eine sich unterhaltende Gruppe von Personen in einem Cafe könnte sich z.B. in 10m Entfernung von dieser Maschine aufhalten. Der umgebende Raum als Übertragungsstrecke entscheidet hier, wie das Geräusch des Senders (Maschine) beim Empfänger (Gäste) ankommt. Vorausgesetzt es gibt keine Schallschutzhaube, verdeckende Wände oder ähnliches, so trifft immer als erstes und auf kürzestem Wege der Direktschall von der Quelle beim Empfänger ein. Der Direktschall halbiert sich bei jeder Entfernungsverdopplung und ist damit in 10m Entfernung bereits deutlich abgeschwächt. Nur unwesentlich später und vom Gehör dem Direktschall beaufschlagt treffen die von Wänden, Boden, Decke und weiteren Einrichtungsgegenständen reflektierten Schallanteile ein. Diese sind um so ausgeprägter, je mehr reflektiert wird. Ein Fußboden aus Marmor oder Stein reflektiert Schall in allen Frequenzbereichen fast perfekt zu 100%. Ein Teppichbelag dagegen absorbiert mittlere und hohe Schallanteile. Bestehen Wandflächen und Einrichtungsgegenstände demnach bevorzugt aus akustischen harten Materialien (Glas, Stein, Beton, Marmor,...) so sind diese zum Direktschall zusätzlich eintreffenden reflektierten Anteile besonders ausgeprägt und verursachen einen erheblichen zusätzlichen Geräuschpegel am Empfangsort. Gut absorbierende Materialien (Teppiche, Vorhänge, gepolsterte Bestuhlung,...) reduzieren dagegen diese reflektierten Anteile, und die Lärmbelastung sinkt.

Schon dieses Beispiel aus dem Alltag enthält viele wichtige Aspekte der Raumakustik. Ziel dieses Seminars soll es daher zunächst einmal sein, den Sinn für die Raumakustik als gestaltende Größe zu wecken. Zum weiteren Verständnis bedarf es jedoch einiger Grundlagen, die im Folgenden zu den hier aufgelisteten Themen besprochen werden sollen:

In den Grundlagen Teil 1 sind zunächst einige Begriffe im Zusammenhang mit der Schallausbreitung zu definieren, die substantiell für das weitere Verständnis sind.

- Schwingungen, Frequenz und Wellenlänge
- Amplitude und Schalldruckpegel

Die Grundlagen Teil 2 werden sich mit verschiedenen Formen von idealisierten und realen Schallquellen sowie mit dem menschlichen Gehör beschäftigen.

Die drei weiteren Kapitel gehen auf das eigentliche Thema Raumakustik ein und behandeln die Themen:

- Phänomene der Schallausbreitung
- Messtechnische Größen in der Raumakustik
- Raumakustische Modelle und Simulationsverfahren

1.2 Integration in das Lehrprogramm der Hochschule

Zu Beginn des Seminars steht die fachliche Vermittlung einiger Grundlagen der Akustik, im speziellen die Raumakustik und deren Randgebiete betreffend. Dabei wäre eine den Bedürfnissen der Studierenden angepasste Vermittlung des Stoffes in Form einer Mischung aus einfachen naturwissenschaftlichen Ansätzen und anschaulichen Erklärungen zu finden. Ziel soll es selbstverständlich sein, die Akustik so anschaulich wie möglich mit wenig mathematischen Ansätzen zu vermitteln, ohne dabei jedoch zu unzulässigen Vereinfachungen oder Anschauungen zu greifen. Im Zusammenhang mit der Designausbildung an der Hochschule ist das vorrangige Ziel dieses Seminars, den Sinn für die Akustik als gestaltende Größe zu wecken.

2 Grundlagen erster Teil

2.1 Wie entsteht Schall ?

Schall entsteht als periodische oder nicht periodische Schwingung eines **elastischen** Mediums, das gasförmig, flüssig oder auch fest sein kann. Als Schallquelle bedarf es eines schwingenden Gegenstandes, der die umgebenden Moleküle in Schwingung versetzt.

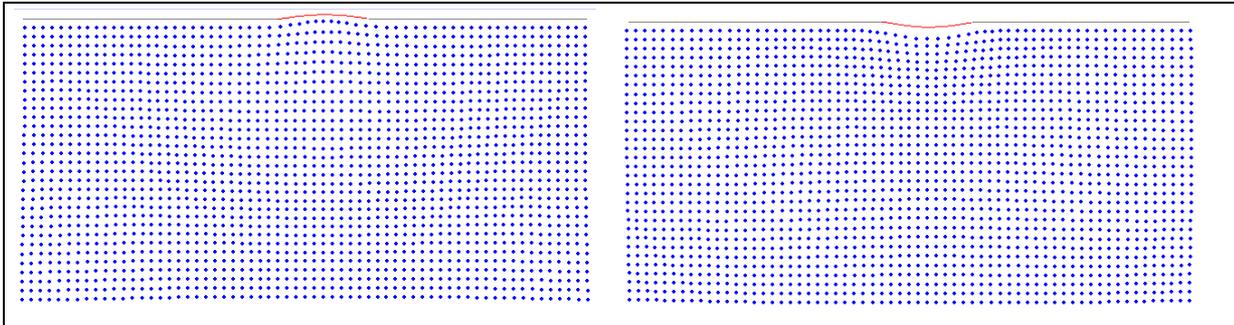


Abbildung 1 Kolbenförmige Membran schwingt langsam (niedrige Frequenz) in einer unendlich ausgedehnten und starren Wand. Primär werden die Luftmoleküle vor der Membran hin und her geschoben. Durch die Langsamkeit der Bewegung gelingt es den Luftmolekülen auszuweichen, und es entsteht kein Schall sondern nur mitbewegte Mediummasse. [aus 1]

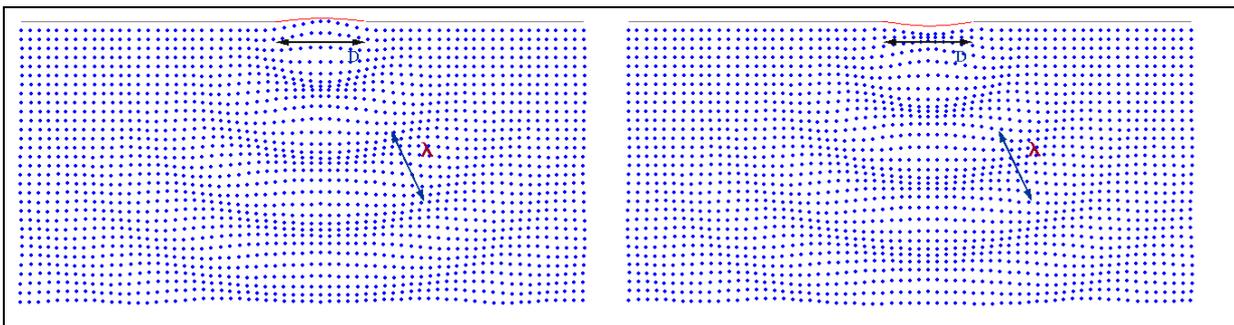


Abbildung 2 Kolbenförmige Membran schwingt schnell (hohe Frequenz) in einer unendlich ausgedehnten und starren Wand. Durch die schnelle Bewegung entstehen lokale Verdichtungen der Luftmoleküle, die sich als Schallwellen im Medium mit der Schallgeschwindigkeit ausbreiten. [aus 1]

Die Luftmoleküle befinden sich vergleichbar einem komplexen System aus Massen und Federn in einem Verbund. Eine langsam schwingende kleine Membran oder andere Fläche schiebt diese lediglich in ihrer näheren Umgebung hin und her. Man spricht von der sogenannten mitbewegten Mediummasse oder Blindleistung. Schalldruck entsteht dabei kaum, wie auch das geringe Wellenmuster in Abbildung 1 zeigt. Schwingt eine gleich große Membran wesentlich schneller, so können die Luftmoleküle aufgrund ihrer Massenträgheit nicht mehr ausweichen und es kommt zu lokalen Dichtveränderungen, die sich wellenförmig im Medium als Schallwelle ausbreiten (Wirkleistung). Abbildung 2 zeigt ein Beispiel, wie sich die Dichteänderung bzw. die Druckänderung im Medium ausbreiten.

Eine schwingende Membran oder Fläche strahlt bei hohen Frequenzen mehr Wirkleistung ab als bei tiefen Frequenzen und kann somit einen höheren Schalldruck erzeugen.

2.2 Schwingung

Eine Schwingung im allgemeinen, wie auch die Schwingung in Form einer sich ausbreitenden Schallwelle, wird über die Größen Amplitude, Frequenz, Periodendauer und Wellenlänge charakterisiert.

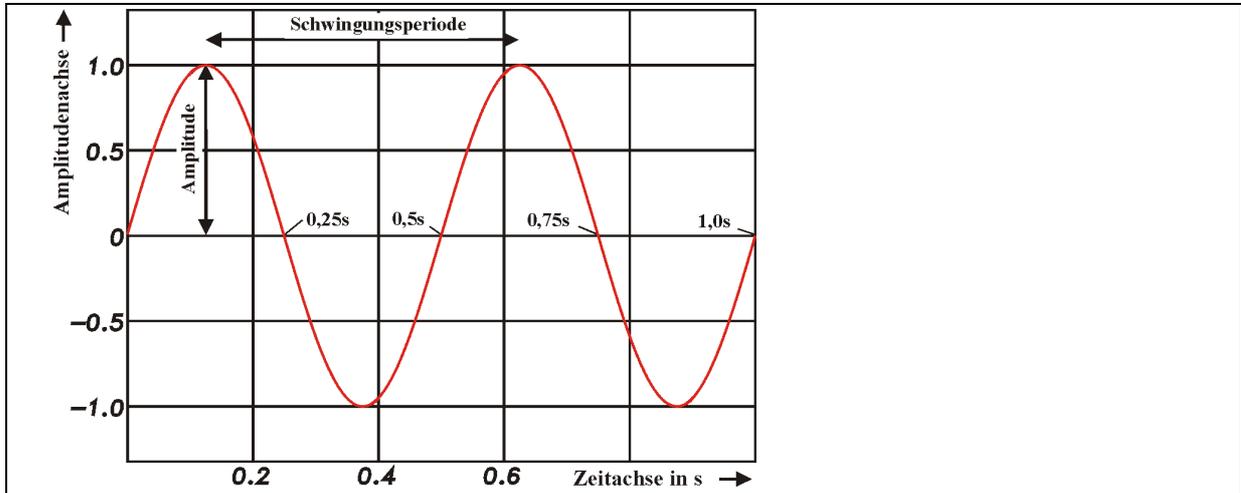


Abbildung 3 Sinusförmige periodische Schwingung mit einer Periodendauer $T = 0,5$ s
Frequenz $f = 1/T = 2$ Hz

Die **Amplitude** p stellt das Maß der Schwingung dar. Für eine Schallwelle würde das z.B. die Auslenkung eines Moleküls aus der Ruhelage bzw. die damit einhergehende Druckänderung sein. Für ein schwingendes Pendel ist es die Auslenkung in cm oder für eine elektrische Schwingung die Spannung in Volt.

Eine **Schwingungsperiode** T ist die Dauer, bis sich ein bestimmtes Schwingungsmuster (hier eine positive und eine negative Halbwelle) wiederholt. Es gibt natürlich auch nicht periodische Formen, die einen einmaligen Verlauf aufweisen und sich nicht in ihrer Form wiederholen.

Die **Frequenz** f besagt, wie oft sich innerhalb einer Sekunde eine Schwingungsperiode wiederholt. Ein Signal mit einer Frequenz von 100 Hz enthält pro Sekunde 100 Schwingungsperioden.

Die **Wellenlänge** λ ist abhängig von der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle in einem Medium und errechnet sich aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit geteilt durch die Frequenz.

Auf Schallausbreitung in Luft bezogen wird die Amplitude als Wechseldruck mit der physikalischen Einheit Pa (Pascal) angegeben. Die Wahrnehmungsgrenze des menschlichen Ohres liegt bei ca. $20\mu\text{Pa}$ (20×10^{-6} Pa), die Schmerzgrenze bei ca. 200 Pa. Die für den Hörbereich relevanten Frequenzen erstrecken sich von ca. 20 Hz bis 20.000 Hz, was einer Periodendauer zwischen 50ms und 50 μ s entspricht. Die Einheit Hz entspricht 1/s. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Schallwelle in Luft, die **Schallgeschwindigkeit** c , beträgt ca. 340m/s. Eine sich in Luft ausbreitende Schallwelle mit einer Frequenz von 1 kHz hat somit eine Wellenlänge von 34cm. Bei 100 Hz errechnet sich die Wellenlänge entsprechend zu 3,4m und bei 10 kHz zu 3,4cm.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340 \frac{m}{s}}{1000 \frac{1}{s}} = 0,34m$$

Gleichung 2-1

Die Wellenlänge wird sich bei allen späteren Betrachtungen als eine der wichtigsten Größen zur Beurteilung des akustischen Verhaltens von Gegenständen, Räumen, Materialien, Schallquellen etc. herausstellen. Besonders wichtig ist hier die äußerst große Spannweite für den menschlichen Hörbereich, die sich von 17m bei 20 Hz bis zu 1,7cm bei 20.000 Hz erstreckt.

Ein einfaches Beispiel aus der Raumakustik soll diesen Zusammenhang erläutern. Ein akustisch poröses Material, wie z.B. Mineralwolle, ist hoch absorbierend. Diese Aussage ist ebenso richtig, wie auch falsch. Exakt ist dagegen die Aussage, dass die Mineralwolle für alle Schallwellen, bei denen ein Viertel der Wellenlänge kleiner als die Dicke der Mineralwolle ist, sehr gut absorbiert. Für tiefere Frequenzen mit einer größeren Wellenlänge lässt das Absorptionsverhalten schnell nach. Eine auf eine feste Wand aufgebrachte 10cm dicke Schicht Mineralwolle absorbiert demnach für den Frequenzbereich oberhalb von 850 Hz sehr gut.

$$f = \frac{340 \frac{m}{s}}{4 \cdot 0,1m} = 850 \frac{1}{s} = 850Hz$$

Gleichung 2-2

2.3 Schallausbreitung

Schallausbreitung bedarf generell eines Mediums, das Luft, Wasser, Metall etc. sein kann. In Luft herrscht ein gegebener Gleichdruck p_0 (ca. 100 kPa), dem ein wesentlich kleinerer Wechseldruck p (Schalldruck) überlagert wird.

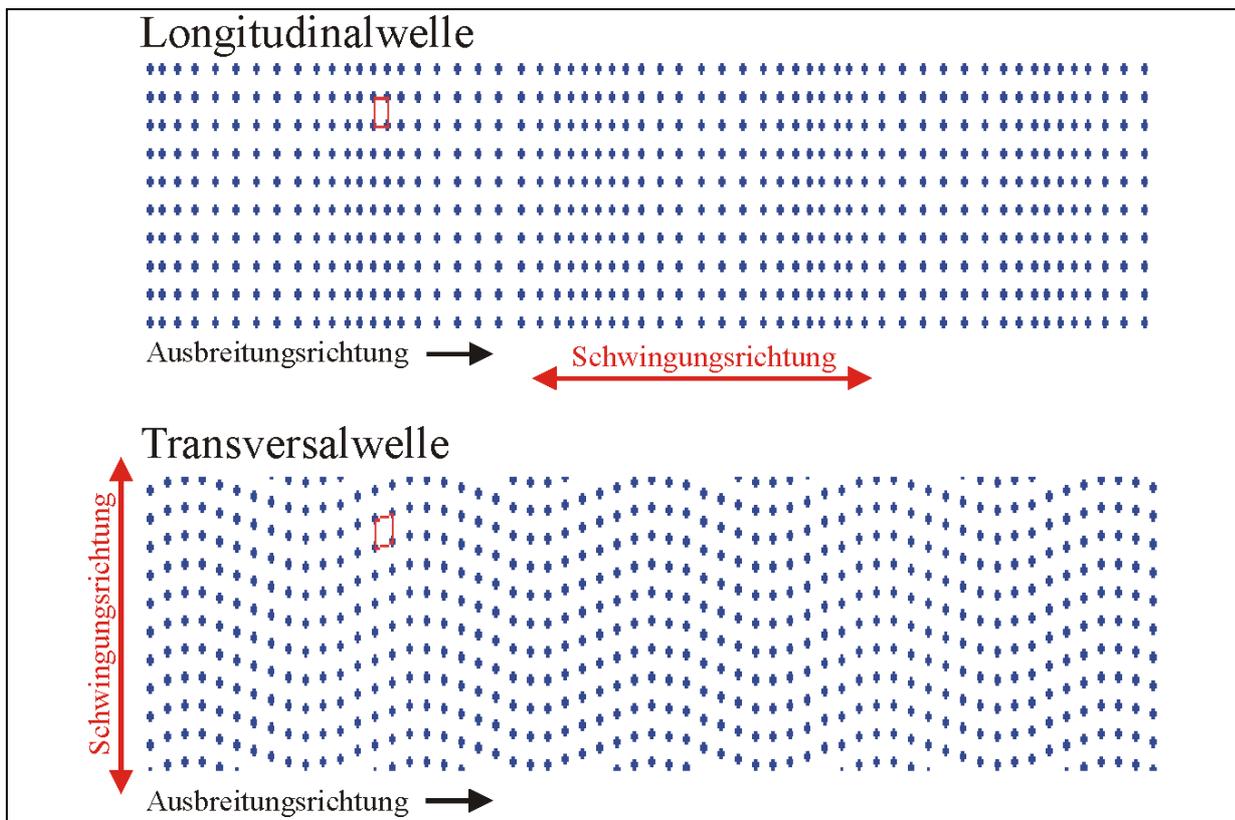


Abbildung 4 Ausbreitungsformen von Wellen im Medium.

Oben: Longitudinalwelle, die in Form von Dichteschwankungen in Gasen, Flüssigkeit und Festkörpern auftreten kann.
Die Ausbreitungsrichtung ist gleich der Schwingungsrichtung.

Unten: Transversalwelle, die nur in Festkörpern auftreten kann.
Die Ausbreitungsrichtung ist senkrecht zur Schwingungsrichtung.

2.4 Luftschall, Körperschall, ...

Luftschall basiert immer auf einer lokalen Dichteänderung des Medium Luft. Die hieraus resultierende Wellenform nennt sich entsprechend Longitudinalwellen, d.h. die Wellenform bzw. die Schwingungsrichtung ist in Ausbreitungsrichtung. Longitudinalwellen sind in Gasen und Flüssigkeiten die einzig mögliche Wellenform.

In Festkörpern breitet sich Körperschall als Longitudinalwellen, als Transversalwellen, als Oberflächenwellen sowie als Dehn- oder Biegewellen aus. Abbildung 5 stellt die Wellenausbreitung in Festkörpern für alle vier Varianten dar.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit respektive Schallgeschwindigkeit ist sehr stark vom Medium und auch von seiner Temperatur abhängig. In Luft kann mit guter Näherung bei Raumtemperatur mit 340m/s gerechnet werden.

Medium	Ausbreitungsgeschwindigkeit bei 0°C in [m/s]		Luft Temperatur in °C	Ausbreitungsgeschwindigkeit in [m/s]
Luft	331		-10	325
Wasser	1485		0	331
Eisen	5100		+10	337
Holz	3000-4000		+20	343
Glas	5000		+30	349

Tabelle 1 Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in unterschiedlichen Medien und in Luft bei verschiedenen Temperaturen

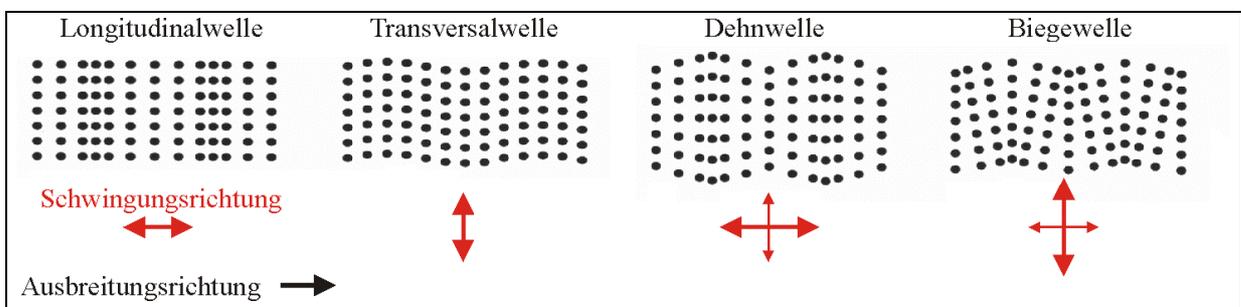


Abbildung 5 Verschiedene Formen der Wellenausbreitung in festen Medien. In Gasen und Flüssigkeiten gibt es nur Longitudinalwellen.

2.5 Schalldruck und Schalldruckpegel

Wie bereits kurz angesprochen reicht die Fähigkeit des Gehörs zur Wahrnehmung unterschiedlich lauter Geräusche von sehr kleinen Schalldruckwerten an der Hörschwelle bei ca. $20\mu\text{Pa}$ (20×10^{-6} Pa) bis zur Schmerzgrenze bei ca. 200 Pa. (Pa = Pascal = N/m^2)

Zwischen diesen beiden Schalldruckwerten liegt ein Faktor $10^7 = 10.000.000$ (entsprechend 140 dB). Dieser große Umfang macht eine Darstellung im herkömmlichen linearen Maßstab mehr oder weniger unmöglich. Eine gangbare Lösung ist daher die Darstellung im logarithmischen Maßstab bezogen auf einen Bezugswert. Bei Schalldrücken war es naheliegend, die Hörschwelle als Bezugswert auszuwählen. Der Bezugswert beträgt damit 20×10^{-6} Pa.

Ein gegebener Schalldruckwert p in Pa wird wie folgt in einen Schalldruckpegel L_p oder SPL umgerechnet:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad \text{mit dem Bezugswert} \quad p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \quad \text{Gleichung 2-3}$$

(Bei Leistungs- und Energiewerten ist der Faktor 20 durch 10 zu ersetzen)

Die Schalldruckwerte des Hörbereiches lassen sich so auf einen Pegelbereich von 0 bis 140dB mit überschaubaren Zahlen abbilden. Pegel werden allgemein in dB (Dezibel) ohne physikalische Einheit angegeben, da es sich um eine Bezugsgröße in Relation zur einem Bezugswert gleicher physikalischer Größe handelt.

$$p = 20 \mu\text{Pa} \text{ entspricht } L_p = 0\text{dB} \quad ; \quad p = 200\text{Pa} \text{ entspricht } L_p = 140\text{dB}$$

Als besonders praktisch erweisen sich die dB-Werte auch beim Rechnen mit einfachen Faktoren:

Der Faktor 2 ist gleich +6 dB, entsprechend ist der Faktor 0,5=1/2 gleich -6 dB.

Der Faktor 10 ist gleich +20 dB, entsprechend ist der Faktor 0,1=1/10 gleich -20 dB.

.....

Der Faktor 1000 ist gleich +40 dB, entsprechend ist der Faktor 0,001=1/1000 gleich -40 dB.

Diese Reihe lässt sich weiter fortsetzen. Eine Multiplikation mit einem Faktor geht bei dB-Skalierung in eine Addition eines dB-Wertes über. Faktoren größer 1 ergeben positive dB-Werte, die 1 entspricht 0 dB und Faktoren kleiner 1 ergeben negative dB-Werte.

Die nachfolgende Tabelle zeigt einige Beispiele.

Faktor	dB Wert		Faktor	dB Wert		Faktor	dB Wert
1000	+60		0,5	-6		20	26
100	+40		0,1	-20		50	34
10	+20		0,01	-40		200	46
2	+6		0,001	-60		1,414	3
1	0		0,0001	-80		0,707	-3

Tabelle 2 Faktoren und entsprechende dB-Werte

Eine Pegelveränderung von 1dB ist als geringfügige Änderung der Lautstärke wahrnehmbar und eine Pegelveränderung von 10dB wird in der Empfindung als doppelte Lautstärke wahrgenommen. 20dB Pegeländerung entspricht so einer Vervielfachung der wahrgenommenen Lautstärke. Nachfolgend einige Beispiele als Soundfiles.

Inhalt	Sample File	Play
1000 Hz Sinussignale mit Schalldruckunterschieden von:		
-1dB = 0,89	S1K-01DB.WAV	
-3dB = 0,707	S1K-03DB.WAV	
-6dB = 0,5	S1K-06DB.WAV	
-10dB = 0,316	S1K-10DB.WAV	
-20dB = 0,1	S1K-20DB.WAV	

Tabelle 3 Hörbeispiele zu dB-Werten ; der lautere Wert (0dB) ist in allen Beispielen gleich

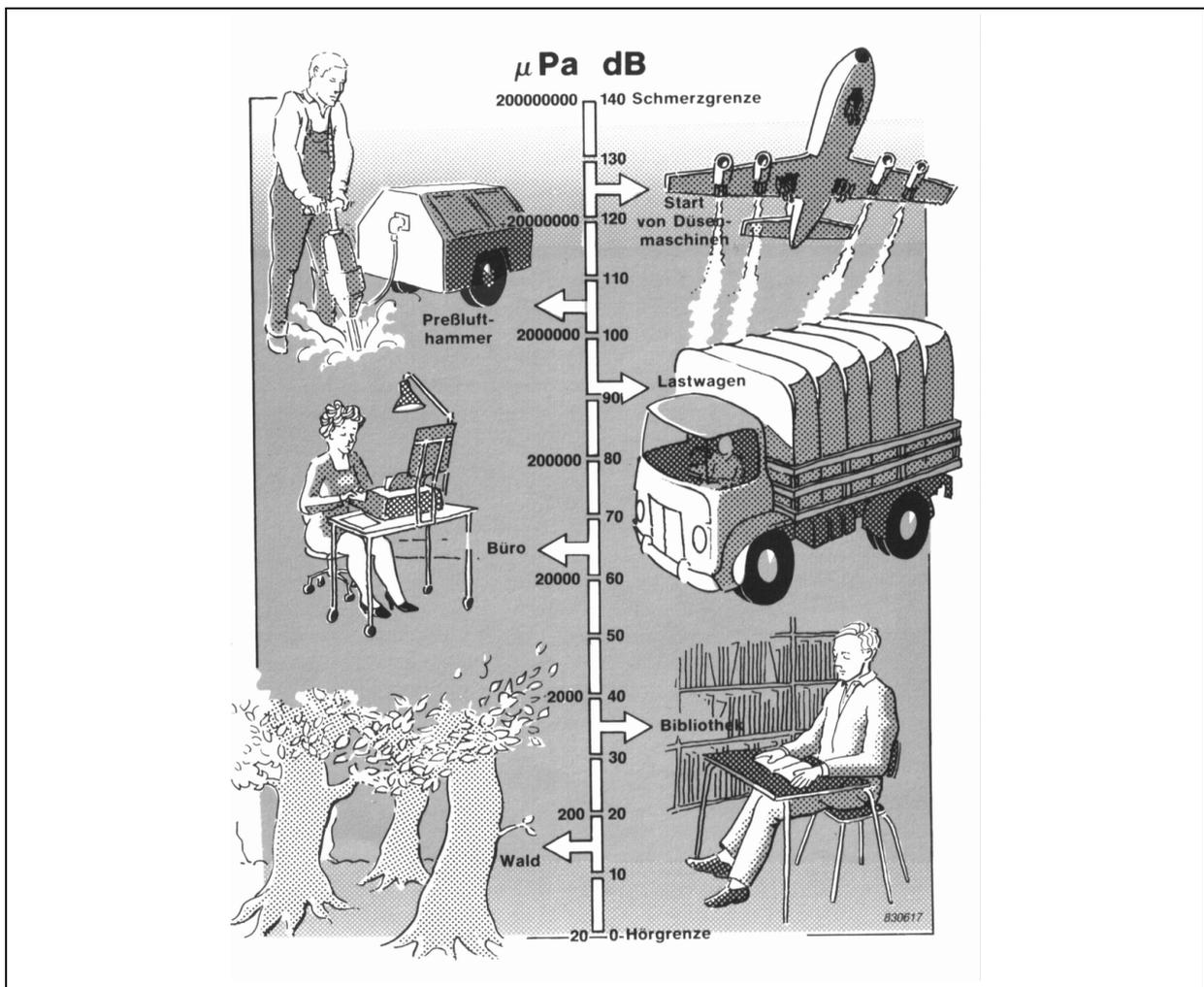


Abbildung 6 Schalldruckwerte in Pa und in dB bezogen auf $20 \times 10^{-6} \text{Pa}$ mit Beispielen [aus 2]

2.6 Frequenzverhältnisse

Mit dem hörbaren Frequenzbereich und dessen Darstellung verhält es sich in gewisser Weise ähnlich den Schalldruckpegeln. Auch bei der Darstellung der Frequenzbereiche bedient man sich im Normalfall einer logarithmischen Skalierung, die der Tonhöhenempfindung entspricht. Eine Oktave stellt eine Frequenzverdopplung (2:1) dar, was dann auf einer logarithmischen Frequenzskala unabhängig von der gerade betrachteten Frequenz immer der gleiche Abstand ist.

Der hörbare Frequenzbereich erstreckt sich je nach Alter und Zustand des Gehörs von ca. 20 Hz bis 20 kHz (=20.000 Hz), was drei Dekaden (Frequenzverhältnis 10:1) oder ca. 10 Oktaven entspricht. In Oktaven ausgedrückt errechnet sich das Verhältnis von 20.000 Hz zu 20 Hz als Logarithmus zur Basis 2 des Frequenzverhältnisses.

$$\frac{\log_{10} \frac{20.000}{20}}{\log_2} = 9,69 \approx 10$$

Gleichung 2-4

Den Frequenzbereich unterhalb von 20 Hz bezeichnet man als Infraschall, den Bereich oberhalb von 20 kHz als Ultraschall. Infraschall mit sehr tiefen Frequenzen kann z.B. durch Luftbewegungen in Klimaanlage oder Lüftungsschächten entstehen. Hörbar ist dieser Schall nicht, trotzdem wird ihm eine gewisse Wirkung auf das vegetative Nervensystem nachgesagt. Ultraschall wird von speziellen Wandlern (Lautsprecher für Ultraschall) erzeugt und in vielen technischen Bereichen zur Reinigung, zur Materialbearbeitung und zur Materialprüfung eingesetzt.

Eine hochwertige Lautsprecherwiedergabe erstreckt sich mit gewissen Einschränkungen über den gesamten hörbaren Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz. Telefone übertragen dagegen meist nur einen sehr eingeschränkten Frequenzbereich von 300 Hz bis 3400 Hz.

Inhalt	Sample File	Play
Sprecher 20 Hz - 20.000 Hz (gute HiFi Qualität)	SP-2020k.WAV	
Sprecher 100 Hz - 10.000 Hz (guter Gettoblaster)	SP10010k.WAV	
Sprecher 300 Hz - 3.400 Hz (Telephonqualität)	SP3003k4.WAV	
Musik 20 Hz - 20.000 Hz (gute HiFi Qualität)	MU-2020k.WAV	
Musik 100 Hz - 10.000 Hz (guter Gettoblaster)	MU10010k.WAV	
Musik 300 Hz - 3.400 Hz (gute HiFi Qualität)	MU3003k4.WAV	

Tabelle 4 Hörbeispiele zur Bandbegrenzung

In der technischen Akustik übliche Angaben z.B. für die frequenzabhängige Beschaffenheit eines Materials oder auch für die Charakterisierung eines Lautsprechers werden typischer Weise in Oktav- oder in Terzbändern gemacht. Die Absorptionskoeffizienten eines Baumaterials werden so als gemittelte Größe in 7 Oktavbändern oder in 21 Terzbändern angegeben. Für die Terz- oder Oktavbänder wird immer die Band-Mittenfrequenz angegeben.

Oktavband Mittenfrequenz f_m	Frequenzbereich von f_u bis f_o	Sample File	Play	zugehörige Terzbänder
125 Hz	89-176 Hz	OCT-125.WAV		100, 125 und 160 Hz
250 Hz	176-354 Hz	OCT-250.WAV		200, 250 und 315 Hz
500 Hz	354-707 Hz	OCT-500.WAV		400, 500 und 630 Hz
1000 Hz	707-1414 Hz	OCT-1000.WAV		800, 1k und 1250 Hz
2000 Hz	1414-2828 Hz	OCT-2000.WAV		1k6, 2k und 2k5 Hz
4000 Hz	2828-5656 Hz	OCT-4000.WAV		3k15, 4k und 5k Hz
8000 Hz	5656-11313 Hz	OCT-8000.WAV		6k3, 8k und 10k Hz
	Rosa Rauschen	PNK16.WAV		
	Weißes Rauschen	NOI16.WAV		

Tabelle 5 Tabelle mit Oktav- und Terzband Filtern, deren Mittenfrequenzen und Bandgrenzen

Die in der Tabelle aufgeführten Hörbeispiele enthalten in Oktavbändern gefiltertes rosa Rauschen mit gleicher Leistung in allen Oktavbändern. Für ein weißes Rauschen würde sich die Leistung von einem Oktavband zum nächst höheren Oktavband jeweils um 3 dB erhöhen.

Oktav- und Terzbandfilter sind Filter mit einer relativen Bandbreite. D.h. die Bandgrenzen am unteren und oberen Rand f_o und f_u errechnen sich durch Multiplikation bzw. Division mit einem Faktor (1,414 bei Oktaven) aus der Mittenfrequenz. Die Bandgrenzen stehen daher immer in einem festen Verhältnis zueinander (Faktor 2 bei Oktaven). Daraus ergibt sich die relative Bandbreite im Gegensatz zur absoluten Bandbreite, die eine feste Differenz zwischen unterer und oberer Grenzfrequenz definiert. Die relative Bandbreite aller in Tabelle 1 aufgeführten Oktavbandfilter ist konstant. Die absolute Bandbreite verdoppelt sich jedoch jeweils zum nächst höheren Oktavband.

Die untere und obere Grenzfrequenz (f_u und f_o) von Oktav- oder Terzbändern lassen sich in einfacher Weise aus der Mittenfrequenz f_m des Bandes berechnen.

$$\text{Für Oktavbänder gilt: } f_o = f_m \sqrt{2} \quad f_u = f_m \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Für Terzbänder gilt: } f_o = f_m \sqrt{1,2599} = f_m \sqrt{2^{1/3}} \quad f_u = f_m \frac{1}{\sqrt{1,2599}} = f_m \frac{1}{\sqrt{2^{1/3}}}$$

Oktavband 1000 Hz:

$$f_o = 1414 \text{ Hz und } f_u = 707 \text{ Hz}$$

-> relative Bandbreite $1414\text{Hz}/707\text{Hz} = 2$ und absolute Bandbreite $1414\text{Hz} - 707\text{Hz} = 707\text{Hz}$

Oktavband 2000 Hz:

$$f_o = 2828 \text{ Hz und } f_u = 1414 \text{ Hz}$$

-> relative Bandbreite $2828\text{Hz}/1414\text{Hz} = 2$ und absolute Bandbreite $2828\text{Hz} - 1414\text{Hz} = 1414\text{Hz}$

Die Hörbeispiele der folgenden Tabelle stellen die musikalischen Frequenzverhältnisse jeweils in Bezug zum Grundton a^1 mit 440 Hz dar. Der Beispielton für eine Oktave liegt somit bei 880 Hz und für eine große Terz bei 554 Hz.

Intervall	Notenpaar	Zahl der Halbtöne	Halbtonschritte [cent]	Frequenzverhältnisse	Play
Reine Prime	c-c	0	0	1,0000	SIN-440.WAV
Übermäßige Prime	cis-c	1	100	1,0595	SIN-466.WAV
Kleine Sekunde	des-c	1	100	1,0595	SIN-466.WAV
Große Sekunde	d-c	2	200	1,1225	SIN-494.WAV
Übermäßige Sekunde	dis-c	3	300	1,1892	SIN-532.WAV
Kleine Terz	es-c	3	300	1,1892	SIN-532.WAV
Große Terz	e-c	4	400	1,2599	SIN-554.WAV
Reine Quarte	f-c	5	500	1,3348	SIN-587.WAV
Übermäßige Quarte	fis-c	6	600	1,4142	SIN-622.WAV
Verminderte Quarte	ges-c	6	600	1,4142	SIN-622.WAV
Reine Quinte	g-c	7	700	1,4983	SIN-659.WAV
Übermäßige Quinte	gis-c	8	800	1,5874	SIN-698.WAV
Kleine Sexte	as-c	8	800	1,5874	SIN-698.WAV
Große Sexte	a-c	9	900	1,6818	SIN-740.WAV
Übermäßige Sexte	ais-c	10	1000	1,7818	SIN-784.WAV
Kleine Septime	b-c	10	1000	1,7818	SIN-784.WAV
Große Septime	h-c	11	1100	1,8878	SIN-831.WAV
Oktave	c ¹ -c	12	1200	2,0000	SIN-880.WAV
				a ¹ 440 Hz	SIN-440.WAV

Tabelle 6 Intervalle einer Oktave in der Musik und deren Frequenzverhältnisse
Bezug ist der Grundton a^1 mit 440 Hz

Die folgende Grafik zeigt eine kleine Übersicht der Frequenzbereiche von Musikinstrumenten und Singstimmen.

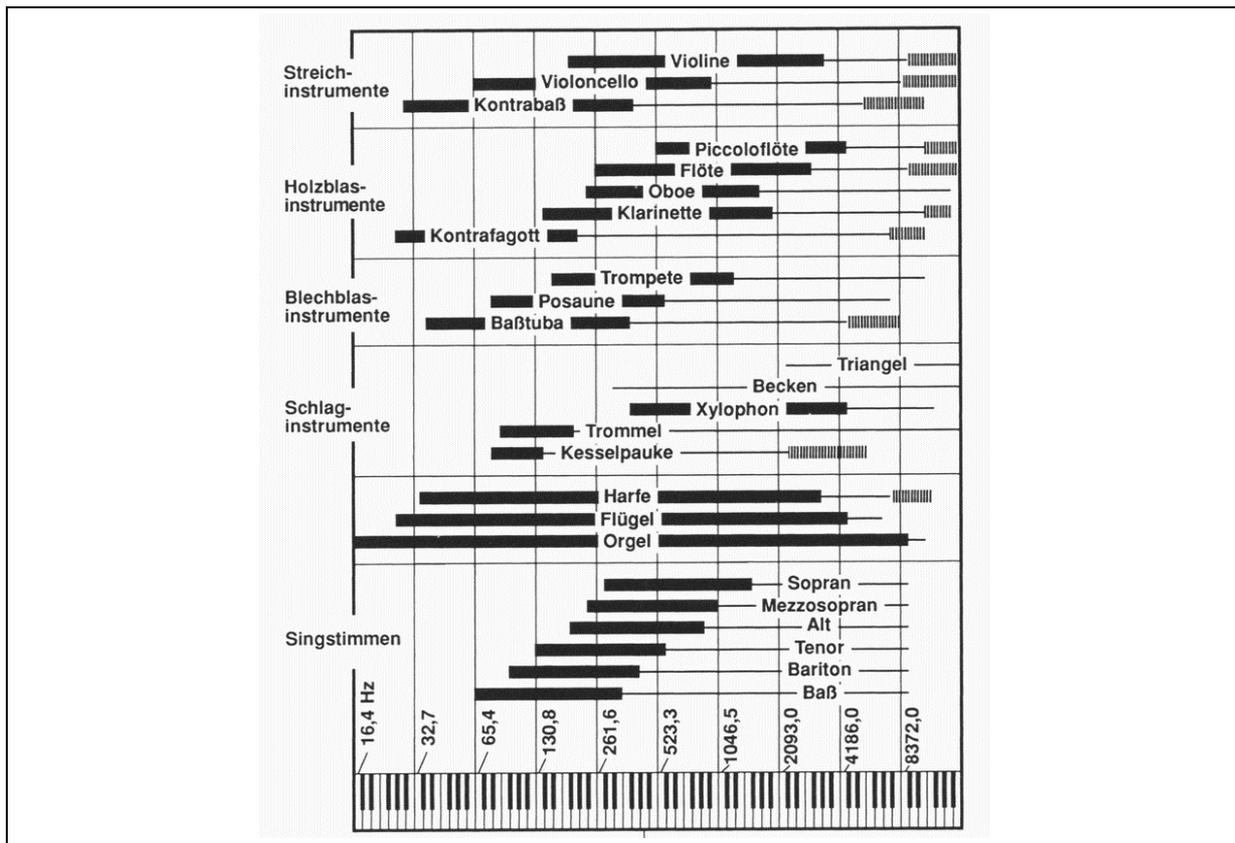


Abbildung 7 Frequenzbereiche von Musikinstrumenten und Singstimmen [aus 5]
Dicke Linie: Grundtonbereich ; Dünne Linie: harmonische Obertöne
Gestrichelte Linien: nicht harmonische Geräusche

2.7 Geräusche, Töne, Klänge, etc...

Schallereignisse aller Art werden häufig als **Geräusche** bezeichnet. Eine nähere Charakterisierung ist dagegen schon mit den Begriffen **Klang** oder **Ton** verbunden. Weitere Begriffe für Schallereignisse sind Impulse, Rauschen, Sweeps, etc..

Aus technischer Sicht wird als Ton der reine Sinuston bezeichnet. Ein Gemisch aus Tönen, deren Frequenzen in einem ganzzahligen Verhältnis von Halbtönen (1/12 Oktave) zueinander stehen, ergibt ein harmonisches Tongemisch oder einen Klang. Musikinstrumente erzeugen so Klänge und in seltenen Fällen auch weitgehend reine Töne (z.B. Orgelpfeife oder Querflöte).

In den folgenden Grafiken gibt es eine Reihe von Beispielen, die ein Signal bzw. ein Geräusch einmal im Zeitverlauf (linkes Bild) und einmal in der spektralen Zusammensetzung (rechtes Bild) zeigen. Die Bezeichnung Geräusch bezieht sich dabei immer auf ein Schallereignis, wogegen die Bezeichnung Signal noch allgemeiner aufzufassen und auch auf elektrische Signale anzuwenden ist.

Die beide Sinussignale von 400 Hz und 1000 Hz sind monofrequenter Natur, der amplitudenmodulierte Sinus besteht aus zwei Sinustönen von 950 und 1050 Hz. Der Sweep, der Impuls und die beiden Rauschsignale sind breitbandig und enthalten alle Frequenzanteile. Weißes Rauschen enthält alle Frequenzen mit gleichem Pegel. Rosa Rauschen hat dagegen eine gleich bleibende Energie in allen Frequenzbändern, so dass in der Pegeldarstellung die Kurve mit 3 dB pro Oktave bei zunehmender Frequenzen abfällt.

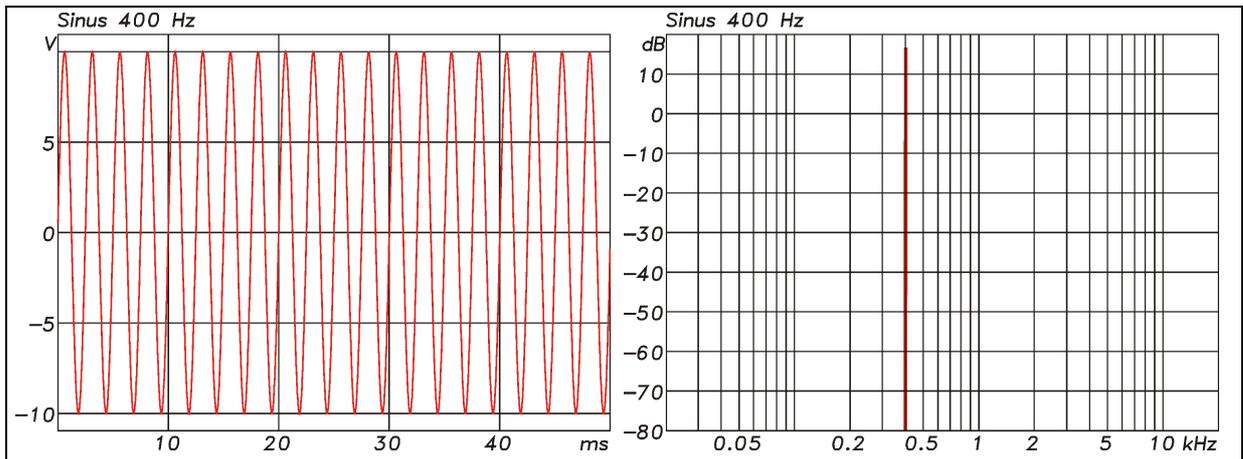


Abbildung 8 Sinuston 400 Hz im Zeitverlauf (links) und im Frequenzspektrum (rechts)

Sample: SIN-400.WAV

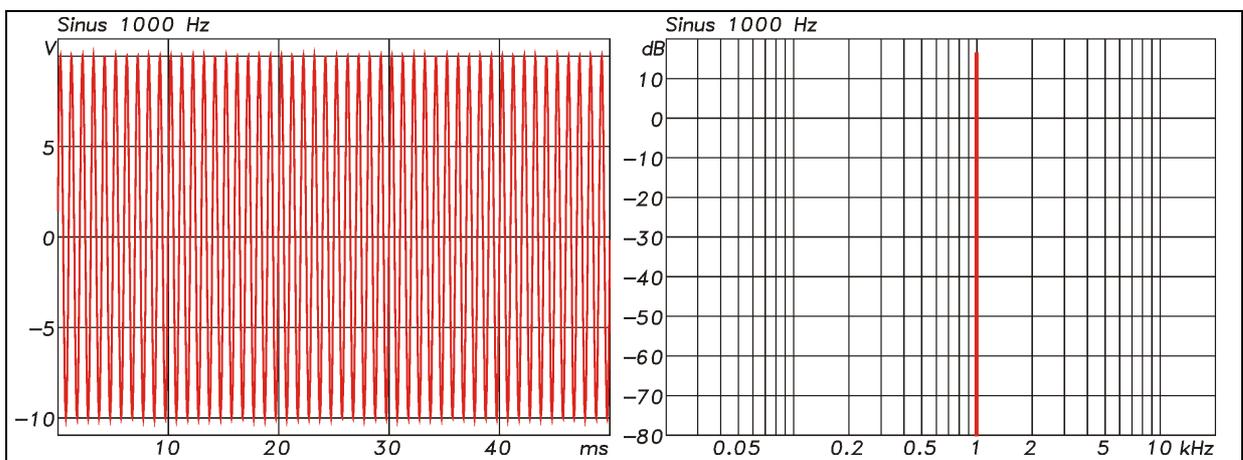


Abbildung 9 Sinuston 1000 Hz im Zeitverlauf (links) und im Frequenzspektrum (rechts)

Sample: SIN-1000.WAV

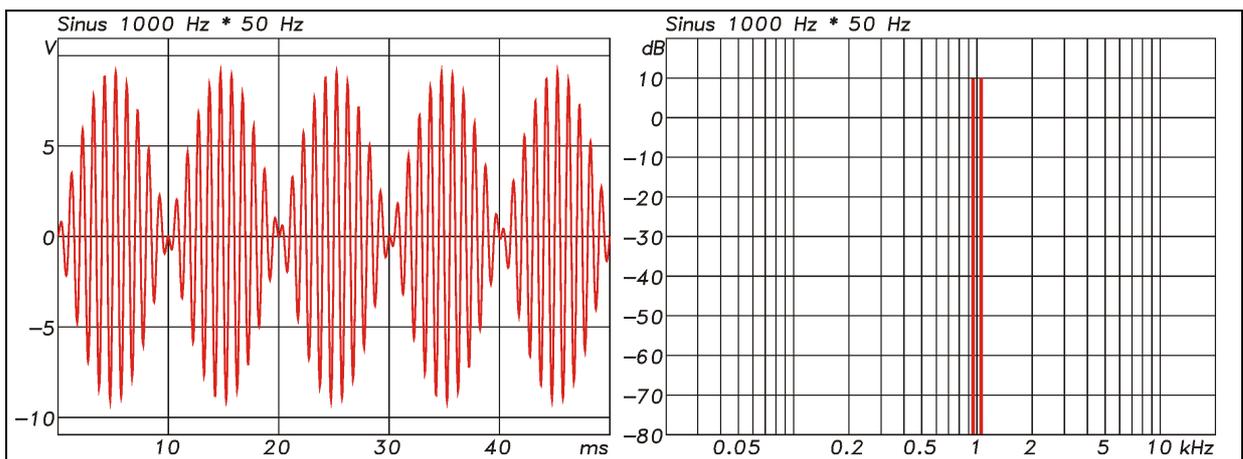


Abbildung 10 Amplitudenmodulation eines 1000 Hz Sinustones mit 50 Hz im Zeitverlauf (links) und im Frequenzspektrum (rechts)

Die Multiplikation im Zeitbereich geht über in eine Faltung im Frequenzbereich mit zwei resultierenden Frequenzlinien bei 950 und 1050 Hz

Sample: AM-1k-50.WAV

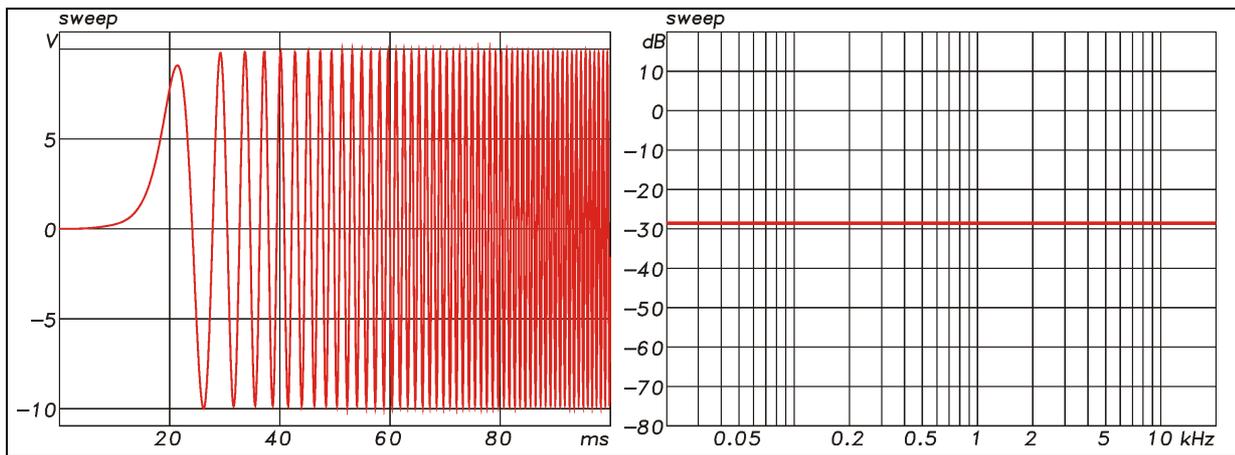


Abbildung 11 Frequenzmodulation in einem Sweep von 0 Hz bis 22 kHz im Zeitverlauf (links) und im Frequenzspektrum (rechts)
Sample: SWP16.WAV

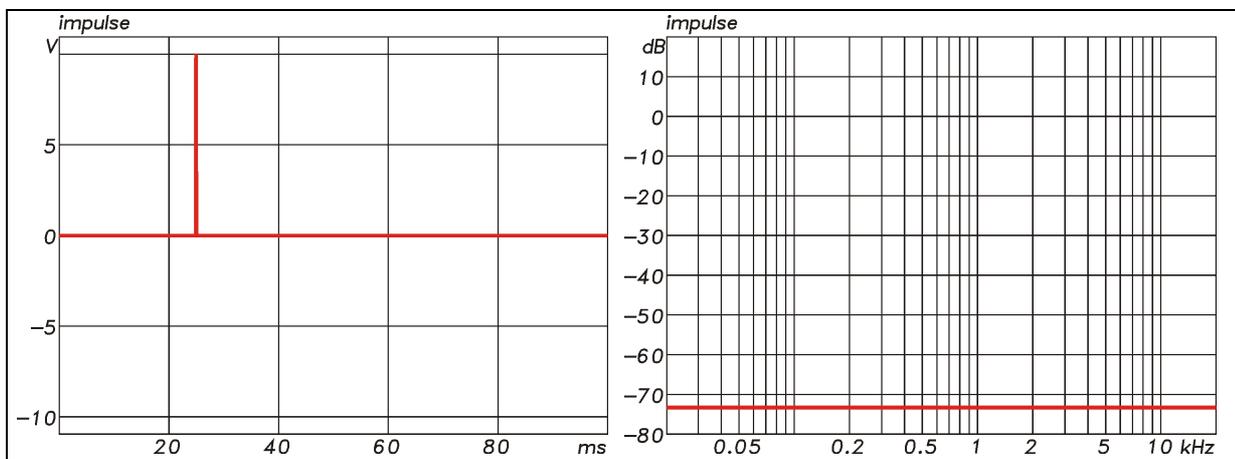


Abbildung 12 Impuls im Zeitverlauf (links) und im Frequenzspektrum (rechts)
Sample: IMP16.WAV

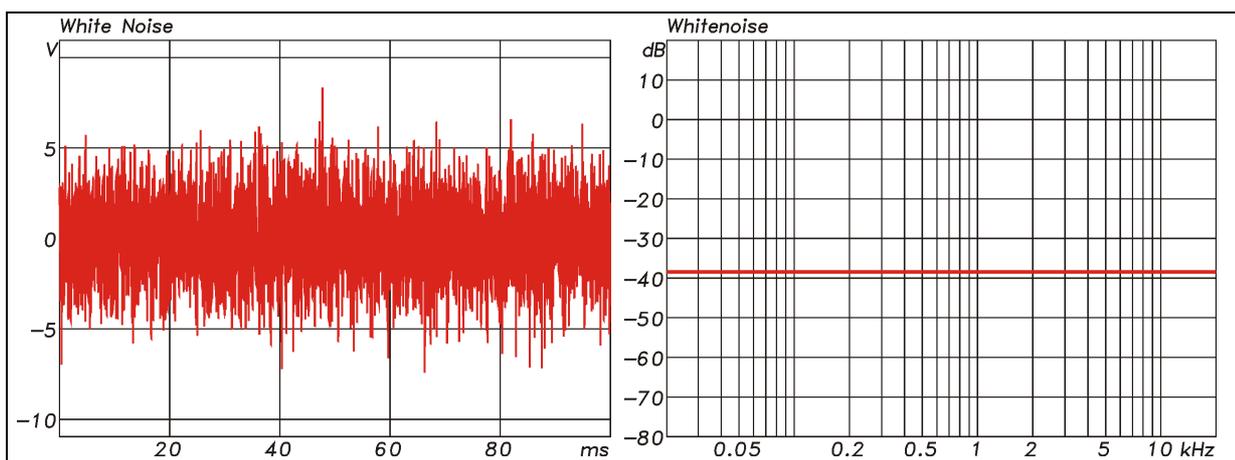


Abbildung 13 Weißes* Rauschen im Zeitverlauf (links) und im Frequenzspektrum (rechts)
Sample: NOI16.WAV
 * eine entsprechende spektrale Verteilung im Lichtwellenbereich entspräche weißem Licht

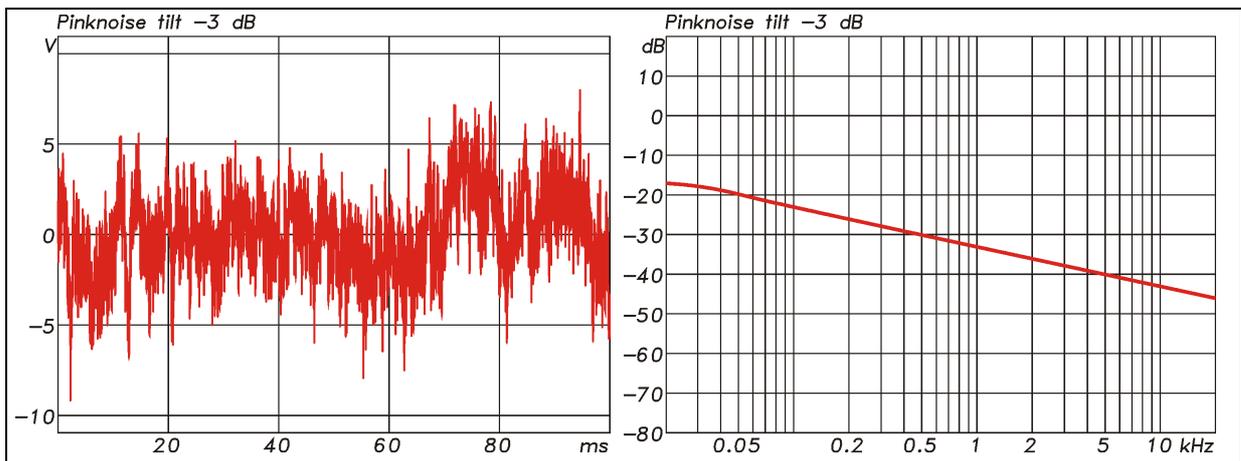


Abbildung 14 Rosa* Rauschen im Zeitverlauf (links) und im Frequenzspektrum (rechts)

Sample: [PNK16.WAV](#)

* eine entsprechende spektrale Verteilung im Lichtwellenbereich entspräche dem rosa Licht

2.8 Zeitverhalten eines Geräusches

Neben der spektralen Zusammensetzung eines Geräusches interessiert vor allem bei nicht stationären Signalen das zeitliche Verhalten oder der zeitliche Verlauf. Zu unterscheiden ist hier zwischen stationären, quasistationären und einmaligen Ereignissen. Ein Sinussignal stellt einen stationären oder eingeschwungenen Zustand dar, der sich entsprechend der Frequenz ständig wiederholt. Gleiches gilt für die Überlagerung mehrerer Sinustöne, aus denen neue, ebenfalls stationäre und periodische Zeitverläufe entstehen. In der Praxis kommen stationäre Geräusche in ähnlicher Form durch Maschinen, Räder, Fließbänder, Drucker, Motoren etc. vor.

Bei Musikinstrumenten teilt sich der zeitliche Verlauf der Schallabstrahlung in eine Einschwingphase, in einen quasistationären Abschnitt und in eine Ausschwingphase.

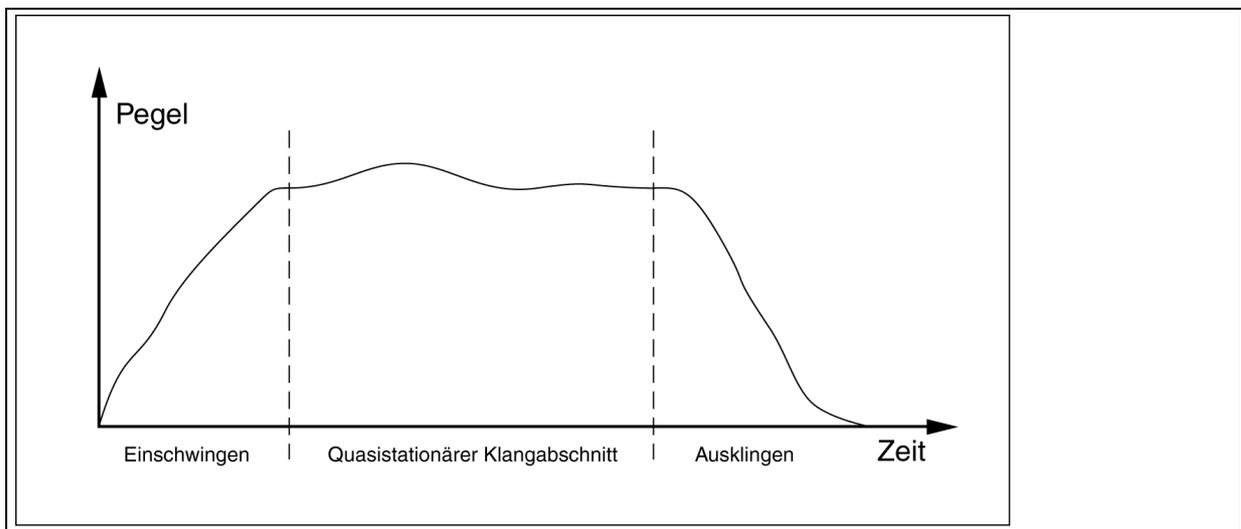


Abbildung 15 Zeitverlauf eines musikalischen Klanges mit Einschwingen, Quasistationärer Phase und Ausschwingen [aus 3]

Die absoluten und relativen zeitlichen Verhältnisse dieser Phasen zueinander sind von Instrument zu Instrument sehr unterschiedlich. Ein Schlaginstrument hat eine sehr kurze Einschwingphase, einen nicht vorhandenen quasistationären Abschnitt und eine unter Umständen sehr lange Ausschwingphase. Eine Orgelpfeife dagegen kann einen bis zu einer halben Sekunde langen Einschwingvorgang und ein beliebig langes quasistationäres Verhalten haben.

2.9 Zeitsignale und Frequenzspektren

Die Betrachtung eines Zeitsignals im Frequenzbereich erfolgt über eine Fourier-Transformation, eine mathematische Berechnung auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. In der Praxis angewandt wird eine Sonderform der Fourier-Transformation, die Fast-Fourier-Transformation (auch FFT genannt). Mit Hilfe der FFT erfolgt der Übergang vom Zeitsignal zum Frequenzspektrum. Den umgekehrten Weg beschreibt man mit Hilfe der inversen Fourier-Transformation (IFFT). Heutige PC basierende Meßsysteme setzen die FFT als Standard Analyse Verfahren für die Signalbearbeitung ein. Ein ausgewählter zeitlicher Abschnitt eines Signals mit 2^n Werten wird dabei mit Hilfe einer sogenannten Fensterfunktion ausgeschnitten und in den Frequenzbereich transformiert.

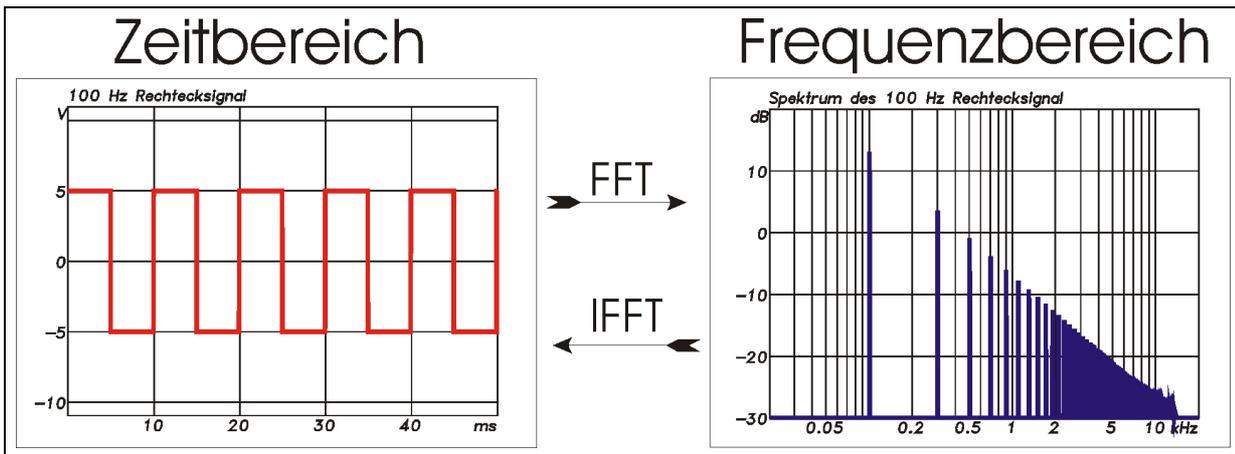
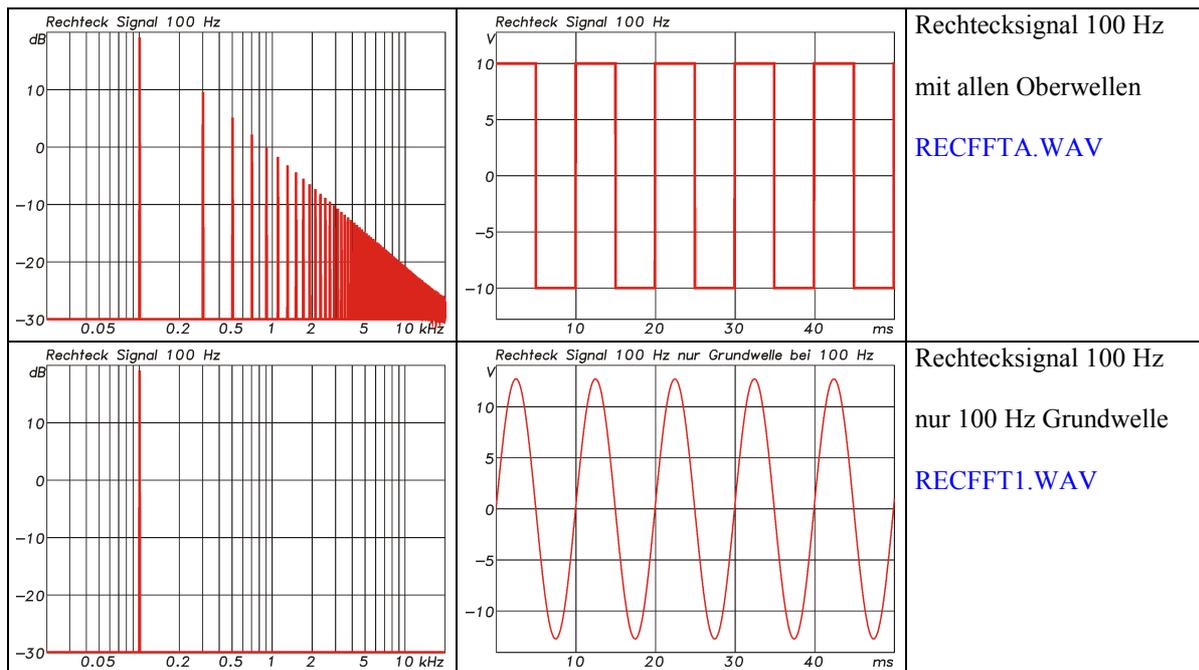


Abbildung 16 FFT und IFFT zwischen Zeit- und Frequenzbereich
 links: periodisches Zeitsignal ; rechts: diskretes Frequenzspektrum

Anhand eines Rechtecksignals kann die Synthetisierung aus einzelnen Sinussignalen besonders anschaulich erläutert werden. Die FFT beschreibt die Analyse eines periodischen Zeitsignals in Form eines Spektrums mit diskreten Sinussignalen. Die IFFT die Synthetisierung eines periodischen Zeitsignals aus dem diskreten Frequenzspektrum.



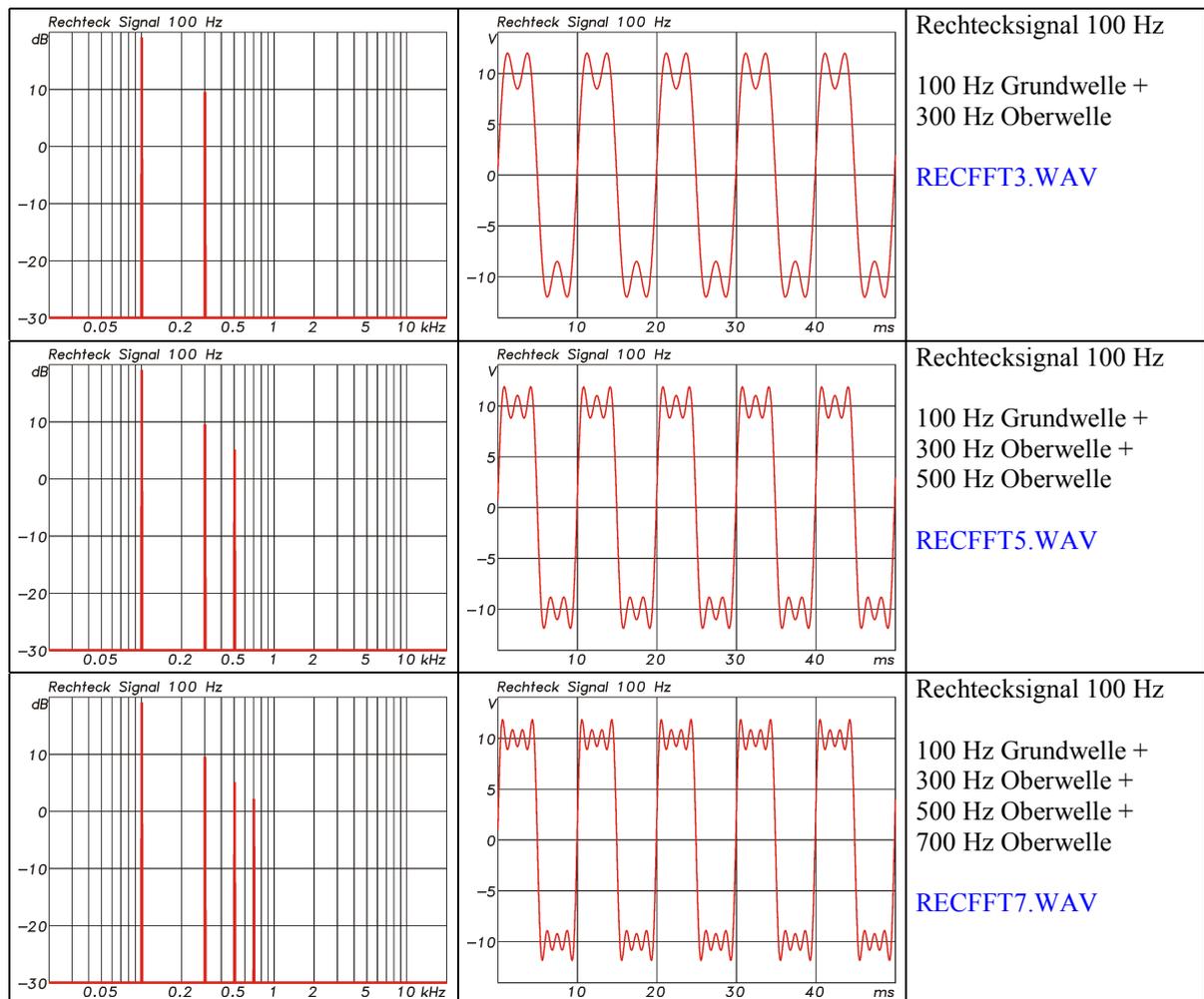


Abbildung 17 Synthetisierung eines 100 Hz Rechtecksignals

Abbildung 18 zeigt mit einem monofrequenten Sinus, einem Rechteck und einem Sägezahn drei weitere periodische Signale zusammen mit ihren Spektren im Frequenzbereich. Alle drei Signale haben die Frequenz 100 Hz, die sich in den Spektren als Grundwelle mit der höchsten Frequenzlinie widerspiegelt. Für den reinen Sinus gibt es keine weiteren Oberwellen. Das Rechtecksignal enthält Oberwellen mit ungeradzahlig Vielfachen der Grundwelle, d.h. bei 300, 500, 700, 900 ... Hz. Der Sägezahn verfügt über Oberwellen mit allen ganzzahligen Vielfachen der Grundwelle bei 200, 300, 400, 500, 600, Hz.

Für die Transformationen zwischen Zeit- und Frequenzbereich können einige einfache Regeln die Signalform betreffend abgeleitet werden. Zeitsignale, die sich periodisch wiederholen, können durch ein diskretes Spektrum im Frequenzbereich beschrieben werden. D.h., das Zeitsignal lässt sich aus einer Überlagerung einzelner Sinussignale entsprechend der Verteilung im Spektrum zusammensetzen.

Ist ein Zeitsignal nicht periodisch (z.B. ein Impuls), so wird es im Frequenzbereich durch ein kontinuierliches Spektrum beschrieben.

***Periodische Zeitsignale sind durch ein diskretes Spektrum im Frequenzbereich zu beschreiben.
Nichtperiodische Zeitsignale verfügen dagegen über ein kontinuierliches Frequenzspektrum.***

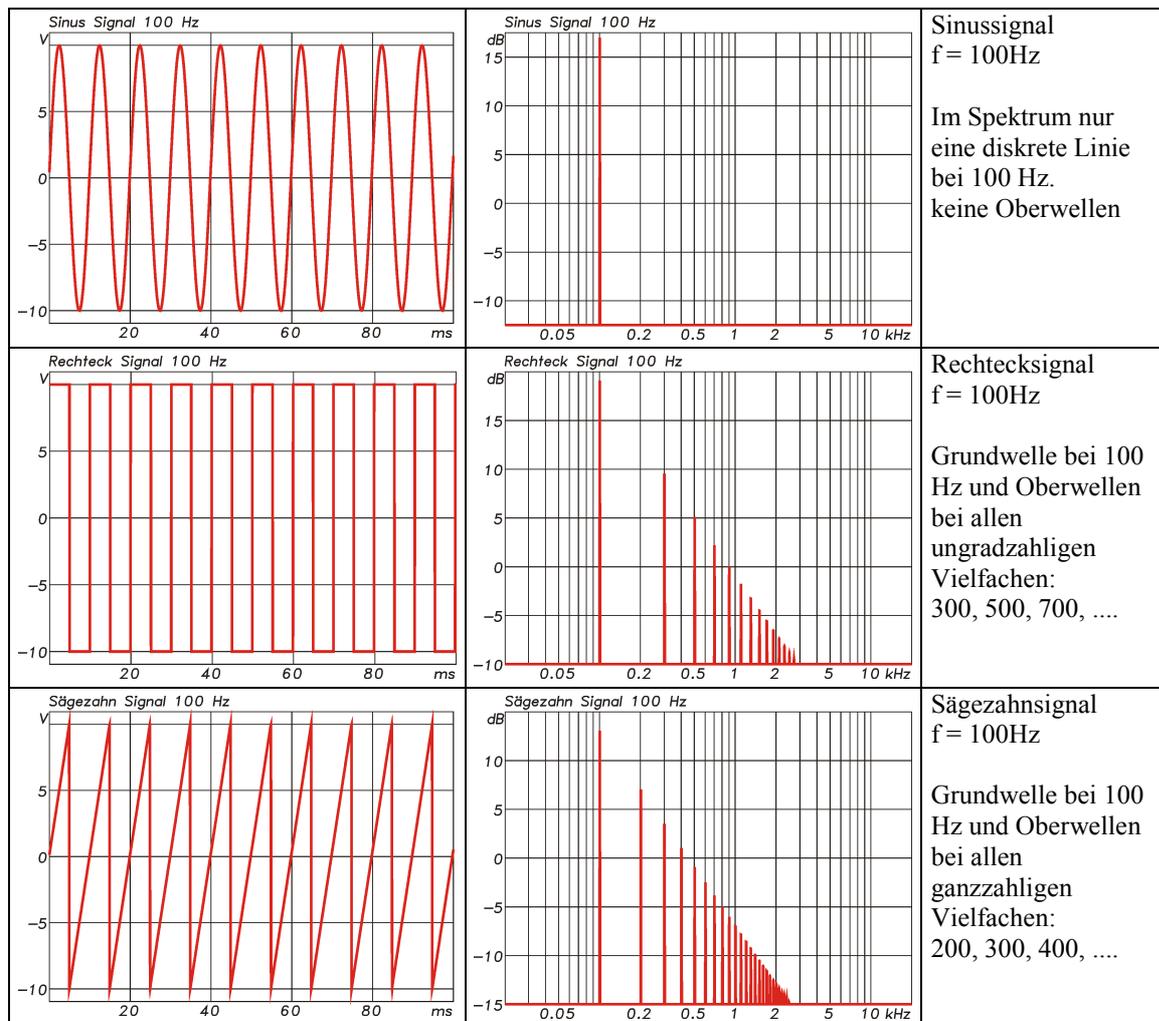


Abbildung 18 Stationäre Zeitsignale und zugehörige diskrete Frequenzspekren: Sinus, Rechteck, Sägezahn im Zeitverlauf mit einer Frequenz von $f = 100\text{ Hz}$

Wie jetzt bereits in mehreren Abbildung gezeigt wurde, können zeitliche Verläufe von elektrischen Signalen oder Schallereignissen auch im Frequenzbereich dargestellt werden. Die ausschließliche Betrachtung des Amplitudenspektrums im Frequenzbereich ist dabei allerdings nicht eindeutig. Sehr anschaulich lässt sich das an einem **Sweep** und einem **Impuls** erläutern (siehe Abbildung 19 und Abbildung 20). In beiden Fällen ist der Verlauf des Amplitudenspektrums konstant und alle Frequenzen sind gleichmäßig laut vertreten. Lediglich der absolute Pegel ist beim Sweep um 44,7 dB höher. Damit wäre keine eindeutig Zuordnung oder Rücktransformation vom Frequenz- in den Zeitbereich mehr möglich. Die Lösung des Problems liegt in einem weiteren Spektrum, dem Laufzeit- bzw. Phasenspektrum, das ebenfalls bei der Fourier-Transformation anfällt. Die Laufzeit berechnet sich dabei als Ableitung der Phase nach der Frequenz. In den meisten Fällen ist die Laufzeit anschaulich besser zu erfassen, so dass sie hier im weiteren betrachtet werden soll.

Für den Sweep betrachtet steigt die Laufzeit mit der Frequenz kontinuierlich an, so wie man es auch klanglich wahrnimmt (der Ton wird immer höher und höher). In diesem Beispiel handelt es sich um einen linearen Sweep, dessen Laufzeit über der Frequenz linear ansteigt. Deutlich wird dieser Zusammenhang, wenn man die Laufzeit über einer linearen und nicht über einer logarithmischen Zeitachse abbildet.

Für den Impuls erkennt man, dass die Laufzeit konstant, d.h. für alle Frequenzen gleich ist. Damit ist zwischen beiden Signalen auch im Frequenzbereich wieder eine Unterscheidung und bei Bedarf auch eine eindeutige Rücktransformation in den Zeitbereich möglich.

Ein in den Frequenzbereich transformiertes Zeitsignal wird dort durch ein Amplituden und Phasen- bzw. Laufzeitspektrum dargestellt.

Anschaulich kann ein Sweep in dieser Betrachtungsform daher auch als gestreckter oder lang gezogener Impuls gesehen werden. Umgekehrt entsteht der Impuls aus einem über der Zeitachse zusammen gedrückten oder gestauchtem Sweep. Ein Sweep gleicher Amplitude hat auf Grund seiner viel größeren zeitlichen Ausdehnung einen erheblich höheren Energiegehalt als ein in der Amplitude gleich großer Impuls, der sich zeitlich nur über einen sehr kurzen Augenblick erstreckt. Deutlich wird dieses Verhältnis auch im Pegel des Frequenzspektrums.

Ein weißes Rauschen (siehe Abbildung 21) verfügt ebenfalls über ein konstantes Amplitudenspektrum, so wie man es vom Impuls oder Sweep schon kennt. Die Laufzeit entspricht hier jedoch einer pseudo Zufallsverteilung.

Alle drei Signalvarianten (Impuls, Noise und Sweep) finden auch als Messsignale in PC-Messsystem Verwendung. Impulse sind aufgrund des geringen Energiegehaltes jedoch eher ungeeignet, da die Ergebnisse meist einen unzureichenden Störabstand aufweisen. Noise und Sweep Signale bieten an dieser Stelle erhebliche Vorzüge. Sweeps können sich wiederum gegenüber Noise Signalen einen Vorteil verschaffen, da sie wesentlich unkritischer in Bezug auf Zeitvarianzen in der Messstrecke sind, die z.B. bei akustischen Messungen durch Luftbewegungen verursacht werden können.

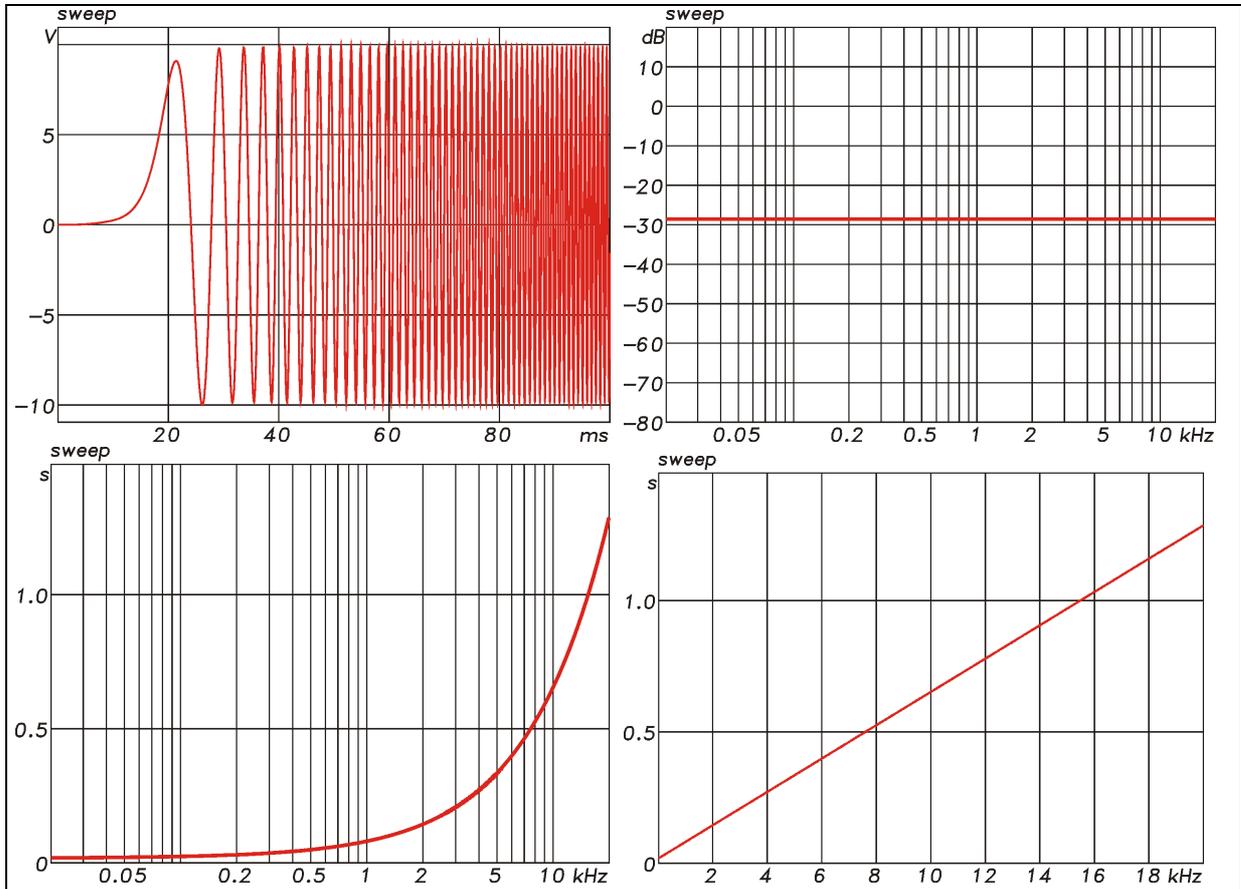


Abbildung 19 Sweep im Zeitverlauf (oben l), im Amplitudenspektrum (oben r) und Laufzeitspektrum mit logarithmischer (unten l) und linearer (unten r) Frequenzachse

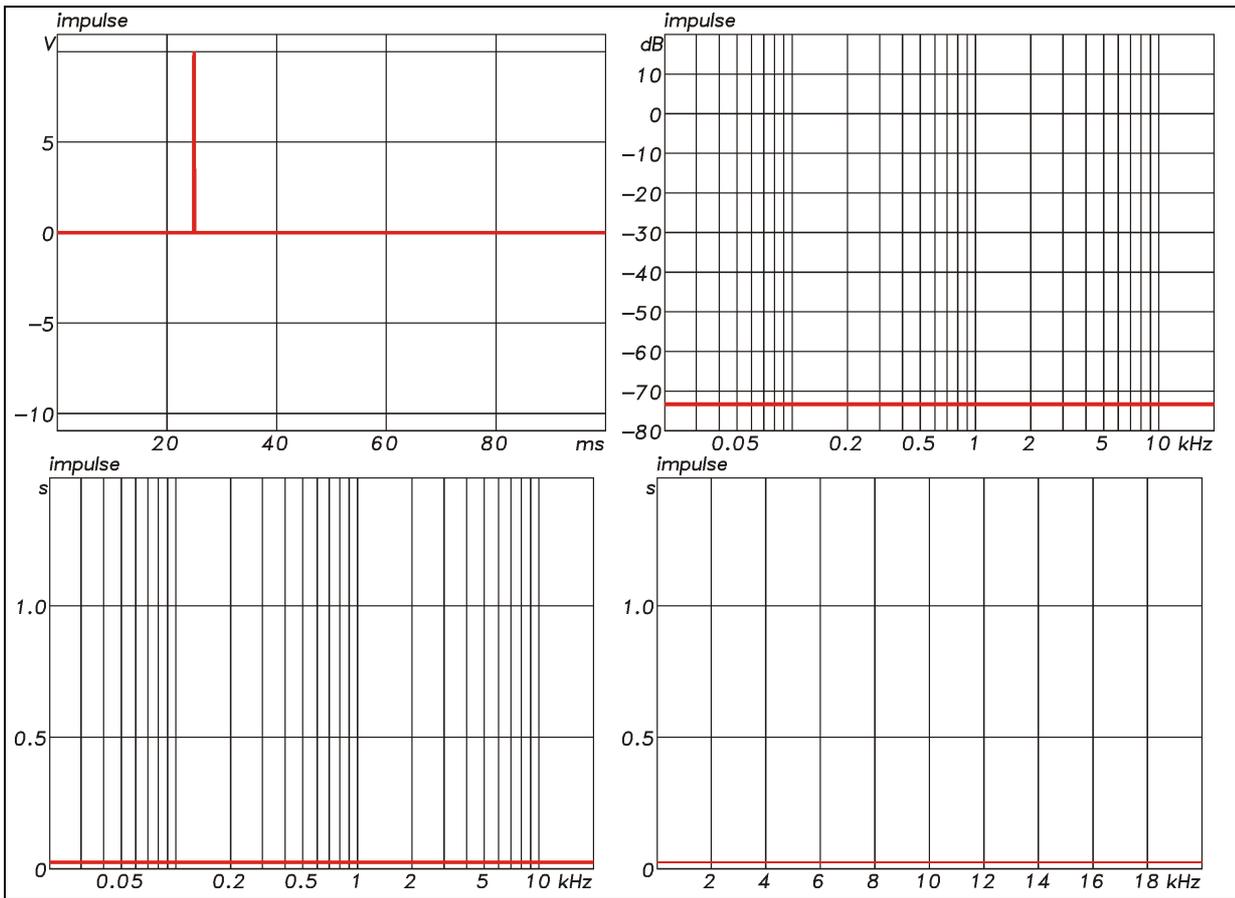


Abbildung 20 Impuls im Zeitverlauf (oben l), im Amplitudenspektrum (oben r) und Laufzeit-spektrum mit logarithmischer (unten l) und linearer (unten r) Frequenzachse

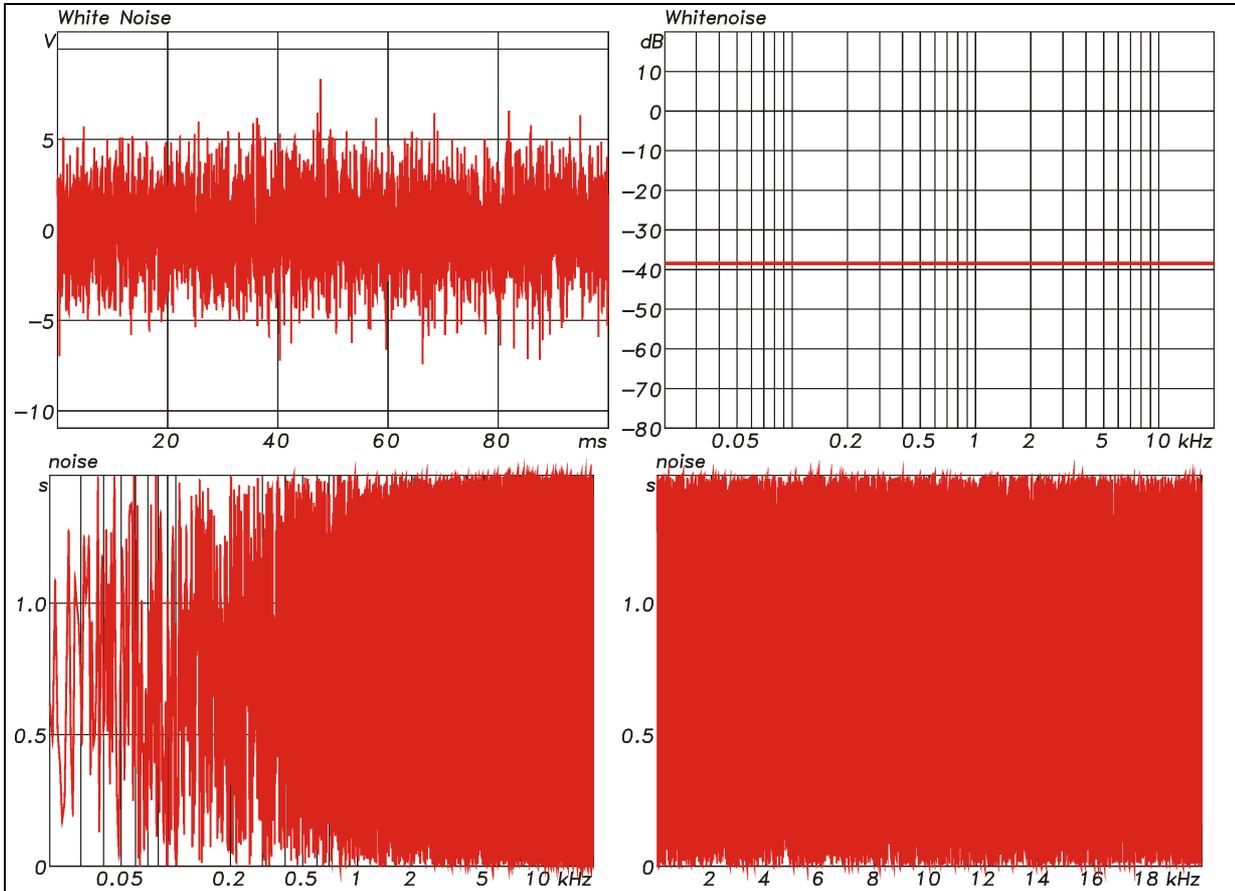


Abbildung 21 Weißes Rauschen im Zeitverlauf (oben l), im Amplitudenspektrum (oben r) und Laufzeit-spektrum mit logarithmischer (unten l) und linearer (unten r) Frequenzachse

2.10 Übertragungsfunktion

Elektrische oder akustische Signale - im weiteren allgemein als Signal bezeichnet - entstammen einer Quelle, dem Sender, und werden zu einem Ziel, dem Empfänger, übertragen. Dazwischen liegt die Übertragungsstrecke, die für elektrische Signale ein Kabel, ein Filter oder auch ein Gerät sein kann.

Beispiel Raum mit Beschallungsanlage

In der Raumakustik ist die Übertragungsstrecke der Raum, der Sender die Schallquelle, also z.B. ein Sprecher und der Empfänger der Zuhörer. Lautsprecher, Musikinstrumente und auch Störquellen gehören zur Kategorie der Sender. Mikrophone gehören zur Gruppe der Empfänger. Die folgende Abbildung zeigt diese Zusammenhänge anhand eines Sprechers in einem Raum mit zusätzlicher Unterstützung durch einen Lautsprecher auf.

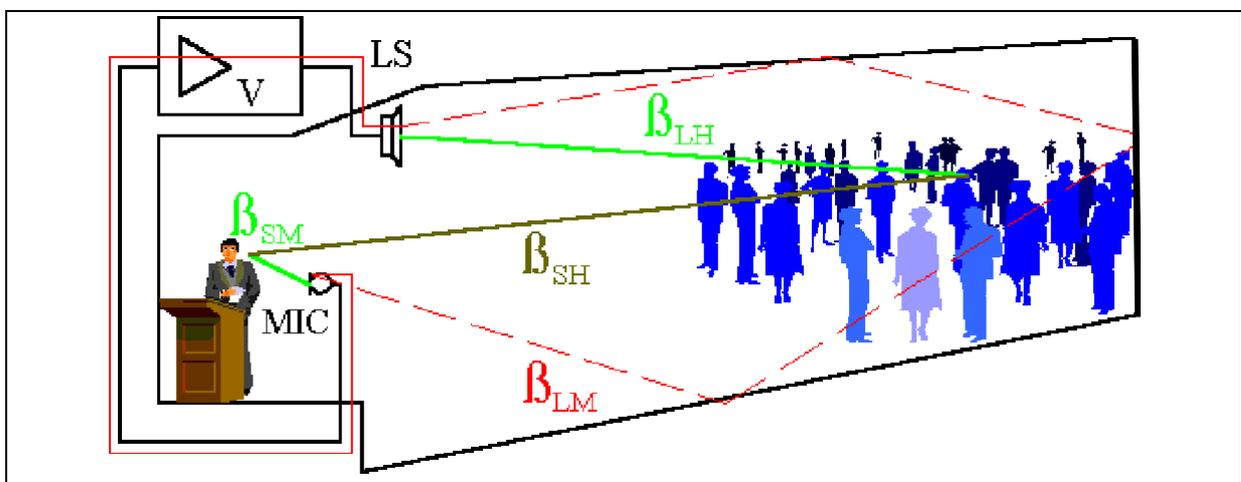


Abbildung 22 Sprecher und Zuhörer in einem Raum
 S = Sprecher, M = Microphon (MIC), L = Lautsprecher (LS), H = Hörer,
 β = Übertragungsfunktion

In diesem Raum gibt es eine Quelle, den Sprecher, und eine Vielzahl von Empfängern, die Zuhörer. Das Quellsignal des Sprechers gelangt auf zwei Wegen zu den Empfängern. Der erste Weg ist rein akustischer Natur und betrifft den Schall, den die Zuhörer direkt vom Sprecher hören und der über die akustische Übertragungsfunktion β_{SH} (Sprecher-Hörer) zum Zuhörer gelangt. Über eine wesentlich kürzere akustische Übertragungsstrecke β_{SM} (Sprecher-Mikrofon) gelangt das Sprechersignal zum Mikrofon (MIC), das akustische Signale in elektrische umwandelt. Ein Verstärker (V) verstärkt das elektrische Signal und führt es dem Lautsprecher (LS) zu, der es wieder in ein akustisches Signal zurück verwandelt. Von dort gelangt das Signal wieder über eine akustische Übertragungsfunktion β_{LH} (Lautsprecher-Hörer) zum zweiten Mal zu den Zuhörern. Jede der hier aufgeführten Übertragungsstrecken, egal ob elektrischer oder akustischer Art, kann durch eine Übertragungsfunktion charakterisiert werden. Die Übertragungsfunktion stellt dar, welche Veränderung das Signal erfährt. Gleiches gilt für die Wandler zwischen akustischen und elektrischen Signalen (Mikrophon und Lautsprecher). Eingangs- und Ausgangssignal haben hier jedoch unterschiedliche physikalische Größen (Schalldruck und Spannung).

Allgemein lässt sich formulieren, dass beim Durchlaufen einer Übertragungsstrecke dem Signal bestimmte Veränderungen, beabsichtigte und nicht beabsichtigte, zugefügt werden. Dazu gehören in erster Linie:

Lineare Verzerrungen in Form von Frequenz- und Phasengängen der Übertragungsstrecke, die z.B. von einem Filter verursacht werden, das bestimmte Frequenzbereiche unterdrückt. Für den Lautsprecher als Wandler wird diese Übertragungsfunktion als Frequenzgang des wiedergegebenen Schalldrucks bei einer festen Eingangsspannung gezeigt. Gleiches gilt in umgekehrter Form für das Mikrofon als Wandler von akustischen zu elektrischen Signalen.

Nichtlineare Verzerrungen, die durch nichtlineare Kennlinien, Übersteuerung (Clipping) etc. entstehen. Ein wohl bekanntes Beispiel sind die Verzerrungen, die ein Lautsprecher oder ein Verstärker beim Erreichen seiner Leistungsgrenze verursacht. An der Aussteuerungsgrenze geht die ansonsten weitgehend lineare Kennlinie eines Verstärkers in einen stark nichtlinearen Verlauf über und verzerrt so die Form des zu übertragenden Signals. Nichtlineare Verzerrungen kommen primär bei der elektrischen Signalübertragung und bei der Wandlung vor. Für die akustischen Übertragungsstrecken sind nichtlineare Verzerrungen im Normalfall nicht weiter relevant.

Störanteile sollten als dritter Punkt zumindest nicht unerwähnt bleiben. Darunter versteht man zusätzliche Signalanteile, die dem eigentlichen Nutzsignal ungewollt hinzu gefügt werden. Auf dem elektrischen Wege kann das z.B. ein Brummen oder Rauschen eines Verstärkers sein. Für die akustische Übertragungsstrecke können Störanteile z.B. durch Verkehrslärm, Geräusche vom Publikum oder auch von Klimaanlage entstehen. Wichtig ist dieser Aspekt insbesondere bei der Beurteilung der Sprachverständlichkeit. Störanteile sollten in ihrer spektralen Zusammensetzung in Bezug auf ihre gehörmäßige Bewertung und in Relation zum Nutzsignal betrachtet werden.

Inhalt	Sample File	Play
gefilterte Sprache BP 300-3k4	SP3003k4.WAV	
gefilterte Musik BP 300-3k4	MU3003k4.WAV	
verzerrte Sprache durch Übersteuerung (Clipping)	SP-DISTO.WAV	
verzerrte Musik durch Übersteuerung (Clipping)	MU-DISTO.WAV	
Sprache mit breitbandigem Störgeräuschen -6dB	SP-NOISE.WAV	
Sprache mit schmalbandigem Störgeräuschen -6dB	SP-BPNOI.WAV	
Musik mit breitbandigem Störgeräuschen -6dB	MU-NOISE.WAV	
Musik mit schmalbandigem Störgeräuschen -6dB	MU-BPNOI.WAV	

Tabelle 7 Hörbeispiele zum Thema lineare und nichtlineare Verzerrungen sowie breitbandige und schmalbandige Störgeräusche

2.10.1 Lineare Verzerrungen

Das lineare Übertragungsverhalten kann in mehreren Formen mit identischem Informationsgehalt dargestellt werden. Für elektrische Geräte, Lautsprecher, Mikrophone etc. erfolgt dieses meist in Form eines Frequenzganges, d.h. im Frequenzbereich. Eingangs und Ausgangsgrößen können gleicher oder unterschiedlicher physikalischer Natur sein. Auch für einige Musikinstrumente besteht die Möglichkeit eine Übertragungsfunktion messtechnisch zu erfassen, woraus in gewissen Grenzen Rückschlüsse auch die klanglichen Qualitäten möglich sind.

Neben dem Frequenzgang gehört zur vollständigen Beschreibung der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich noch der weniger bekannte Phasengang, auf den hier zunächst nicht näher eingegangen werden soll.

Übertragungsstrecke	Eingangsgröße	Ausgangsgröße
Lautsprecher	elektrische Spannung in V	Schalldruck in Pa
Mikrophon Sens. mV/Pa	Schalldruck in Pa	elektrische Spannung in V
Verstärker Gain in dB	elektrische Spannung in V	elektrische Spannung in V
Mischpult Gain in dB	elektrische Spannung in V	elektrische Spannung in V
Raum	Schalldruck in Pa	Schalldruck in Pa
Geige	Eingeprägte Schnelle am Steg	Schalldruck in Pa

Tabelle 8 Eingangs- und Ausgangsgrößen verschiedener Übertragungsfunktionen

Alternativ zum Frequenzbereich bietet sich eine Darstellung im Zeitbereich über die Impulsantwort an. Die Impulsantwort zeigt das Ausgangssignal einer Übertragungsstrecke, wenn ein idealer Impuls als Eingangssignal verwendet wird. Eine Impulsantwort lässt sich via FFT in den Frequenzbereich umrechnen. Ebenso ist die Umkehrung über eine IFFT möglich. Wichtig ist es zu wissen, dass beide Formen der Darstellung sowohl im Zeit- wie auch im Frequenzbereich den gleichen Informationsgehalt haben und jederzeit ineinander überführt werden können.

Das folgende Beispiel zeigt ein elektrisches Rechtecksignal, das über ein Tiefpaßfilter übertragen wird. Der obere Signalpfad stellt den kompletten Zusammenhang im Zeitbereich dar, der untere im Frequenzbereich.

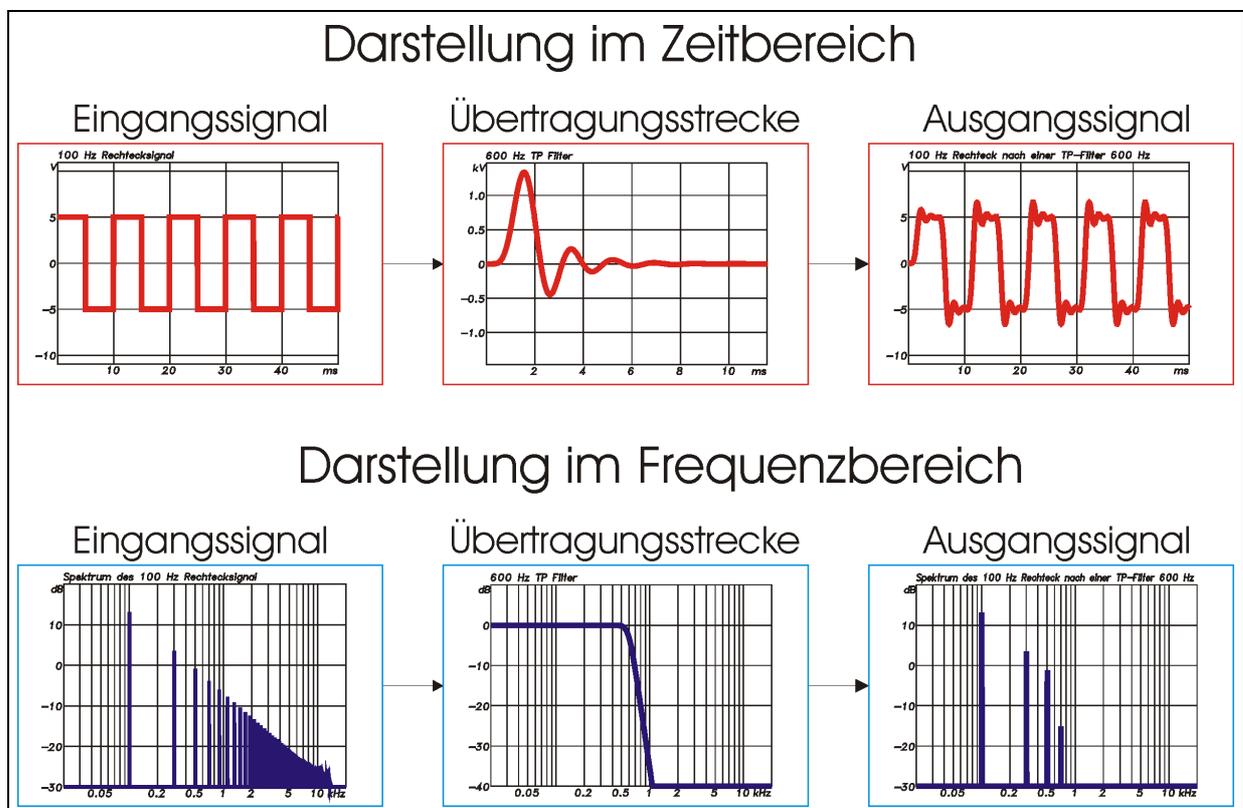


Abbildung 23 Übertragung eines Rechtecksignals über ein Tiefpaßfilter im Zeitbereich (oben) und im Frequenzbereich (unten)

2.10.2 Nichtlineare Verzerrungen

Nichtlineare Verzerrungen sind das, was gemeinhin vereinfacht als Verzerrung bezeichnet wird. In geringem Maße fügen alle elektrischen Geräte und Wandler dem Signal nichtlineare Verzerrungen zu, die aber meist weit unterhalb der Wahrnehmungsgrenze liegen. Deutlich werden die Verzerrungen, wenn z.B. ein Lautsprecher oder Verstärker seine Leistungsgrenzen erreicht und ein Signal stark verformt. Absichtlich wird dieser Effekt bei einigen Musikaufnahmen oder elektrischen Gitarren dazu genutzt, um die Klangfarbe durch das Hinzufügen von Obertönen zu ändern. Je nach Ursache der Verzerrungen werden dem Signal mehr oder weniger ausgeprägte Obertöne zugefügt, die immer ein ganzzahliges Vielfaches des verzerrten Grundtones sind.

Im Beispiel von Abbildung 24 sind im Spektrum der nicht verzerrten Gitarre die Grundwelle und einige Obertöne zu erkennen, die zusammen das Zeitsignal rechts davon ergeben. Die Verzerrungen in den beiden unteren Bildern fügen dem Zeitverlauf eine Feinstruktur hinzu und verdichten das Spektrum zusehends zu hohen Frequenzen.

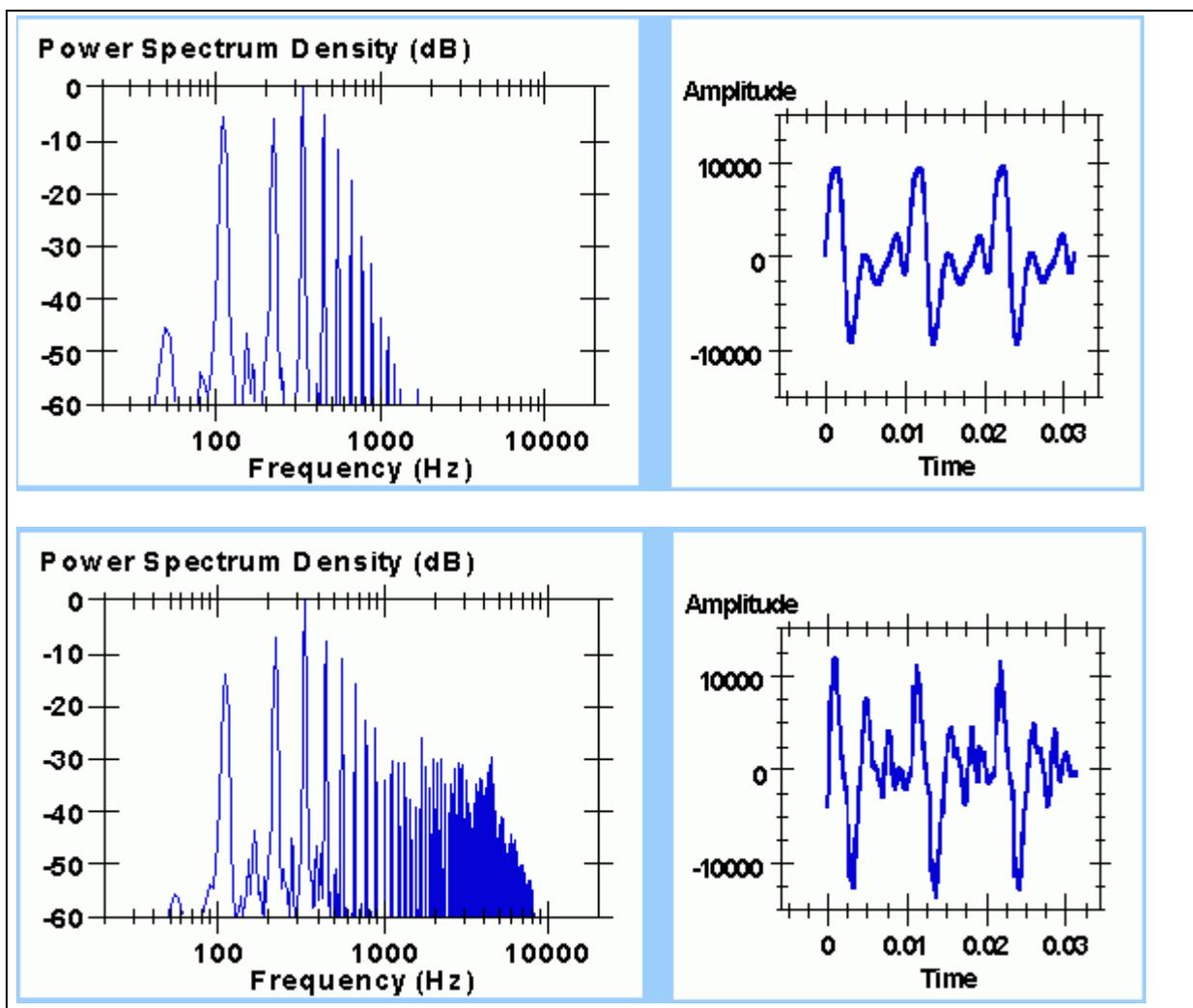


Abbildung 24 oben: Frequenzspektrum und Zeitsignal eines sauberen Gitarrentones
 unten: Frequenzspektrum und Zeitsignal eines verzerrten Gitarrentones [aus 1]

3 Grundlagen zweiter Teil

3.1 Schallquellen

Schall entsteht durch schwingende Flächen jeglicher Art, was Lautsprechermembranen, Resonanzkörper von Instrumenten, Maschinenteile oder eine platzende Papiertüte sein können. In Gebäuden kann Luftschall in einem Raum eine Wand zu Schwingungen anregen, so dass sich der Schall im Gemäuer als Körperschall weiter ausbreitet, um durch eine andere Wand in einem anderen Raum wieder als Luftschall abgestrahlt zu werden. Es gibt somit eine Vielzahl von Schall abstrahlenden Flächen, die in ihrer Größenordnung von weniger als 1 cm² bis zu vielen m² reichen können. Interessant ist die Größe der schwingenden Fläche nicht nur in Bezug auf den Pegel des abgestrahlten Schalls, sondern auch in Bezug auf die Richtwirkung.

Eine grundsätzliche Regel besagt, dass homogen schwingende Flächen, immer dann beginnen, den Schall gebündelt in Schwingungsrichtung abzustrahlen, wenn die Wellenlänge kleiner oder gleich den Abmessungen des Strahlers ist, was z.B. weitgehend auf eine Lautsprechermembrane zutrifft. Bei einer Frequenz von 2 kHz mit einer Wellenlänge von 17cm ($340\text{m}/2000$) zeigt ein Lautsprecher mit einer 30cm Membran bereits eine sehr ausgeprägte Richtwirkung. Ein 200 Hz Signal mit 1,7m Wellenlänge wird dagegen nahezu rundum gleichmäßig abgestrahlt. Daraus lässt sich ableiten, dass hohe Frequenzen mit einer kleinen Wellenlänge nur mit kleinen Strahlerflächen gleichmäßig im räumlichen Sinne abzustrahlen sind. Umgekehrt bedarf es zur gezielten Bündelung tiefer Frequenzen teilweise recht großer Anordnungen, worin insbesondere für die Beschallungstechnik ein Problem liegt.

3.1.1 Punktquellen, Linienquellen und Flächenstrahler

Eine idealisierte Form einer Schallquelle ist die pulsierende Kugel oder Punktquelle. Sie strahlt gleichmäßig in alle Richtungen ab und weist keinerlei Vorzugsrichtung auf, völlig unabhängig von der Frequenz. Die abgestrahlten Wellen sind Kugelwellen. Die insgesamt abgestrahlte Leistung verteilt sich bei einer Verdopplung der Entfernung vom Mittelpunkt der pulsierenden Kugel auf eine vierfach größere Fläche, womit sich die Leistungsdichte auf $\frac{1}{4}$ (= -6dB) reduziert und sich der Schalldruckpegel halbiert ($\frac{1}{2}$ = -6dB).

Eine weitere idealisierte Schallquelle ist der unendlich lange Linienstrahler in Form eines im Radius pulsierenden Zylinders. Dieser strahlt, wie es der Name schon vermuten lässt, eine Zylinderwelle ab. Die insgesamt abgestrahlte Leistung verteilt sich hier bei einer Verdopplung der Entfernung vom Mittelpunkt des pulsierenden Zylinders auf eine jetzt nur noch zweifach größere Fläche, womit sich die Leistungsdichte auf $\frac{1}{2}$ (= -3dB) reduziert und der Schalldruckpegel nur noch um den Faktor 0,707 (= -3dB) abfällt.

Als dritte idealisierte Strahlerfläche wäre eine unendlich ausgedehnte und homogen schwingende Fläche zu betrachten, die eine ebene Welle abstrahlt. Unabhängig von Entfernung und Position ist der Schalldruck im gesamten Halbraum vor der schwingenden Fläche überall konstant. Es kommt demnach zu keinem entfernungsabhängigen Pegelabfall.

Für eine idealisierte Quellenbetrachtung gilt:

Bei Punktquellen fällt der Schalldruck pro Entfernungsverdopplung von der Quelle um 6dB ab.

Bei Linienquellen fällt der Schalldruck pro Entfernungsverdopplung von der Quelle um 3dB ab.

Bei einem Flächenstrahler ist der Pegel unabhängig von der Entfernung konstant.

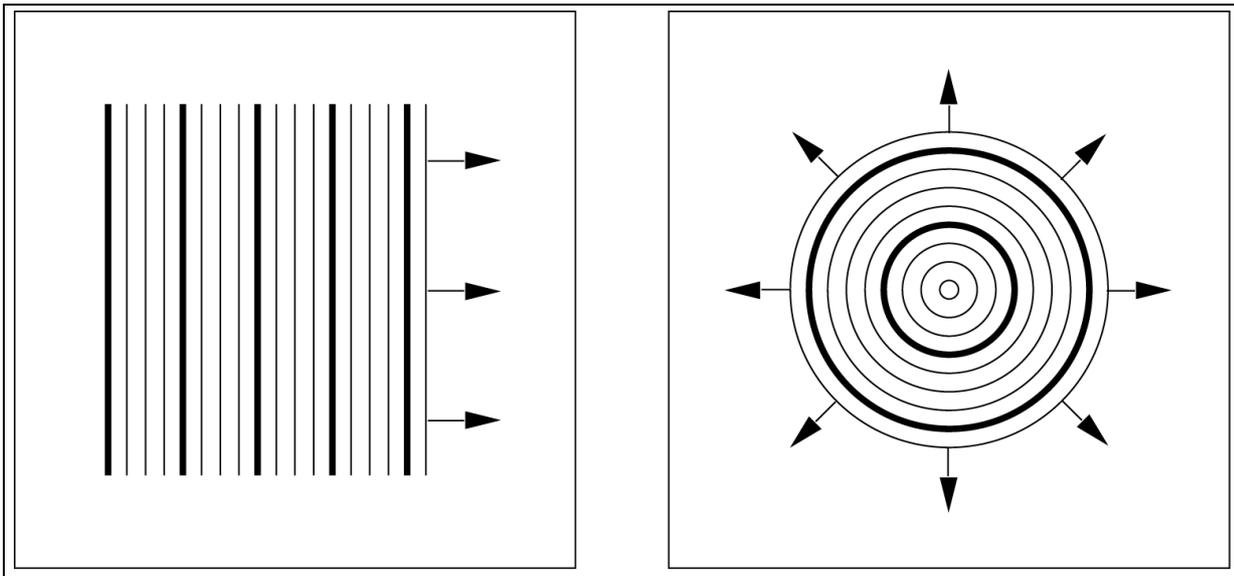


Abbildung 25 Ausbreitungsform von ebenen Wellen (links) und Kugel- bzw. Zylinderwellen (rechts) [aus 3]

Im realen Leben gibt es natürlich weder unendlich ausgedehnte Strahleranordnungen noch ideal homogen schwingende Flächen. So beginnt eine Lautsprechermembran bei hohen Frequenzen ausgeprägte Partialschwingungen auszubilden, so dass die Membran in vielen einzelnen Teilflächen agiert, die auch gegenphasig schwingen können. Eine reale Strahlerzeile in Anlehnung an die Linienquelle wird häufig aus einzelnen übereinander angeordneten Lautsprechern aufgebaut, deren Membrane keine durchgehende Fläche ergeben. Ebenso gibt es weder den unendlich kleinen Strahler noch den mit einer unendlichen Ausdehnung in eine oder mehrere Richtungen.

Trotzdem können die Modelle der Punkt- und Linienquelle sowie des Flächenstrahlers zur Beschreibung real existierender Strahlerflächen herangezogen werden. Wann ein Strahler die Eigenschaften der idealisierten Quellen annimmt, hängt in erster Linie von seiner Größe, von der Wellenlänge (wie immer in der Akustik), und vom Abstand des Betrachtungspunktes zur Quelle ab.

An dieser Stelle kommen mit dem **Nahfeld** und dem **Fernfeld** zwei neue Begriffe ins Spiel. Diese beiden Begriffe sollen exemplarisch anhand eines 4m langen Linienstrahlers erläutert werden. In Abhängigkeit von der Frequenz f und der Länge l der Linie errechnet sich ein Übergang vom Nahfeld ins Fernfeld mit folgender Formel:

$$r_{\text{Fernfeld}} = \frac{l^2 \cdot f}{340 \text{ m/s}} \quad \text{mit der Frequenz } f \text{ in Hz und Länge } l \text{ in m.} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

Befindet man sich im Nahfeld, so verhält sich die Quelle für den Betrachtungspunkt näherungsweise wie das idealisierte Modell eines Linienstrahlers mit unendlicher Ausdehnung. Für die Linienquelle heißt das, dass die abgestrahlte Welle im Nahfeld einer Zylinderwelle entspricht. Bewegt man sich in der Vertikalen vor einer Linienquelle auf und ab, so ist die Wellenfront überall gleich. Entfernt sich der Betrachter nun weiter von der Linienquelle, so geht die Zylinderwelle in einen Kugelwellenausschnitt über und öffnet sich in der vertikalen Ebenen. Der Öffnungswinkel beträgt:

$$BW_{-6\text{dB}} \approx 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{1,9}{\pi} \cdot \frac{\lambda}{l} \right) \quad \text{mit der Frequenz } f \text{ in Hz und Länge } l \text{ in m.} \quad \text{Gleichung 3-2}$$

Ähnliches gilt für einen ausgedehnten Flächenstrahler, der im Nahfeld eine ebene Welle abstrahlt. Unabhängig von der Position ist überall die gleiche Wellenfront anzutreffen. Erst nach dem Übergang ins Fernfeld geht die ebene Wellenfront in eine sphärische Wellenfront über. Der Öffnungswinkel hängt dabei von der Ausdehnung des Flächenstrahlers in der betreffenden Ebene in Relation zur Wellenlänge ab.

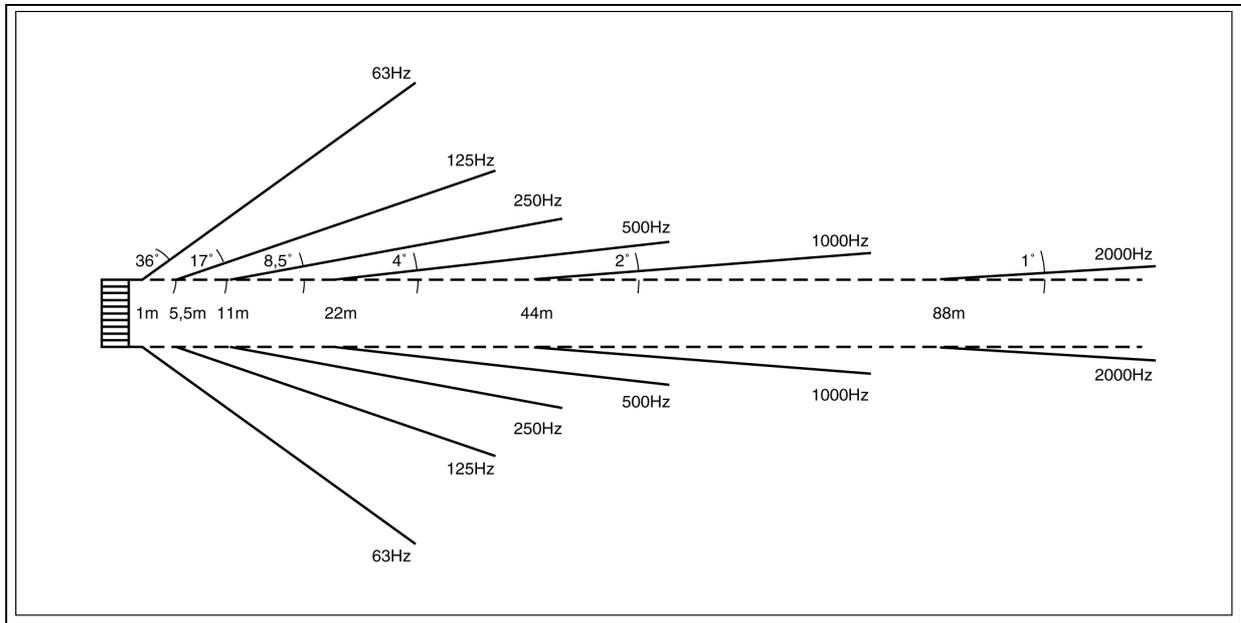


Abbildung 26 Abstrahlverhalten einer 4m langen Linienquelle in der vertikalen Ebene mit Übergang zwischen Nahfeld und Fernfeld [aus 4]

Eine Punktquelle (Ausdehnung sehr klein $l \rightarrow 0$) verfügt demnach über kein Nahfeld, und der Betrachter befindet sich unabhängig von der Entfernung immer im Fernfeld. Auf der anderen Seite hat eine unendlich ausgedehnte Strahlerfläche ($l \rightarrow \infty$) ausschließlich ein Nahfeld, das sich beliebig weit ausdehnt.

In der Beschallungstechnik kann das ausgedehnte Nahfeld von Linienquellen oder Flächenstrahlern zur Überbrückungen großer Entfernungen (geringerer Pegelverlust bei gleicher Entfernung in Relation zu einer sphärischen Wellenfront) und für eine sehr gezielt Richtwirkung eingesetzt werden. Flächenstrahler kommen eher selten zum Einsatz und werden dann in der Regel als elektrostatische Lautsprecher aufgebaut. Linienquellen erfreuen sich dagegen zur Zeit einer großen Beliebtheit und werden meist aus einzelnen Modulen zusammengesetzt, so dass Linienstrahler in unterschiedlichen Längen (1m bis 5m) und auch in gebogenen Formen realisiert werden können.

3.1.2 Richtverhalten

In diesem Absatz werden exemplarisch die Richtdiagramme einiger Strahler für bestimmte Frequenzen gezeigt. Als Darstellungsform wird der dreidimensionale Balloon gewählt, der für ein Frequenzband das Richtverhalten im Raum darstellt. Andere Möglichkeiten der Darstellung in einer Ebene sind Polardiagramme oder Isobarenkurven.

Die folgende Übersicht zeigt anhand eines Lautsprechers die verschiedenen Möglichkeiten das räumliche Abstrahlverhalten grafisch abzubilden.

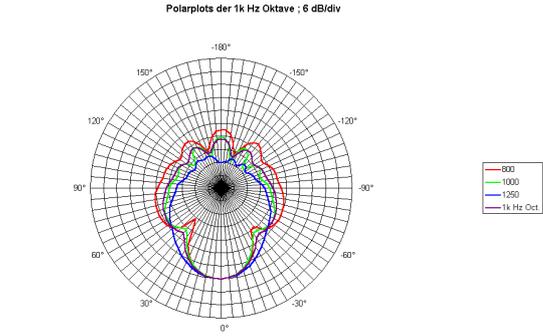
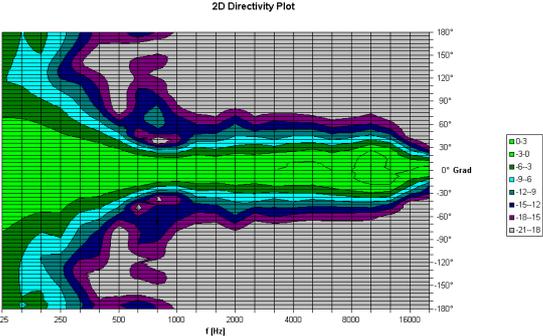
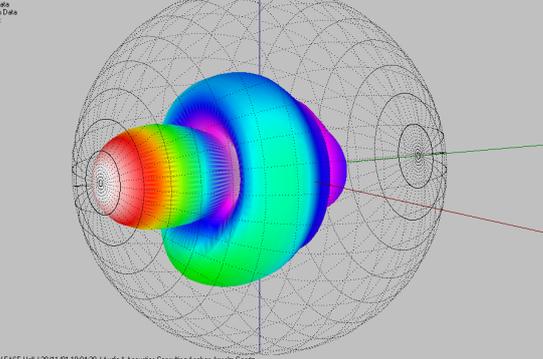
	<p>Polardiagramm</p> <p>Darstellung des Pegels über den Betrag des Richtungsvektors in Polarkoordinaten für ein oder mehrere Frequenzbänder in einer Ebene in Abhängigkeit vom Winkel zur Mittelachse.</p> <p>Das Beispiel zeigt die Kurven für das 1 kHz Oktavband und die drei zugehörigen Terzbänder in einer Ebene.</p>
	<p>Isobarenkurven</p> <p>Darstellung des Pegels durch farbliche Abstufungen für den gesamten Frequenzbereich in einer Ebene in Abhängigkeit vom Winkel zur Mittelachse.</p> <p>Ein Schnitt bei einer festen Frequenz entspricht dem Polardiagramm. Ein Schnitt bei einem festen Winkel einem Frequenzgang.</p>
	<p>Balloondarstellung</p> <p>Darstellung des Pegels durch farbliche Abstufungen und über den Betrag des Richtungsvektors in Kugelkoordinaten für ein Frequenzband auf der gesamten Kugelfläche um den Strahler.</p> <p>Alle Messpunkte liegen auf Großkreisen durch den vorderen und hinteren Pol des Rasternetzes.</p>

Abbildung 27 Darstellung des räumlichen Abstrahlverhaltens von Lautsprechern mit Hilfe von Polardiagrammen, Isobarenlinien und einem Balloon

3.1.3 Herkömmlicher Lautsprecher

Ein normaler kompakter Beschallungslautsprecher mit einem ca. 16cm großen Tieftonlautsprecher und einer 25mm Hochtonkalotte mit kleinem Hornansatz. Die Trennfrequenz liegt bei ca. 3000 Hz. Bei tiefen Frequenzen ist der Tieftöner klein gegenüber der Wellenlänge und zeigt daher nahezu kein Richtverhalten. Bei 250 Hz entsprechend einer Wellenlänge von 1,36m ist das Abstrahlverhalten fast kugelförmig und kommt dem einer Punktquelle schon recht nahe. Bei 1000 Hz beträgt die Wellenlänge nur noch 34cm, und daher ist schon eine gewisse Bündelung zu erkennen. Für 4000 Hz übernimmt die Kalotte mit dem Hornansatz die Abstrahlung, wobei das Abstrahlverhalten dann nicht mehr durch den Membrandurchmesser sondern von der Schallführung des Hornes dominiert wird.

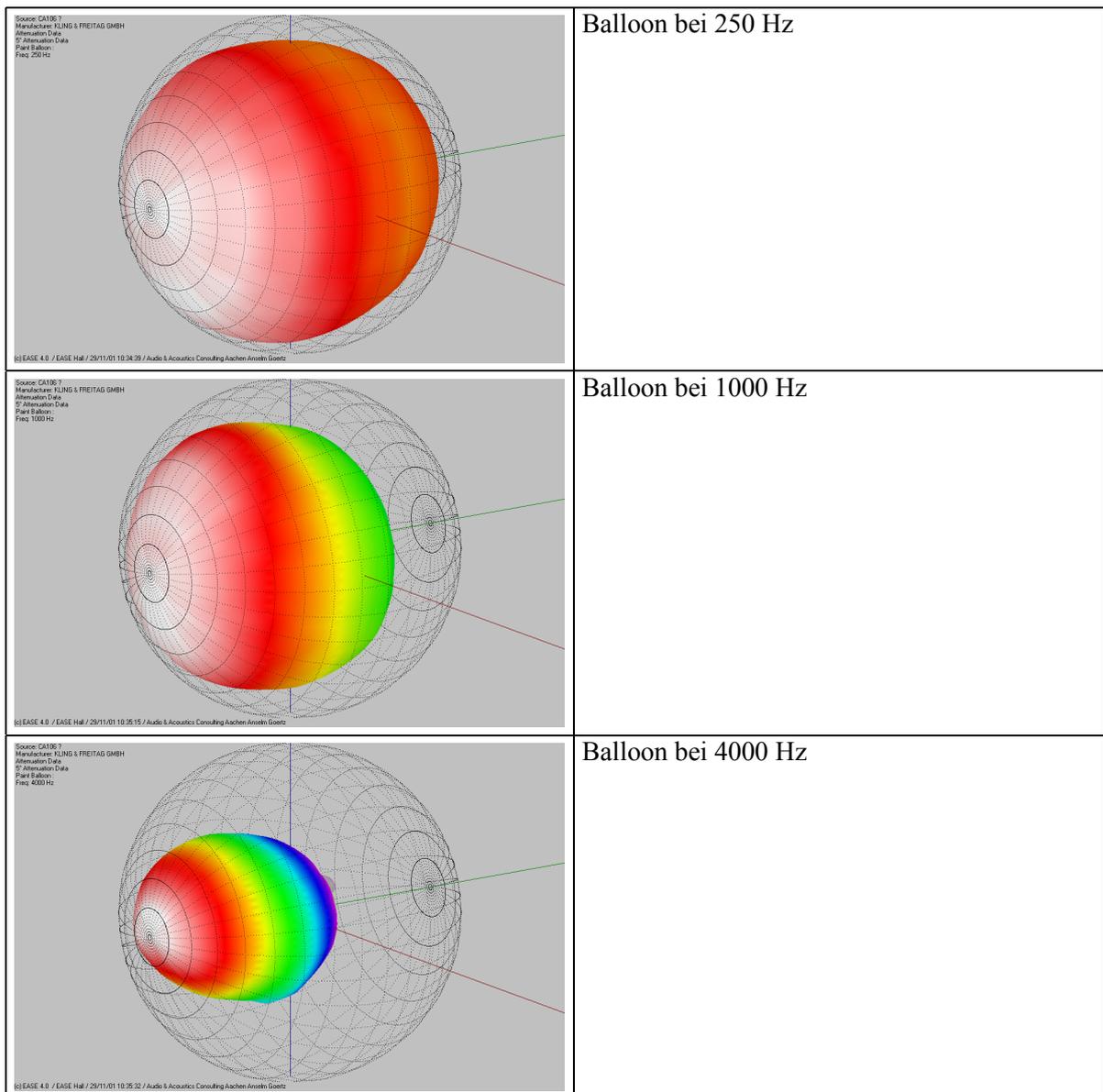


Abbildung 28 Balloon-Darstellung für 250Hz, 1kHz und 4kHz

3.1.3.1 Großer Hornlautsprecher

Das folgende Beispiel zeigt einen sehr großen Hornlautsprecher mit einer Mundfläche von ca. $0,5\text{m}^2$. Das große Horn ist auch bei tiefen Frequenzen schon in der Lage, eine sauber gerichtete Abstrahlung zu erzielen. Eine zunehmende Bündelung bei hohen Frequenzen versucht man durch ein sogenanntes CD Design (Constant Directivity) zu vermeiden. Ziel ist es hier, über einen möglichst weiten Frequenzbereich ein konstantes Abstrahlverhalten zu erhalten.

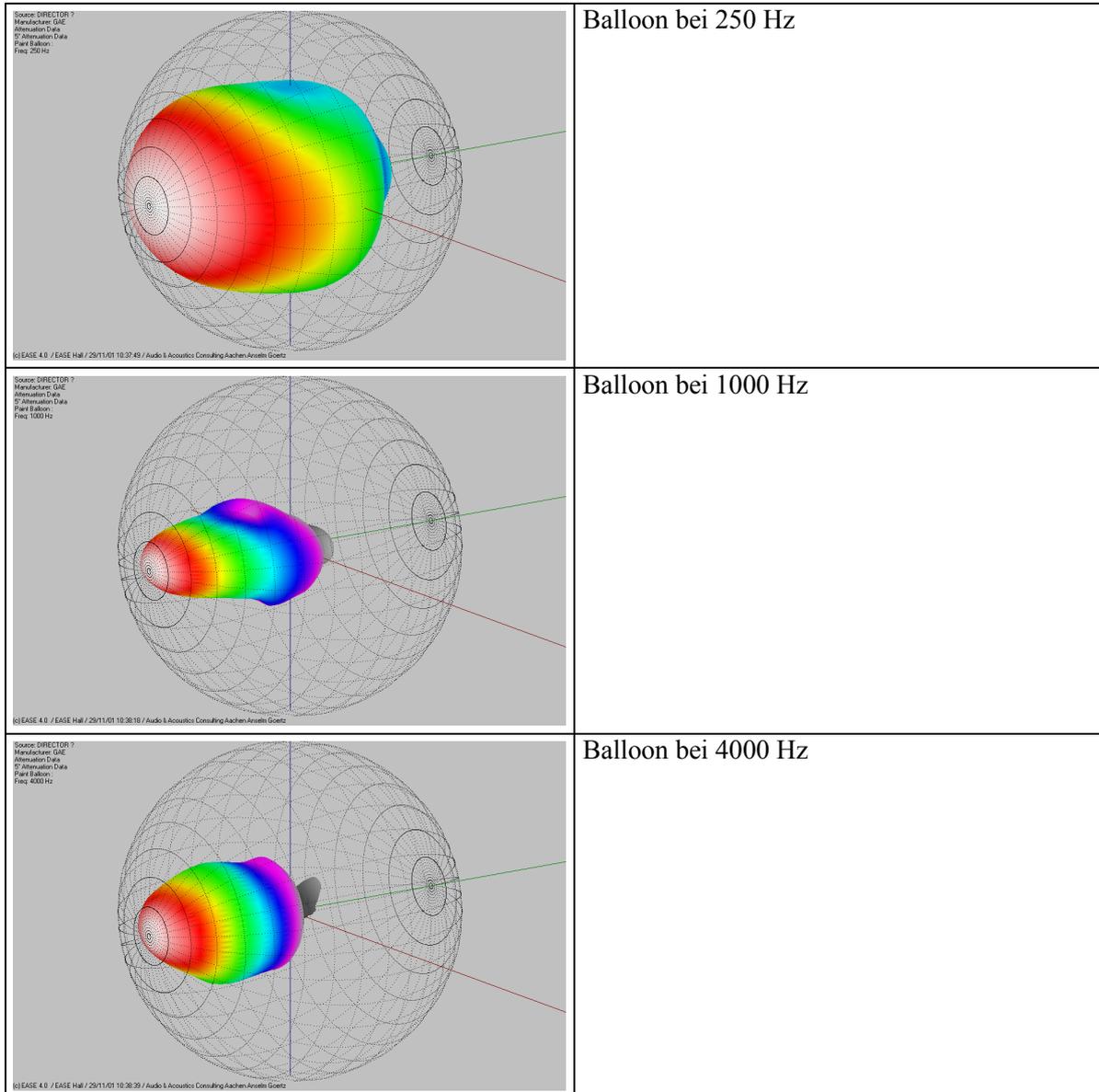


Abbildung 29 Balloon-Darstellung für 250Hz, 1kHz und 4kHz

3.1.3.2 *Linienquellen (endlicher Ausdehnung 2m)*

Im letzten Beispiel wird eine 2m lange Strahlerzeile ausgeführt als Bändchenlautsprecher gezeigt. Aufgrund der großen vertikalen Ausdehnung von 2m gegenüber ca. 4cm in der Horizontalen verfügt dieser Lautsprecher über eine sehr ausgeprägte Bündelung in der vertikalen Ebene und eine breite Abstrahlung in der horizontalen Ebene. In der Praxis werden diese Lautsprecher gerne zur gezielten Beschallung von Publikumsbereichen in akustisch schwierigen Räumen, wie z.B. Kirchen, eingesetzt.

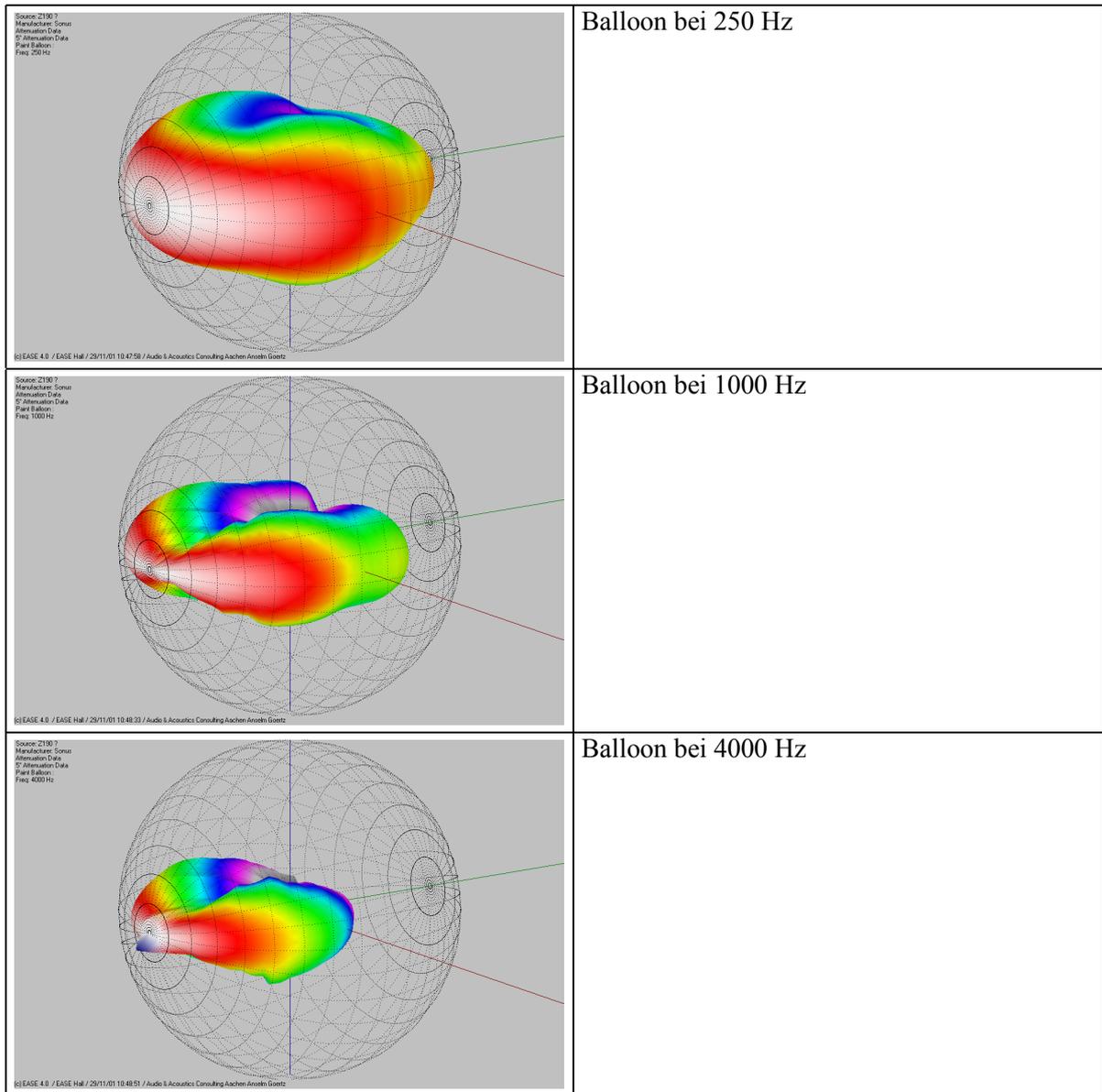


Abbildung 30 Balloon-Darstellung für 250Hz, 1kHz und 4kHz

3.2 Das menschliche Gehör

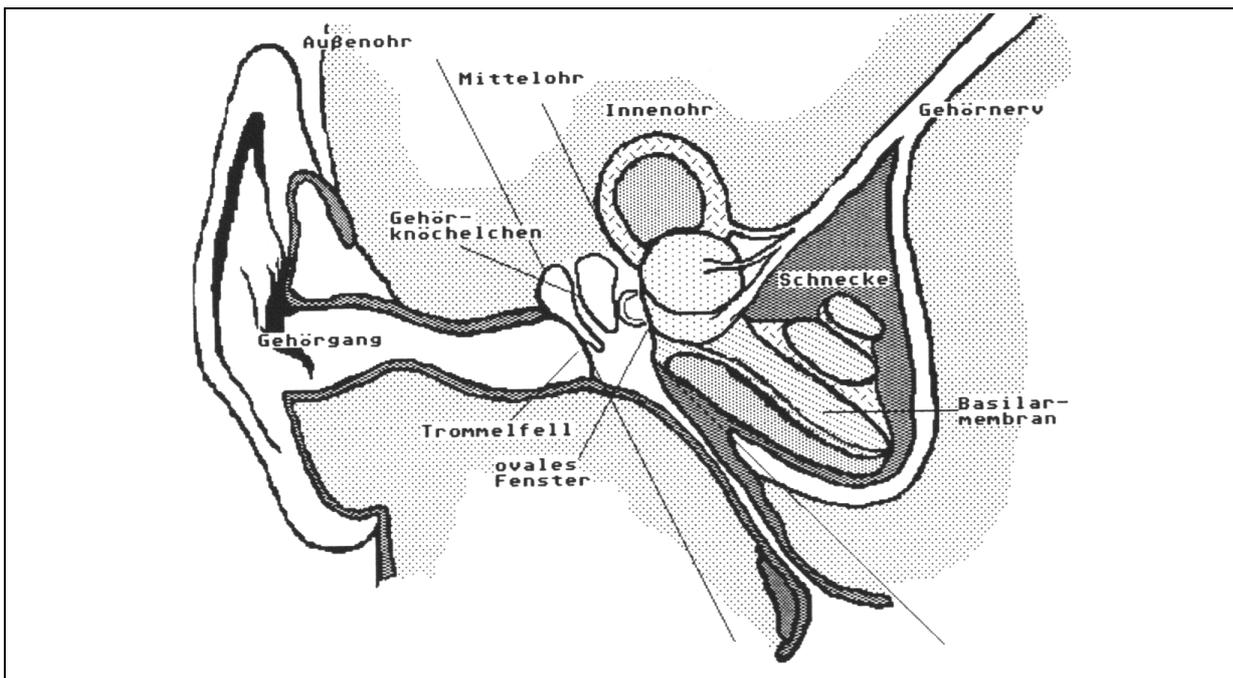


Abbildung 31 Außen-, Mittel- und Innenohr im Schnitt [aus 3]

Das menschliche Ohr setzt sich im Wesentlichen aus dem Außenohr, dem Mittelohr und dem Innenohr zusammen. Das **Außenohr**, bestehend aus Ohrmuschel, Gehörgang und Trommelfell überträgt den Schall und regt das Trommelfell zu Schwingungen an. Durch die Form der Ohrmuschel, des Kopfes und des menschlichen Torsos erfolgt eine tonale Färbung (Frequenzgang) in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Schalls. Der danach folgende Hörkanal besitzt zwar auch einen ausgeprägten Frequenzgang, der aber nicht mehr von der Einfallsrichtung abhängig ist. Von Person zu Person sind die Unterschiede jedoch sehr ausgeprägt.

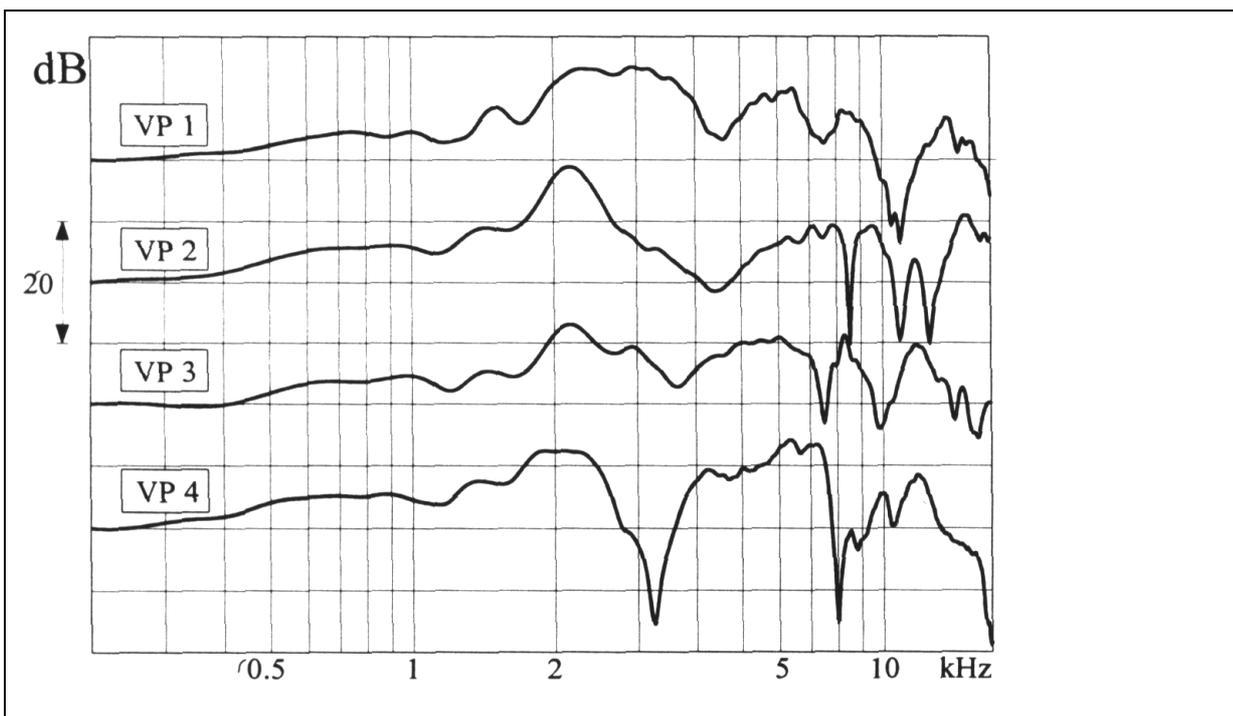


Abbildung 32 Außenohrübertragungsfunktionen von 4 verschiedenen Personen [aus 6]

Das **Mittelohr**, bestehend aus Hammer, Amboß und Steigbügel wirkt als Druckwandler mit verstärkender Wirkung und überträgt die Schwingungen des Trommelfells auf sogenannte Ovale Fenster. Temporär kann diese Mechanik durch eine mechanische Vorspannung eine dämpfende Wirkung als Schutzmechanismus gegen extreme Schalldrücke aufbauen. Das Mittelohr ist mit Luft gefüllt. Über die Eustach'sche Röhre kann ein Druckausgleich mit der Außenwelt erfolgen, um eine einseitige Vorspannung des Trommelfells zu vermeiden.

Innenohr: Der Steigbügel überträgt die Schwingungen auf das ovale Fenster und damit auf die vollständig mit Lympflüssigkeit gefüllte Schnecke oder Cochlea (2,5 Windungen auf 3cm Länge). Auf der Trennwand der Schnecke (Basilarmembran) befinden sich die Sinneszellen, die die Schwingungen in elektrische Ströme umwandeln, die dann wiederum vom Hörnerv an das Gehirn weitergeleitet werden. Die Basilarmembran wird frequenzabhängig an unterschiedlichen Stellen zu Schwingungen angeregt. Hohe Frequenzen nahe am ovalen Fenster, tiefe Frequenzen weiter innen liegend.

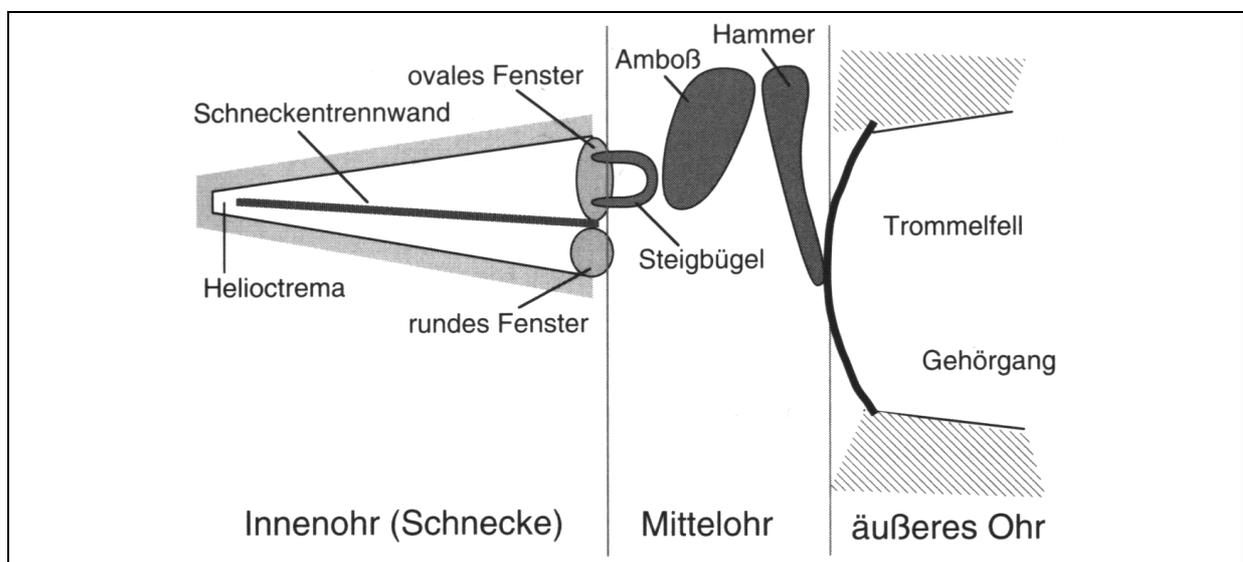


Abbildung 33 Das Ohr in einer schematischen Darstellung [aus 3]

3.2.1 Hörfläche und Lautstärkepegel

Die Lautstärkeempfindung des Gehörs ist stark frequenzabhängig. So liegt die Hörschwelle im mittleren Frequenzbereich bei einem Schalldruckpegel von ca. 0 dB, bei tiefen Frequenzen jedoch deutlich höher bei Werten von bis zu 70 dB für einen 20 Hz Ton. Ein einfaches psychoakustisches Experiment untersucht die Zusammenhänge zwischen der Frequenz der Schallereignisse und dem daraus resultierenden Hörempfinden:

Einer Versuchsperson werden Testtöne verschiedener Frequenz dargeboten und jeweils ein 1000 Hz Ton zum Vergleich. Anschließend wird der Schalldruckpegel ermittelt, bei dem der Testton gleich laut dem 1000 Hz Vergleichston empfunden wird. Über den gesamten Hörbereich in 10 dB Schritten erfasst, ergeben sich daraus die Kurven gleicher Lautstärke. Die Kurven gleicher Lautstärke werden in Phon skaliert, um eine Unterscheidung zu den tatsächlichen Schalldruckpegeln in dB zu erreichen. Der Wert in Phon entspricht dabei dem dB Schalldruckwert des gleich laut wahrgenommenen 1 kHz Vergleichstons.

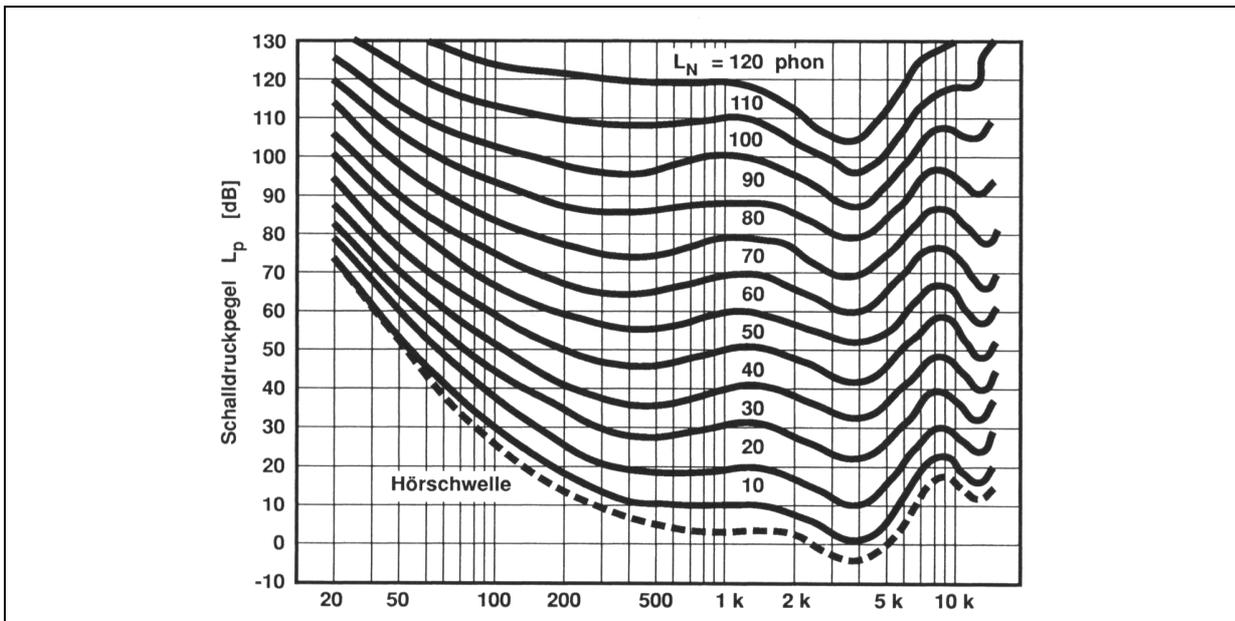


Abbildung 34 Kurven gleicher Lautstärke nach DIN 45630 [aus 5]

Basierend auf diesen Kurven arbeitet auch die Loudness Regelung an manchen HiFi-Geräten, die bei geringen Pegeln die tiefen Frequenzen anhebt, so dass die geringere Empfindlichkeit des Gehörs damit kompensiert werden kann.

Ebenso müssen diese Kurven natürlich bei der Lärmmessung Berücksichtigung finden, da letztendlich die tatsächliche Lärmempfindung und nicht der reine Messwert in dB Schalldruckpegel zählt. Für den praktischen Gebrauch hat man sich auf drei Kurven geeinigt. Die A-Kurve für geringe Pegel ($L_N = 40$ phon), die B-Kurve für mittlere Pegel ($L_N = 80$ phon) und die C-Kurve für hohe Lautstärkepegel ($L_N = 100$ phon). Die folgende Abbildung zeigt diese drei Kurven, wo sehr gut zu erkennen ist, dass vor allem bei geringen Pegeln (A-Kurve) die tiefen Frequenzen merklich weniger gewichtet werden als der mittlere Bereich, wo das Gehör am empfindlichsten ist.

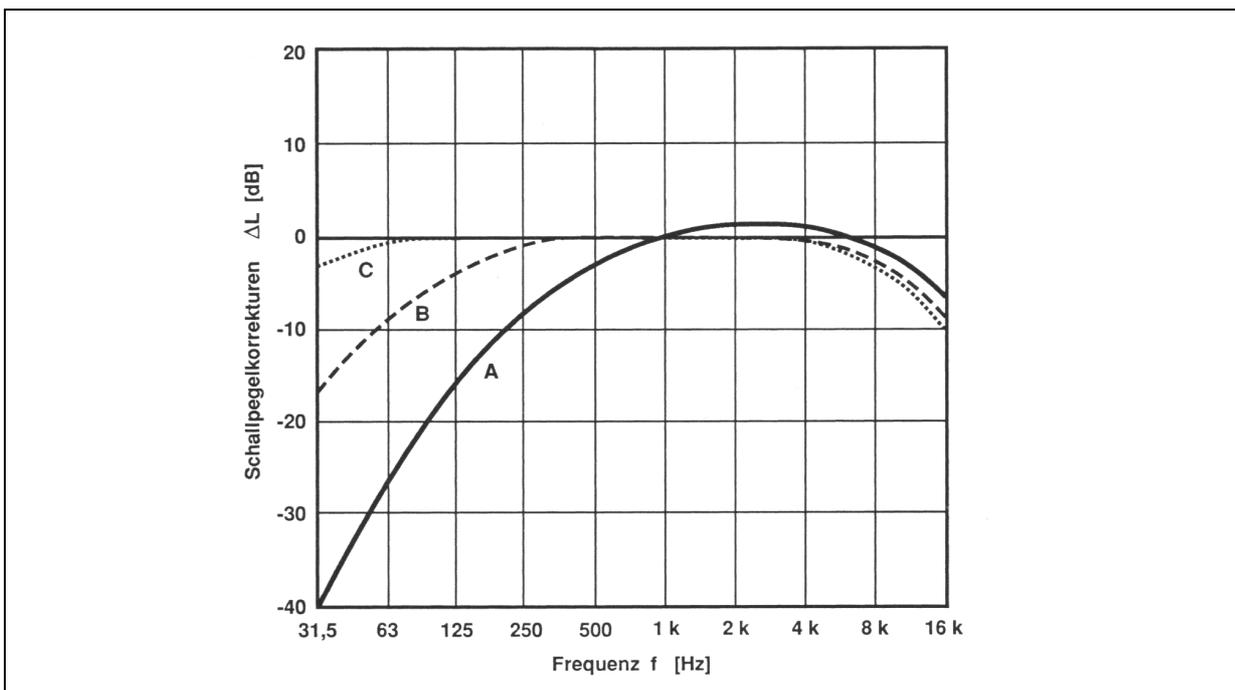


Abbildung 35 A-, B- und C-Kurve zur frequenzabhängigen Bewertung von Lärm [aus 5]

3.2.2 Richtungshören

Für die Richtungseinteilung der räumlichen Ortung von Schallereignissen benutzt man ein kopfbezogenes Koordinatensystem mit 3 Ebenen nach Abbildung 36. Hörversuche, bei denen den Probanden Geräusche aus verschiedenen Richtungen vorgespielt werden, haben ergeben, dass die beste Differenzierung von Richtungen in der Horizontalebene von vorne möglich ist. Am schwierigsten fällt dagegen die Zuordnung von Geräuschen in der Medianebene und von hinten.

Die Auswertung des Gehörten im Gehirn macht sich verschiedene Eigenschaften des menschlichen Ohres zur Richtungslokalisierung zunutze.

In der **Horizontal- und Frontalebene** sind es bei tiefen Frequenzen in erster Linie Laufzeitunterschiede, da der Schall an dem Ohr, das der Einfallsrichtung zugewandt ist, ein wenig früher eintrifft. Bei hohen Frequenzen sind es mehr die Pegelunterschiede, die durch die Abschattung des abgewandten Ohres durch den Kopf entstehen. Hohe Frequenzen werden dadurch für das abgewandte Ohr geschwächt. Bei tiefen Frequenzen ist die Abschattung nicht wirksam, da sie sich auf Grund ihrer großen Wellenlänge ungestört um den Kopf herum beugen und so auch das abgewandte Ohr unvermindert erreichen.

In der **Medianebene** können solche Eigenschaften nicht ausgenutzt werden, womit sich schon die größeren Schwierigkeiten zur Lokalisation einer Quelle erklären lassen. Hier bleiben lediglich Frequenzgang- bzw. Klangunterschiede in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung.

Eine zusätzliche Hilfe verschafft sich der Mensch durch unbewusste Peilbewegungen des Kopfes, wenn er versucht eine Geräuschquelle zu lokalisieren.

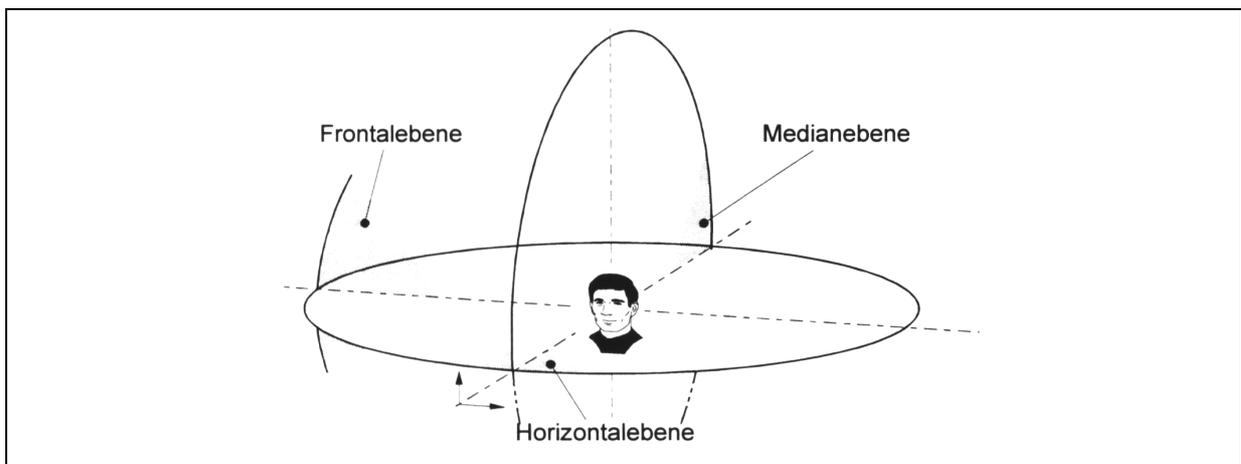


Abbildung 36 Richtungsebenen für ein kopfbezogenes Koordinatensystem [aus 6]

Generell lassen sich die Merkmale zur Richtungsunterscheidung mit der Außenohrübertragungsfunktion definieren. In dieser Funktion ist der Frequenzgang der Übertragungsstrecke Ohr inklusive Abschattung durch den Kopf und Reflexionen am Torso erfasst. Messtechnisch werden die Außenohrübertragungsfunktionen durch ein kleines Mikrofon im Gehörkanal erfasst. In einer reflexionsfreien Umgebung wird dann mit einem Lautsprecher aus den betreffenden Richtungen ein Testsignal abgespielt und vom Mikrofon im Ohrkanal wieder aufgenommen. Die daraus ermittelten Frequenzgänge für die Übertragungsstrecke Außenohr weisen sehr starke Richtungsabhängigkeiten auf. Prägt man einem Signal einen solchen Frequenzgang künstlich auf, so lässt sich damit auch ein in der Realität nicht vorhandener Richtungseindruck erwecken. Diese Eigenschaft macht man sich heute mit sogenannten

Richtungsmischern in der Tonstudioteknik oder auch bei vielen Anwendungen der virtuellen Realität zunutze.

Trifft ein Schallereignis aus mehreren Richtungen am Ohr ein, so wird zur Richtungslokalisierung immer der zuerst eintreffende Anteil genutzt. Das "Gesetz der ersten Wellenfront" besagt, dass auch dann, wenn die verzögerten Anteile (10-50ms später) um bis zu 10 dB lauter sind als die frühen ersten Schallanteile, immer die zuerst eintreffende Schallwelle zur Orientierung genutzt wird. Diesen Effekt macht man sich in der Beschallungstechnik zunutze, wenn z.B. ein Sprecher durch Deckenlautsprecher unterstützt wird. Ohne weitere Maßnahmen würden weit von der Bühne entfernte Zuhörer den Sprecher nicht mehr direkt von der Bühne sondern nur noch aus der Decke über die Lautsprecher wahrnehmen. Verzögert man jetzt das elektrische Signal für den Lautsprecher um die Laufzeit des Schalls von der Bühne zum Zuhörer zuzüglich einem Wert von 10-20ms, so wird die Quelle wieder an der richtigen Stelle auf der Bühne geortet. Da die zweite Quelle, also der Lautsprecher, um bis zu 10 dB lauter sein darf, genügen geringe Pegel des Direktschalls von der Originalquelle, um den natürlichen Richtungsbezug wieder herzustellen.

4 Phänomene der Raumakustik und Schallausbreitung

Der umgebende Raum ist bei allen Arten von Sprach- und Musikdarbietungen sowie Klanginstallationen eine der entscheidenden Einflussgrößen. Dabei soll es zunächst einmal nicht von Bedeutung sein, ob mit oder ohne Hilfe von Lautsprechern gearbeitet wird. Die Zusammenhänge in der Raumakustik können als Übertragungsfunktion zwischen einem Schallsender oder einer Quelle und einem Empfänger betrachtet werden. Als Schallsender kommt alles, was Schall abstrahlt in Betracht, d.h. Sprecher, Instrumente, Lautsprecher, etc. Empfänger können die Zuhörer oder Mikrophone sein. Beide Seiten, sowohl die Sender, wie auch die Empfänger werden über eine Richtcharakteristik definiert. Ein Lautsprecher kann so z.B. eine bevorzugte Abstrahlrichtung haben, ebenso wie ein Musikinstrument abhängig von der Frequenz sehr unterschiedliche Richtcharakteristiken ausbildet. Gleiches gilt für die Empfängerseite.

In den nun folgenden grundsätzlichen Betrachtungen zur Raumakustik wird aber zunächst einmal von Sendern und Empfängern mit kugelförmiger Abstrahl- bzw. Empfangscharakteristik ausgegangen. Auch die Messung oder Berechnung der typischen raumakustischen Parameter geht immer von ungerichteter Abstrahlung und ungerichtetem Empfang aus.

4.1 Übertragungsstrecke Raum

Der Schall gelangt auf der Übertragungsstrecke Raum entsprechend seines zurückgelegten Weges früher oder später zum Empfänger. Einen direkten Weg vorausgesetzt, trifft immer zuerst der sogenannte Direktschall ein. Danach folgen mehr oder weniger viele Reflexionen von Wänden, Decke, Boden und Einrichtungsgegenständen. Ein Extremfall sind die reflexionsfreien Messräume, deren Wände keinen Schall reflektieren, so dass es hier wie im absoluten Freifeld nur Direktschall und keinerlei Reflexionen gibt. Auf der anderen Seite stehen extrem hallige Räume, wie z.B. Kirchenräume oder große Fabrikhallen, in denen die Reflexionen einen mehrere Sekunden langen Nachhall erzeugen können.

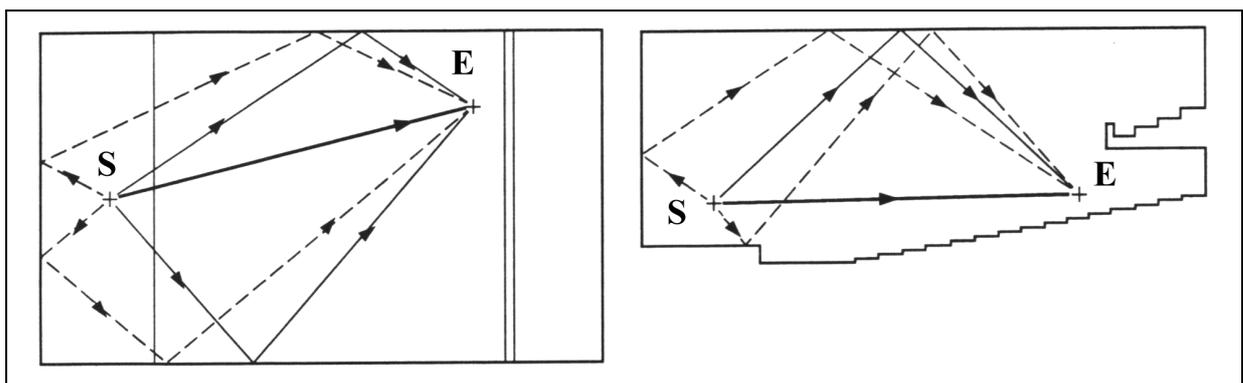


Abbildung 37 Zwei Schnitte durch einen Raum mit Schallsender (S) und Empfänger (E). Die dicke Linie entspricht dem kürzest möglichen Weg des Direktschalls. Die dünne durchgezogene Linie zeigt Anteile, die auf ihrem Weg vom Sender zum Empfänger einmal an einer Begrenzungsfläche reflektiert wurden. Zweimal reflektierte Schallstrahlen sind gestrichelt eingezeichnet. [aus 7]

Aus dem Direktschall und den Reflexionen entsteht die **Raumimpulsantwort (RIA)**, die anschaulich als akustischer Fingerabdruck eines Raumes gesehen werden kann. In der Raumimpulsantwort sind alle Information zur Berechnung der raumakustischen Parameter enthalten. Mit Hilfe entsprechender PC Programme können Musik- und Sprachaufnahmen mit dieser Raumimpulsantwort gefaltet und so in den Raum hineingehört werden.

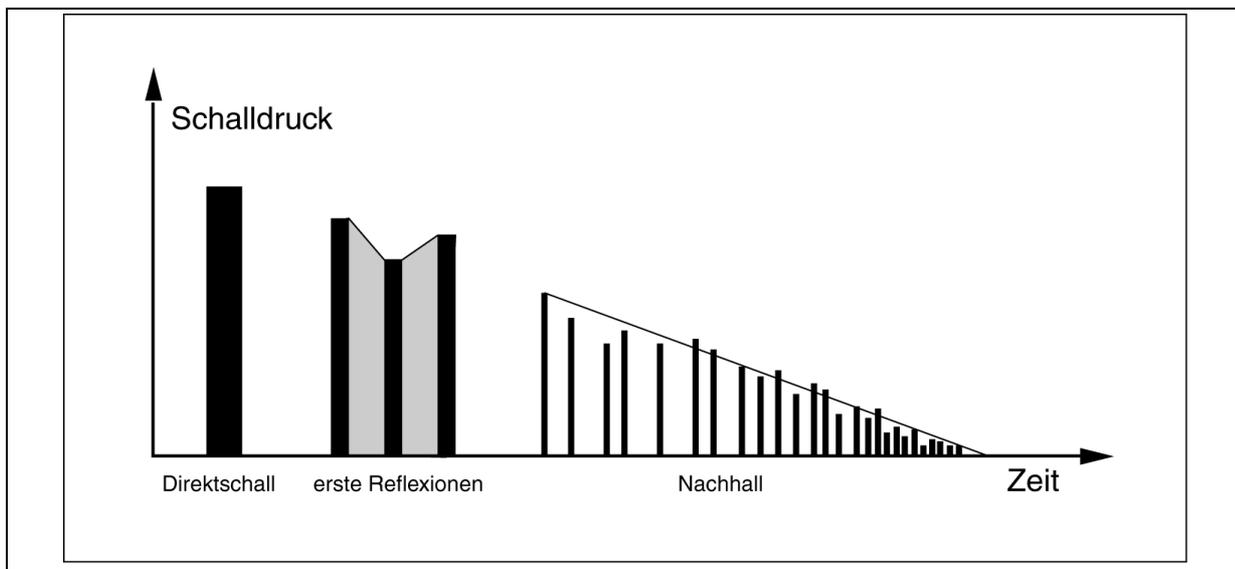


Abbildung 38 Schematische Darstellung des Schalldruckverlaufs in einem Raum nach Anregung mit einem Impuls [aus 3]

Nachfolgend sind 6 Raumimpulsantworten gezeigt, die in teilweise sehr unterschiedlichen aber durchweg großen Räumen gemessen worden sind. Die Beispiele sind mit Absicht recht extrem ausgewählt worden, um einige Besonderheiten besser demonstrieren zu können.

Alle Impulsantworten können direkt angehört werden. Zur Beschränkung der Dateigröße musste der Nachhall allerdings nach 3s beschnitten werden. Der grundsätzliche Verlauf des Nachhalls, sowie spezielle Effekte durch Flatterechos oder Focuspunkte sind trotzdem sehr gut wahrnehmbar. Zusätzlich ist ein kurzer Ausschnitt eines Sprechersignals (Original: [SPRECHER](#)) gefaltet mit den Impulsantworten zu hören. Die Begriffe Nachhallzeit, Deutlichkeit und Klarheitsmaß werden in Kap.5 unter „Messtechnischen Größen in der Raumakustik“ erläutert.

<p>RIA 1 Raumimpulsantwort einer kleinen, jetzt zum Wohnraum umgebauten Fabrikhalle mit Teppichboden und vielen absorbierenden Einrichtungsgegenständen</p> <p>Nachhallzeit $T_{60} = 1,0$ s Deutlichkeit $D_{50} = 89$ % Klarheitsmaß $C_{80} = 11$ dB</p> <p>Wenig Nachhall und weitgehend gutmütige akustische Eigenschaften charakterisieren diese Halle. Von der Rückwand gibt es ein kleines Echo.</p> <p>Sprecher im Raum: SPR-FOON</p>	<p>Raumimpulsantwort gemessen in einer bewohnten Fabrikhalle</p> <p>Raumimpulsantwort: IMP-FOON</p>
<p>RIA 2 Raumimpulsantwort des Plenarsaales im Berliner Reichstag mit Einrichtung ohne Publikum gemessen</p> <p>Nachhallzeit $T_{60} = 2,1$ s Deutlichkeit $D_{50} = 72$ % Klarheitsmaß $C_{80} = 5,7$ dB</p> <p>Der Direktschall trifft zweigeteilt ein. Ursache sind die unterschiedlichen Laufzeiten der Anteile von den beiden Lautsprecherampeln und die Messposition in einer Randlage des Raumes.</p>	<p>Raumimpulsantwort gemessen im Plenarsaal</p>

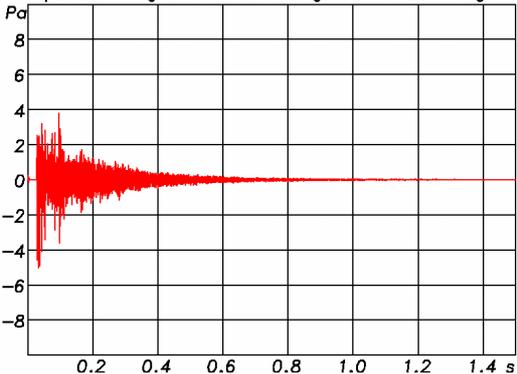
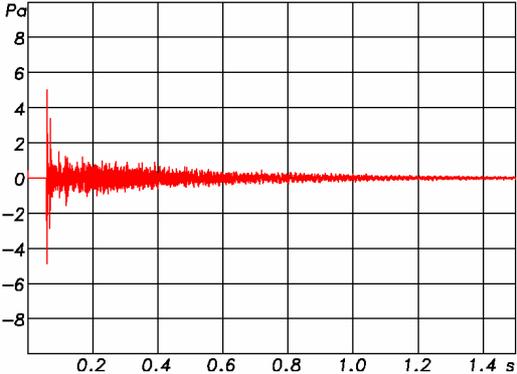
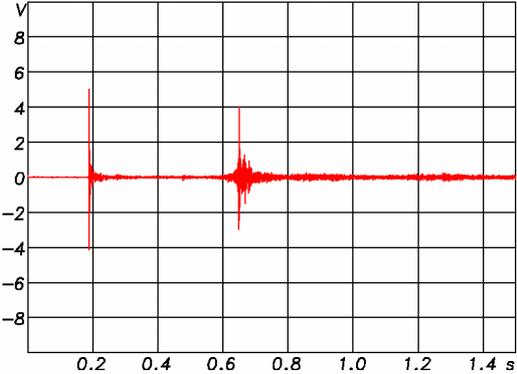
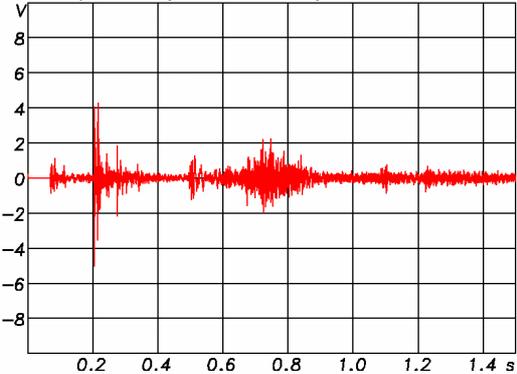
<p>Sprecher im Raum: SPR-PLEN</p> <p>RIA 3 Raumimpulsantwort in einem Sitzungssaal der LG Stuttgart in leerem Zustand.</p> <p>Nachhallzeit $T_{60} = 1,4$ s Deutlichkeit $D_{50} = 36$ % Klarheitsmaß $C_{80} = 1,0$ dB</p> <p>Der Raum im Schuhkarton Format mit schallharten Wänden verursacht nicht nur einen starken Nachhall sondern auch ein unschönes Flatterecho.</p> <p>Sprecher im Raum: SPR-LGST</p>	<p>Raumimpulsantwort: IMP-PLEN</p> <p><i>Impulsantwort gemessen im Sitzungssaal der LG Stuttgart</i></p> 
<p>RIA 4 Raumimpulsantwort gemessen in einer leeren Turbinenhalle mit 28.000m³ Volumen</p> <p>Nachhallzeit $T_{60} = 3,5$ s Deutlichkeit $D_{50} = 30$ % Klarheitsmaß $C_{80} = -2,2$ dB</p> <p>Durch die Größe des Raumes und nur wenige absorbierende Flächen entsteht ein sehr ausgeprägter Nachhall mit einer starken Reflexion vom Glasdach.</p> <p>Sprecher im Raum: SPR-TURB</p>	<p>Raumimpulsantwort: IMP-LGST</p> <p><i>Raumimpulsantwort in der Turbinenhalle Düsseldorf</i></p> 
<p>RIA 5 Raumimpulsantwort gemessen in der Cargolifter Halle im Fokuspunkt der Eingangstore. Position 1</p> <p>Nachhallzeit $T_{60} = 17$ s Deutlichkeit $D_{50} = 24$ % Klarheitsmaß $C_{80} = -5$ dB</p> <p>Durch die Tore der Halle in Form einer Viertelkugel (Radius ca. 100m !) entsteht ein ausgeprägter Fokuspunkt, der zu extremen akustischen Problemen führt.</p> <p>Sprecher im Raum: SPR-CAR1</p>	<p>Raumimpulsantwort: IMP-TURB</p> <p><i>Raumimpulsantwort gemessen in der Cargolifter Halle unter dem Tor</i></p> 
<p>RIA 6 Raumimpulsantwort gemessen in der Cargolifter Halle. Position 2</p> <p>Nachhallzeit $T_{60} = 17$ s Deutlichkeit $D_{50} = 3$ % Klarheitsmaß $C_{80} = -14$ dB</p> <p>Extremer Nachhall mit konzentrierten, sehr späten Reflexionen von den Toren. Extrembeispiel einer Halle mit ca. 4 Mio. m³ Raumvolumen und fast ausschließlich runden Begrenzungsflächen.</p> <p>Sprecher im Raum: SPR-CAR2</p>	<p>Raumimpulsantwort: IMP-CAR1</p> <p><i>Raumimpulsantwort gemessen in der Cargolifter Halle unter dem Tor</i></p> 
	<p>Raumimpulsantwort: IMP-CAR2</p>

Abbildung 39 Verschiedene Raumimpulsantworten und die zugehörigen raumakustischen Parameter mit Hörbeispielen

Inhalt	Sample File	Play
Raumimpulsantwort Raum 1 Fabrikhalle	IMP-FOON	
Raumimpulsantwort Raum 2 Plenarsaal	IMP-PLEN	
Raumimpulsantwort Raum 3 Sitzungssaal	IMP-LGST	
Raumimpulsantwort Raum 4 Turbinenhalle	IMP-TURB	
Raumimpulsantwort Raum 5 Cargolifterhalle Pos.1	IMP-CAR1	
Raumimpulsantwort Raum 6 Cargolifterhalle Pos.2	IMP-CAR2	
Sprecher Originalsignal	SPRECHER	
Sprecher in Raum 1 Fabrikhalle	SPR-FOON	
Sprecher in Raum 2 Plenarsaal	SPR-PLEN	
Sprecher in Raum 3 Sitzungssaal	SPR-LGST	
Sprecher in Raum 4 Turbinenhalle	SPR-TURB	
Sprecher in Raum 5 Cargolifterhalle Position 1	SPR-CAR1	
Sprecher in Raum 6 Cargolifterhalle Position 2	SPR-CAR2	

Tabelle 9 Tabelle mit Beispielsamples der Raumimpulsantworten und einem 10s Sprechersignal gefaltet mit den Raumimpulsantworten (alle WAV-Files Mono 44,1 kHz 16-Bit)

4.2 Grenzflächen

Für eine Schallausbreitung in Räumen müssen bestimmte physikalische Randbedingungen eingehalten werden. Auf einer schallharten Wand bedeutet das für senkrechten Schalleinfall, dass die Schallschnelle v hier gleich 0 ist und der Druck dort einen Maximalwert erreicht. Für einen schallweichen Abschluss (Wand mit dicker Schicht Dämmmaterial) gilt demnach umgekehrt, dass es vor der Wand ein Schnellemaximum und ein Druckminimum gibt.

Aus diesen Gesetzmäßigkeiten lässt sich ableiten, dass sich bei tiefen Frequenzen stehende Wellen zwischen den Begrenzungsflächen aufbauen. Diese werden auch als Eigenfrequenzen eines Raumes bezeichnet. In großen Räumen ist die Dichte der Eigenfrequenzen auch im tieffrequenten Bereich sehr hoch, so dass von ihnen keine weitere Beeinträchtigung ausgeht. In kleineren Räumen führen sie jedoch zu einer unregelmäßigen Tieftonwiedergabe und einer sehr ausgeprägten Abhängigkeit von der Position im Raum. Ein Rechteckraum mit 6m Länge, 4m Breite und 2,5m Höhe bildet so z.B. in Längsrichtung bei 28,3 Hz seine tiefste Eigenfrequenz aus. An den begrenzenden Wandflächen entsteht jeweils ein Druckmaximum und in der Raummitte eine Nullstelle. Praktisch heißt das, ein 28,3 Hz Ton ist in der Raummitte nicht hörbar. Direkt vor der Wand ist er dagegen besonders laut. Die Frequenzen, die in einem Raum stehende Wellen ausbilden, sind für einen Rechteckraum mit der einfachen Formel

$$f_n = \frac{340 \frac{m}{s}}{2} \sqrt{\left(\frac{n_1}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_2}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_3}{l_z}\right)^2} \quad \text{mit } l \text{ in m und } f \text{ in Hz ; } n=(0,1,2,\dots) \quad \text{Gleichung 4-1}$$

zu berechnen. In der Gleichung sind für l_x , l_y und l_z die Länge, Breite und Höhe des Raumes einzusetzen. In höheren Frequenzbereichen (für den Beispielraum ab ca. 140 Hz aufwärts) wird die Dichte der Eigenfrequenzen so groß, dass sie nicht mehr als störende Maxima in Erscheinung treten. Diese Grenzfrequenz lässt sich anhand des Raumvolumens und der Nachhallzeit mit folgender Gleichung abschätzen:

$$f_{gr} \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad \text{mit der Nachhallzeit } T \text{ in s und dem Raumvolumen } V \text{ in m}^3 \quad \text{Gleichung 4-2}$$

Für den Beispielraum errechnet sich daraus bei einer angenommenen Nachhallzeit von 0,3s und einem Volumen von 60m³ eine Grenzfrequenz von 140 Hz. Für einen größeren Raum mit 750m³ Volumen und einer Nachhallzeit von 1s liegt diese Grenzfrequenz dann schon bei 73 Hz.

Generell ist daraus abzuleiten, dass bei kleinen Räumen Probleme mit Eigenfrequenzen für die Wiedergabe tieffrequenter Töne zu beachten sind.

In ähnlicher Form gilt das vorab gesagt auch für nicht rechteckige Räume. Stehende Wellen gibt es auch in pyramiden- oder in zylinderförmigen Räumen.

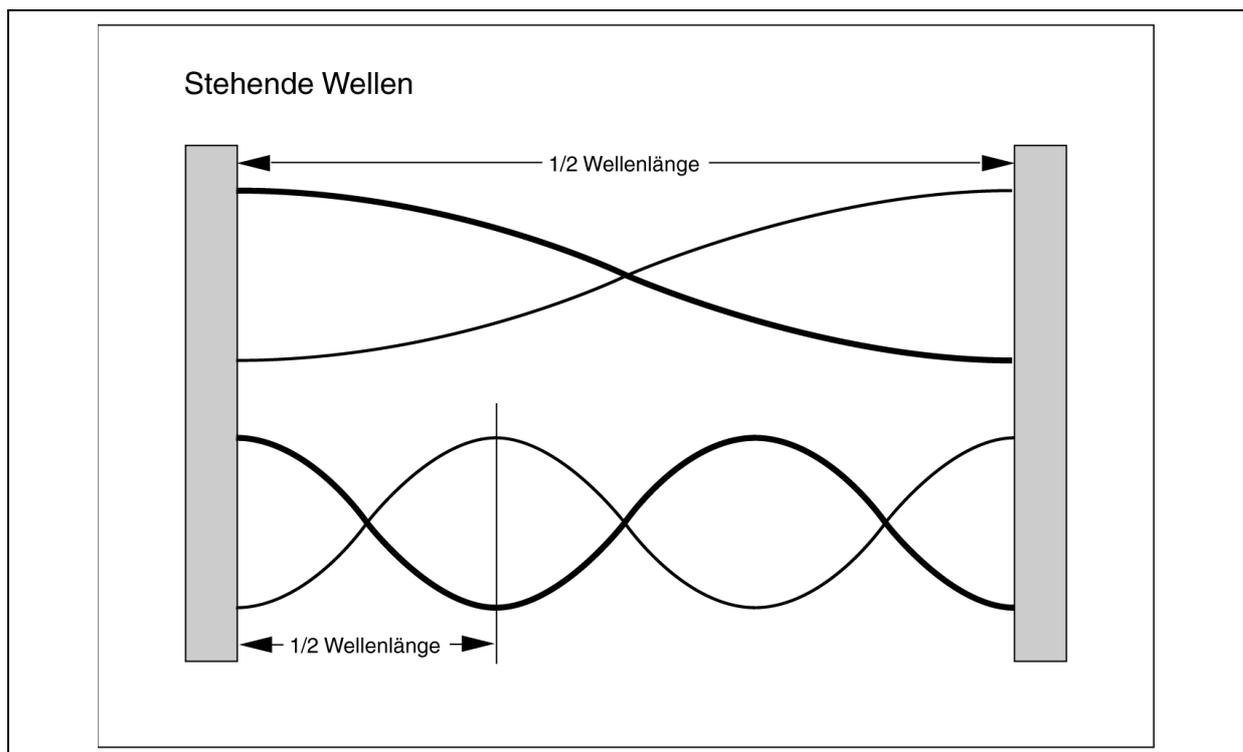


Abbildung 40 Schallausbreitung zwischen zwei schallharten Wänden mit $\lambda/2$ oder einem ganzzahligen Vielfachen davon. [aus 3]

Spezielle Lautsprecheranordnungen an den gegenüberliegenden Begrenzungsflächen, bei denen die hintere Seite verpolt zur Vorderseite arbeitet und zusätzlich mit einem Delay entsprechend der Laufzeit des Schalls zwischen den Wänden beaufschlagt ist, verwandeln den Hörraum in einen akustischen Kanal und vermeiden diese Probleme. Die hintere Wand des Hörraumes wird so durch die zusätzlichen Lautsprecher für die von vorne kommende Wellenfront „unsichtbar“ gemacht. Interessant ist dieses Verfahren vor allem für aufwendige Surround Installationen in kleinen Filmstudios.

4.3 Reflexion, Absorption, Dissipation, Transmission

Die im vorhergehenden Kapitel angestellten Betrachtungen der Schallausbreitung in Räumen basierten auf der Wellentheorie und sind für tiefe Frequenzen anzuwenden, bei denen sich die Wellenlängen in der Größenordnung der Raumabmessungen befinden. Für höhere Frequenzen (siehe Formel für f_{gr}) geht man dagegen zur Betrachtung der Schallausbreitung mit Hilfe der geometrischen Akustik über. Schallwellen werden hier als Schallstrahlen dargestellt, die reflektiert,

absorbiert, gestreut, gebündelt oder auch gebeugt werden können. Diese Vorgänge werden in den folgenden Absätzen näher erläutert.

Trifft eine Schallwelle in einem Raum auf eine Begrenzungsfläche auf, so wird ein Teil der eintreffenden Schalleistung (W_1) in den Raum zurück reflektiert und ein Teil (W_{abs}) dringt in die Begrenzungsfläche ein. Aus Sicht des Raumes ist dieser Anteil damit weg. Abhängig vom Wandmaterial wird die in die Wand eingedrungene Schalleistung in Reibungswärme (W_{dis}) umgesetzt (Dissipation) oder weitergeleitet nach außen oder in den angrenzenden Raum (Transmission). Der Schall kann hier in Form von Körperschall den direkten Weg (W_2) gehen oder auf Umwegen durchs Mauerwerk (W_3) weitergeleitet werden.

Eine massive harte Wand reflektiert den Schall nahezu zu 100%, so dass der durch Dissipation und Transmission absorbierte Anteil sehr klein ist. Ist die Wand dagegen mit einer dicken Schicht (dick in Relation zur Wellenlänge) Mineralwolle belegt, so wird nur ein minimaler Anteil des auftreffenden Schalls reflektiert und fast alles absorbiert. Aufgrund der porösen Struktur wird die absorbierte Schalleistung nicht transmittiert sondern primär durch Dissipation in Wärme umgesetzt. Aus Sicht des Raumes verhält sich ein offenes Fenster ins Freie sehr ähnlich. Es gibt keine Reflexionen in den Raum zurück. Der Unterschied liegt lediglich darin, dass die für den Raum absorbierte Schalleistung jetzt nicht durch Dissipation in Wärme umgesetzt, sondern zu 100% ins Freie transmittiert wurde.

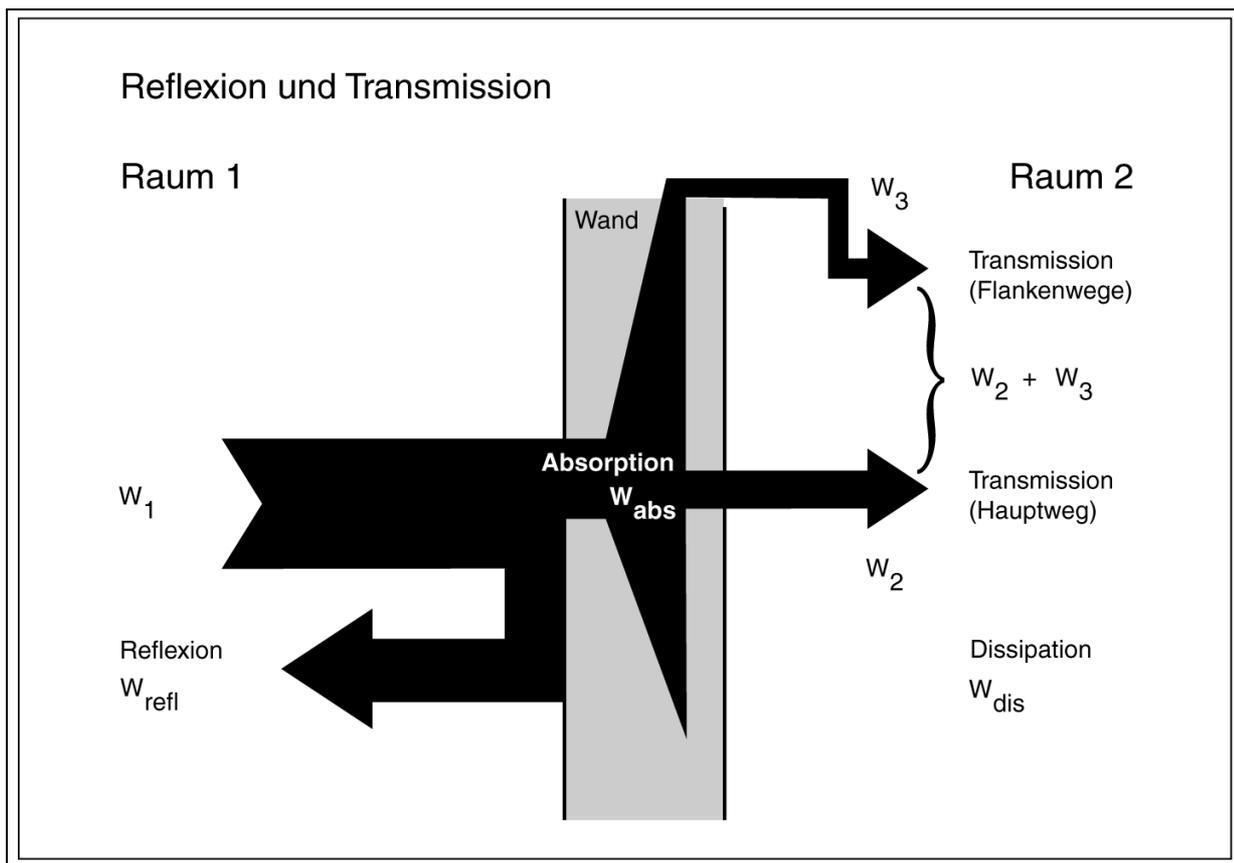


Abbildung 41 Auf eine Wand auftreffender Schall wird teilweise reflektiert und teilweise transmittiert [aus 5]

Aus Sicht der Raumakustik interessiert primär der Anteil des Schalls, der von einer Begrenzungsfläche in den Raum zurück reflektiert wird. Als Wert wird hier der Schallabsorptionsgrad α zwischen 0 und 1 in Abhängigkeit von der Frequenz angegeben, der das Verhältnis zwischen absorbierte Schalleistung (W_{abs}) und einfallender Schalleistung (W_1) angibt.

Wie die Reflexion im Detail ausfällt, ist wiederum stark von der Wellenlänge und der Oberflächenstruktur abhängig. Hier kann es zur Beugung, zu geometrischer Reflexion oder auch zu diffuser Streuung kommen. Näheres dazu in einem eigenen Absatz (Diffuse Streuung) zu diesem Thema.

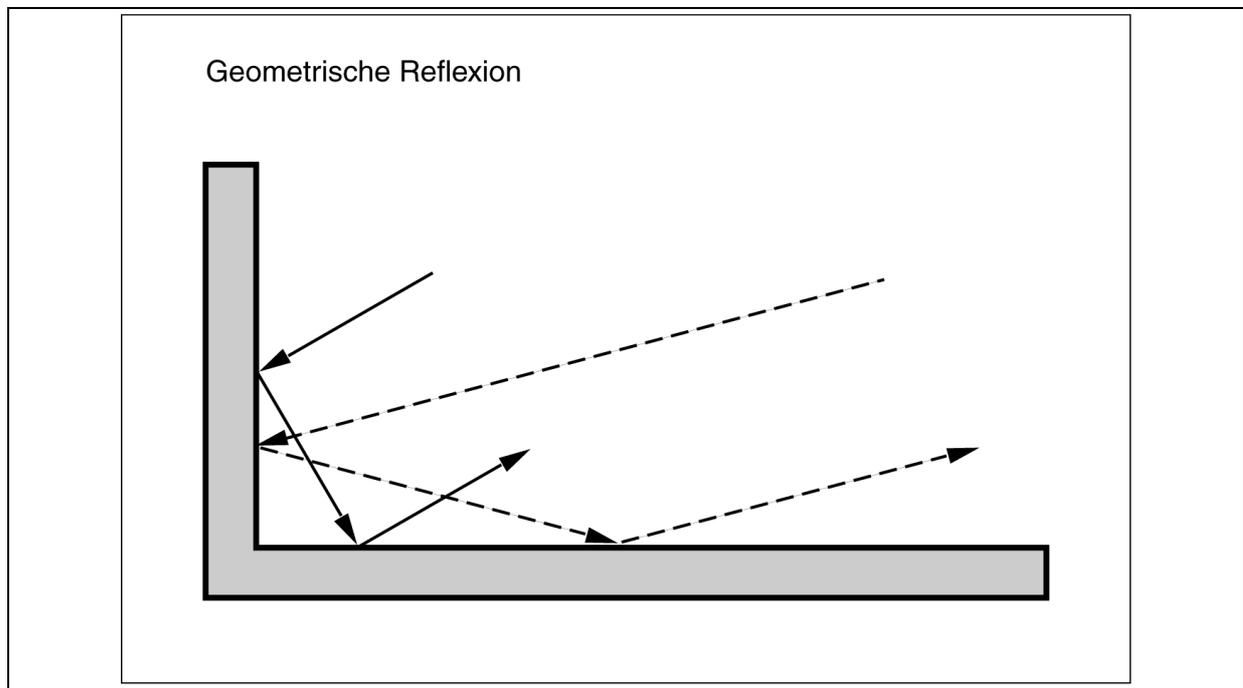


Abbildung 42 geometrische Reflexion an Begrenzungsflächen mit Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel [aus 3]

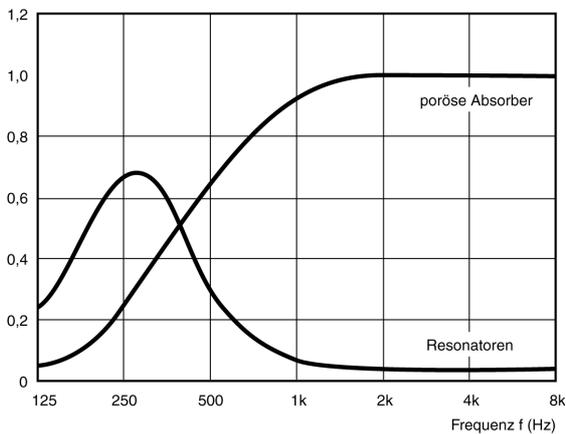
4.4 Absorber

Absorption von Schall in der Raumakustik basiert primär auf zwei Mechanismen. Das wäre zum einen der **poröse Absorber**, ein offenporiges Material wie Schaumstoff oder Mineralwolle, in das die Schallwelle eindringt und durch Reibungsverluste in Wärme umgesetzt wird. Ein poröser Absorber kann nur dann seine Wirkung entfalten, wenn die Schallwelle mit einer möglichst großen Schnelle im Absorber schwingt. Befindet sich der poröse Absorber daher vor einer schallharten Wand, an deren Begrenzungsfläche die Schallschnelle $v=0$ ist, so ist er nur dann voll wirksam, wenn mindestens noch das erste Schnelleximum der Schallwelle im Absorber liegt. Das erste Schnelleximum ist eine Viertel Wellenlänge ($\lambda/4$) von der Wand entfernt, woraus sich z.B. schließen lässt, dass ein poröser Absorber, der ab 1000 Hz seine volle Wirkung zeigen soll, mindesten eine Dicke von 8,5cm aufweisen muss. Kann die Schallwelle nicht mehr mindestens mit $\lambda/4$ in den Absorber eindringen, so lässt die absorbierende Wirkung nach (siehe auch Abbildung 43).

$$\text{Wellenlänge bei 1000 Hz : } \lambda = \frac{340 \frac{m}{s}}{1000 \frac{1}{s}} = 34cm \quad \rightarrow \quad \lambda/4 = 8,5cm$$

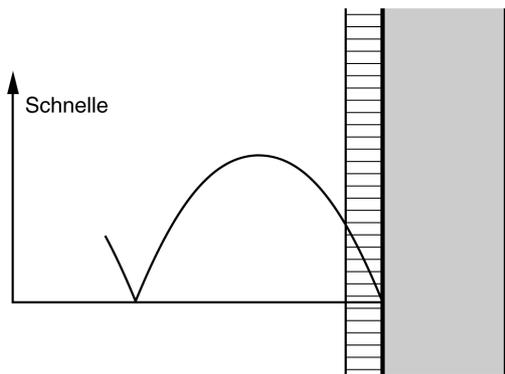
Ebenfalls zur Gruppe der porösen Absorber gehören viele Materialien des Innenausbau, wie Teppiche, Vorhänge, Bestuhlung mit Polster, etc...

Nicht vergessen werden darf in diesem Zusammenhang das Publikum als eine Art poröser Absorber, das, genügende Dichte vorausgesetzt, in typischen Veranstaltungsräumen einen erheblichen Anteil an der Gesamtabsorption hat.



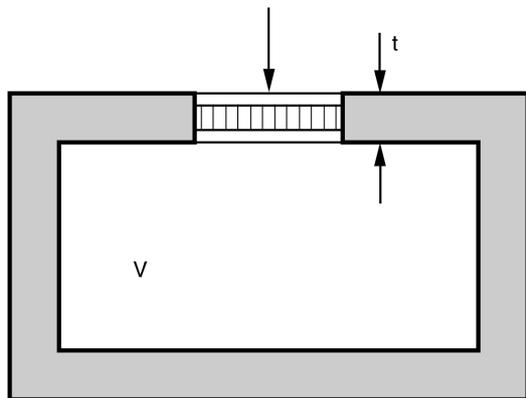
Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Frequenz bei porösen Absorbieren und bei Resonanzabsorbieren

Poröse Absorber werden zur breitbandigen Absorption bei mittleren und hohen Frequenzen eingesetzt. Resonanzabsorber wirken dagegen eher schmalbandig und kommen primär bei tieferen Frequenzen zum Einsatz.



Poröser Absorber auf schallharter Wand

Ein poröser Absorber wird erst dann voll wirksam, wenn mindestens das erste Schnellemaximum der Welle bei $\lambda/4$ noch im Absorber liegt. Für tiefere Frequenzen mit einer größeren Wellenlänge lässt die Wirkung schnell nach.



Resonanzabsorber nach dem Masse-Feder Prinzip

Resonanzabsorber werden bevorzugt zur schmalbandigen Absorption bei tieferen Frequenzen eingesetzt

Abbildung 43 Absorption in Abhängigkeit von der Frequenz (obere Grafik) bei porösen Absorbieren (Mitte) und bei Resonanzabsorbieren (unten) [aus 5]

Die zweite häufig anzutreffende Form von Absorbieren sind die **Resonanzabsorber**.

Resonanzabsorber werden bevorzugt zur schmalbandigen Absorption bei tieferen Frequenzen eingesetzt, wo poröse Absorber nicht mehr zu vertretende Ausmaße annehmen würden. Das Prinzip des Resonanzabsorbers basiert auf dem Masse-Feder System. Die Masse kann in der praktischen Ausführung aus einer schwingend gelagerten Holzplatte (z.B. Sperrholz auf Lattengerüst) bestehen. Die dahinter eingeschlossene Luft agiert als Feder, so dass ein schwingfähiges System mit einer Resonanzfrequenz entsteht. Die Resonanzfrequenz kann über die Flächenmasse der Platte und die dahinter eingeschlossene Luftschicht beeinflusst werden. Im Bereich der Resonanz schwingt dieser Resonator besonders heftig und absorbiert damit Schalleistung. Eine weitere Möglichkeit eines Resonanzabsorbers ist der Helmholtzresonator, bei dem eine Luftmasse (Resonatoröffnung) auf

einem Luftpolster (Volumen des Resonators) schwingt. Das Volumen wird mit Dämmstoffen gefüllt, so dass die hier schwingende Luft hohe Reibungsverluste erzeugt und damit auch wieder Schalleistung in Verlustwärme umsetzt.

Poröse Absorber werden zur breitbandigen Absorption bei mittleren und hohen Frequenzen eingesetzt. Resonanzabsorber wirken dagegen eher schmalbandig und kommen primär bei tieferen Frequenzen zum Einsatz.

Alle Arten von Absorbern weisen generell eine sehr starke Frequenzabhängigkeit auf, so dass ihr akustisches Verhalten in Form des Schallabsorptionskoeffizienten α nicht mit einer einfachen Zahl angegeben werden kann. Üblich ist es daher, α in Abhängigkeit von der Frequenz in Oktav- oder Terzmittelwerten anzugeben. Oktavwerte werden in 6 oder 7 Frequenzbändern von 125 Hz bis 4 bzw. 8 kHz angegeben. Terzwerte in 21 Bändern von 100 Hz bis 10 kHz.

4.5 Diffuse Streuung

Diejenigen Anteile einer Schallwelle, die auf eine Begrenzungsfläche treffen und nicht absorbiert werden, werden in den Raum zurück reflektiert. Die Art dieser Reflexion hängt stark von der Form und Struktur der Fläche ab. Beides muss wieder im Zusammenhang mit der Wellenlänge des auftreffenden Schalls gesehen werden. Abbildung 44 zeigt drei grundsätzlich zu unterscheidende Fälle.

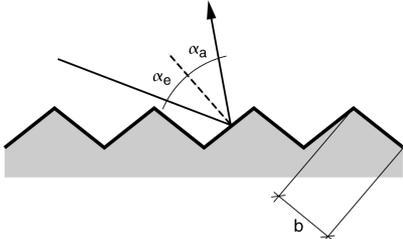
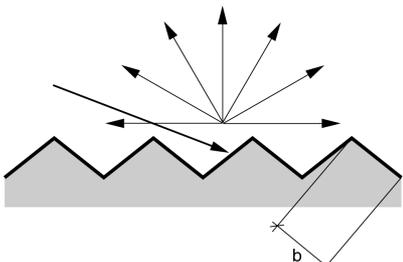
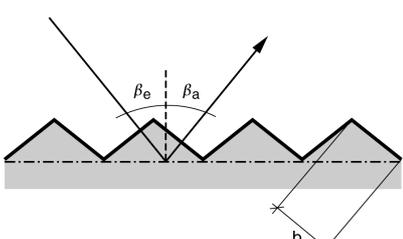
<p>Spiegelnde Reflexion: $b > \lambda$; $\alpha_e = \alpha_a$</p> 	<p>$\lambda < b$ Die Wellenlänge ist deutlich kleiner als die Abmessungen der einzelnen Teilflächen. Jede Teilfläche reflektiert für sich betrachtet die einfallende Schallwelle nach den Gesetzen der geometrischen Reflexion mit Einfallswinkel α_e = Ausfallswinkel α_a</p>
<p>Diffuse Reflexion: $b = \lambda$</p> 	<p>$\lambda \approx b$ Die Wellenlänge ist vergleichbar den Abmessungen der einzelnen Teilflächen. Die Wand streut in diesem Fall den Schall diffus in mehr oder weniger zufällig verteilte Richtungen. Voraussetzung ist eine hinreichende Ausdehnung der strukturierten Fläche und eine möglichst zufällig angeordnete Feinstruktur.</p>
<p>Spiegelnde Reflexion: $b < \lambda$; $\beta_e = \beta_a$</p> 	<p>$\lambda > b$ Die Wellenlänge ist deutlich größer als die Abmessungen der einzelnen Teilflächen. Die Wand reflektiert als Ganzes mit ihrer Grundfläche die einfallende Schallwelle nach den Gesetzen der geometrischen Reflexion mit Einfallswinkel β_e = Ausfallswinkel β_a</p>

Abbildung 44 Streuung und Reflexion in Abhängigkeit von der Strukturgröße und der Wellenlänge [aus 5]

In der Praxis hat man es meist mit einer Mischung aus allen drei vorab genannten Fällen zu tun. Diffus streuende Flächen werden gerne dort eingesetzt, wo einzelne harte Reflexionen vermieden werden sollen aber auch keine Absorber gewünscht sind. Spezielle Profile können hier aus Holz oder auch in Beton gegossen, Wandstrukturen bilden, die mit unterschiedlichen Profiltiefen in einem recht weiten Frequenzbereich diffus streuen. Zur Anwendung an der Decke können sogenannte Diffusionssegel genutzt werden.

Ein typischer Anwendungsfall sind Rückwände von Tonstudios oder Konzertsälen, wo man eine harte Reflexion an einer glatten Wand in jedem Fall vermeiden möchte und mit den Diffusoren gezielt eine Streuung hervorruft. Unauffällig in die Dekoration des Raumes integriert findet man in alten Konzertsälen oft reichhaltige unterschiedlich stark strukturierte Verzierungen, die ein angenehm räumlich diffuses Klangbild erzeugen und dem Zuhörer den Eindruck vermitteln, in die Musik eingehüllt zu werden.

Manches Beispiel moderner Architektur mit vielen glatt in Beton gegossenen Wänden und ausgedehnten Glasflächen ist dagegen akustisch sehr problematisch, da es weder diffus streuende noch absorbierende Flächen gibt. Die Folgen sind ein langer Nachhall, mögliche Echos und eine schlechte Sprachverständlichkeit. Auch mit den Hilfsmitteln der modernen Elektroakustik sind diese Probleme im Widerspruch zu einer weitläufigen Meinung oftmals kaum in den Griff zu bekommen. Raumakustische Maßnahmen sollten daher bei jeder Planung von vornherein mit in Betracht gezogen und auf die mögliche Nutzung der Räumlichkeit abgestimmt werden.

4.6 Beugung

Die Beugung von Schallwellen um ein Hindernis herum ist ein aus dem täglichen Leben geläufiger Umstand. Auch hinter einer Lärmschutzwand hört man die Verkehrsgeräusche von der anderen Seite und das sogar, wenn man sich im direkten Schattenbereich der Wand aufhält.

Das Prinzip der Beugung in vergleichbarer Form ist auch von der Wellenausbreitung auf der Wasseroberfläche bekannt. Ein kleines Hindernis (z.B. ein aus dem Wasser ragender Holzpfahl) wird von der Welle umgangen und stört oder verändert das Wellenfeld kaum. Ein großes Hindernis (z.B. ein im Wasser schwimmender Baumstamm) verursacht in Ausbreitungsrichtung eine ausgedehnte Schattenfläche (Abschattung) und zusätzliche kleine Turbulenzen an seinen Kanten.

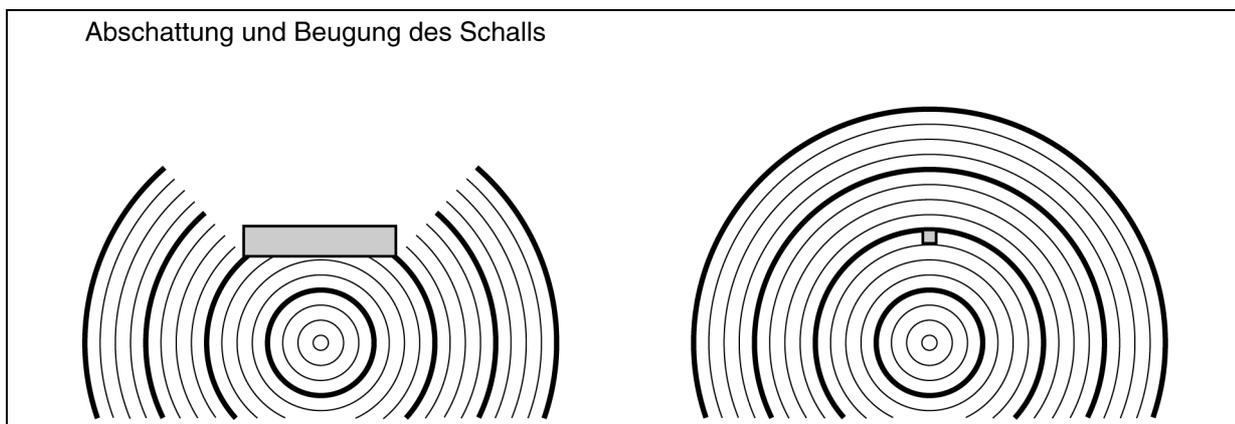


Abbildung 45 Abschattung und Beugung des Schalls in Abhängigkeit vom Verhältnis der Größe des Hindernisses zur Wellenlänge des Schalls [aus 3]

Genau so verhält es sich auch mit der Ausbreitung von Schallwellen abhängig von der Wellenlänge und der Größe des Hindernisses. Tiefe Frequenzen beugen sich um die Hindernisse herum und werden so auch von einer Schutzwand nicht abgehalten. Mittlere und hohe Frequenzen werden

dagegen wirksam abgeschattet, wenn ihre Wellenlänge klein gegenüber den Abmessungen des Hindernisses ist.

Vergleichbar den Turbulenzen an den Kanten des Baumstammes im Wasser, kommt es auch bei Schallwellen zur Kantenbeugung in Kombination mit diffuser Kantenstreuung. Je schärfer die Kante ausgeführt ist, desto mehr entstehen sogenannte Phantomquellen an ihr, die den Schall auch bei hohen Frequenzen gestreut hinter das Hindernis abstrahlen. Großzügig abgerundete Formen sind daher unter diesem Aspekt scharfen Kanten zu bevorzugen. Ein ähnlicher Effekt tritt an den Kanten von Lautsprechergehäusen auf, die aus diesem Grunde immer möglichst weit abgerundet ausfallen sollten.

*Der Schall beugt sich um Hindernisse herum, die klein gegenüber der Wellenlänge sind.
Ist das Hindernis groß in Relation zur Wellenlänge, so entsteht eine Abschattung in
Ausbreitungsrichtung.*

4.7 Gewölbte Flächen

Konkav gewölbte Flächen können Schall streuen oder bündeln. Konvex gewölbte Flächen streuen dagegen ausschließlich. Beide Eigenschaften kann man sich in der Raumakustik zu Nutze machen, in dem z.B. konvexe Flächen zur Zerstreung von Reflexionen eingesetzt werden. Konkav gewölbte Flächen können zur gezielten Unterstützung der Schallausbreitung in bestimmte Richtungen eingesetzt werden.

Auf der anderen Seite beherbergen konkav gekrümmte Flächen die Gefahr eines unerwünschten Focuspunktes im Raum, der zu extremen Echos, irritierenden Richtungseindrücken und zu schwerwiegenden Rückkopplungsproblemen beim Betrieb von Beschallungsanlagen führen kann. Besonders gefährlich sind schallharte konkave Flächen (z.B. aus Glas).

Die Impulsantwort Nr.5 (RIA 5) in Abbildung 39 verdeutlicht an einem Extrembeispiel die möglichen Folgen einer fokussierende Fläche. In diesem Fall ist ein riesiges Tor einer Werkshalle in der Form einer Viertelkugel mit ca. 100m Radius ausgeführt.

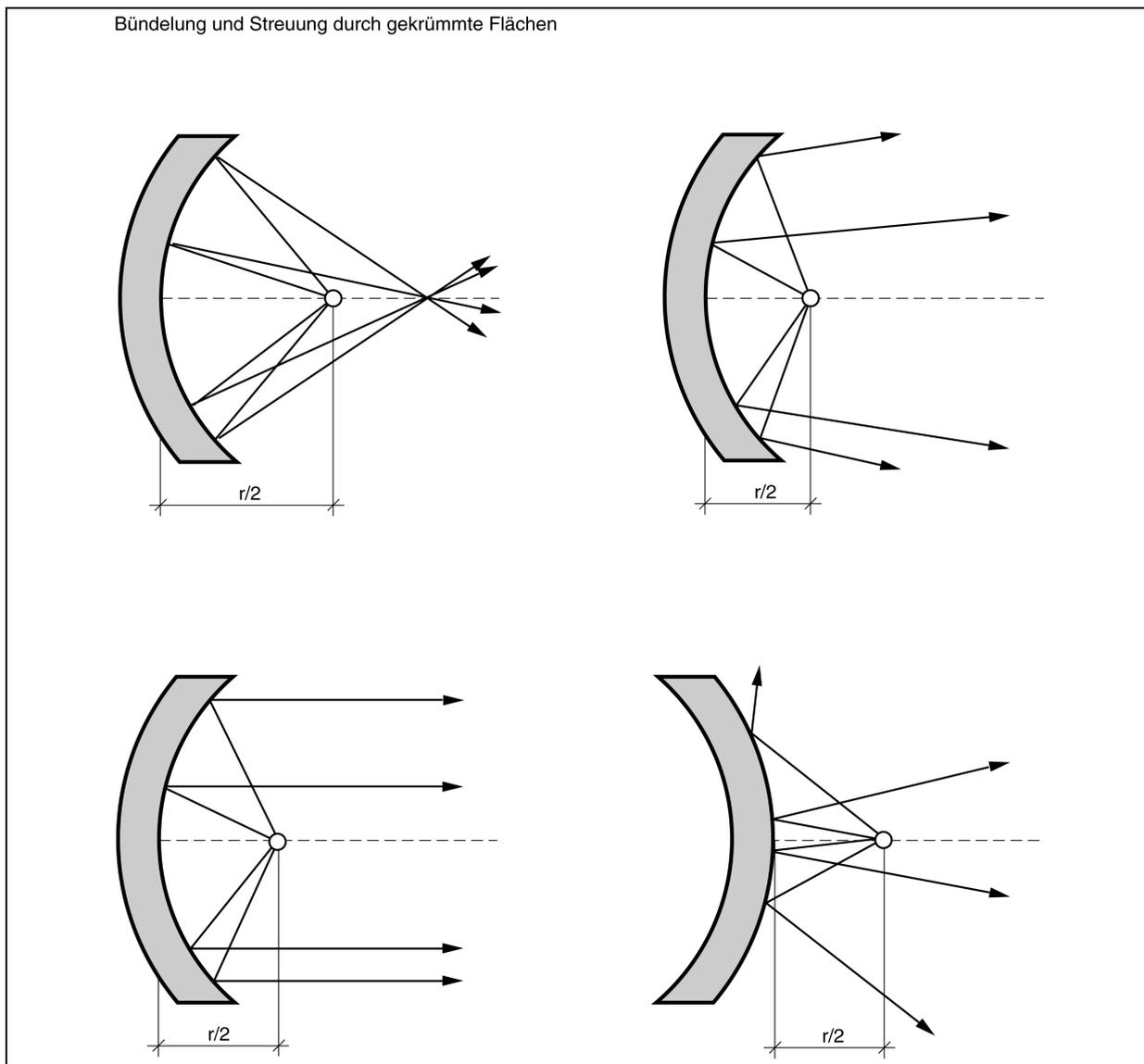


Abbildung 46 Schallbündelung und Streuung an konkav und konvex gekrümmten Flächen [aus 3]

4.8 Brechung

Mit der Brechung oder Ablenkung von Schall in Medien unterschiedlicher Eigenschaft soll sich noch ein letzter Absatz zu allgemeinen Phänomenen der Akustik befassen. Brechung entsteht beim Übergang von einem Medium mit einer bestimmten Schallgeschwindigkeit in ein anderes Medium mit einer anderen Schallgeschwindigkeit. An der Grenzfläche ändert sich die Ausbreitungsrichtung des Schalls nach dem Brechungsgesetz:

$$c_1 \sin \varphi_2 = c_s \sin \varphi_1 \quad \varphi_1 \text{ und } \varphi_2 \text{ sind die Winkel zwischen der jeweiligen Ausbreitungsrichtung und der Flächennormalen auf der Grenzflächen.} \quad \text{Gleichung 4-3}$$

Auch ohne Grenzfläche zwischen zwei Medien kann es durch Änderungen der Schallgeschwindigkeit in ein und dem selben Medium zur Ablenkung von Schall kommen. Bei einer Schallausbreitung im Freien sind zwei bekannte Effekte zu beobachten:

Beispiel 1: Die Windgeschwindigkeit nimmt nach oben hin zu (Verlangsamung in Bodennähe durch Bebauung, Wald etc.) und überlagert sich der Schallgeschwindigkeit. In Windrichtung wird der Schall zur Erde zurück gekrümmt. Gegen die Windrichtung entsteht eine Schattenzone, wo der Schall von der Erde wegkrümmt wird.

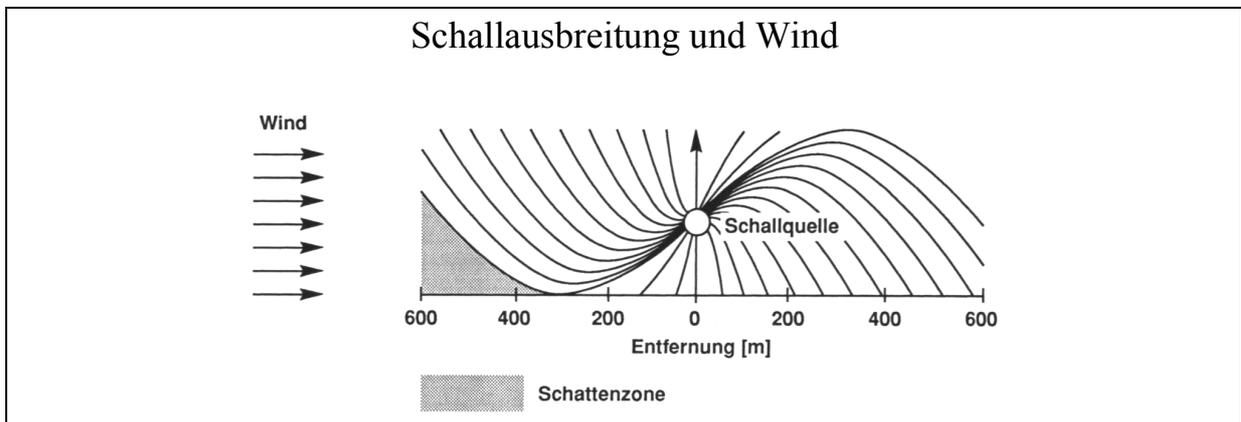


Abbildung 47 Auswirkung von Wind auf die Schallausbreitung [aus 5]

Beispiel 2: Die Lufttemperatur nimmt nach oben hin zu (Inversion). Schräg nach oben verlaufende Schallstrahlen werden dann zur Erde zurück gebeugt, und Schallereignisse werden weithin hörbar. Eine Inversion der Lufttemperatur tritt vor allem bei klarer windarmer Witterung abends und nachts auf, wenn die bodennahen Luftschichten abkühlen.

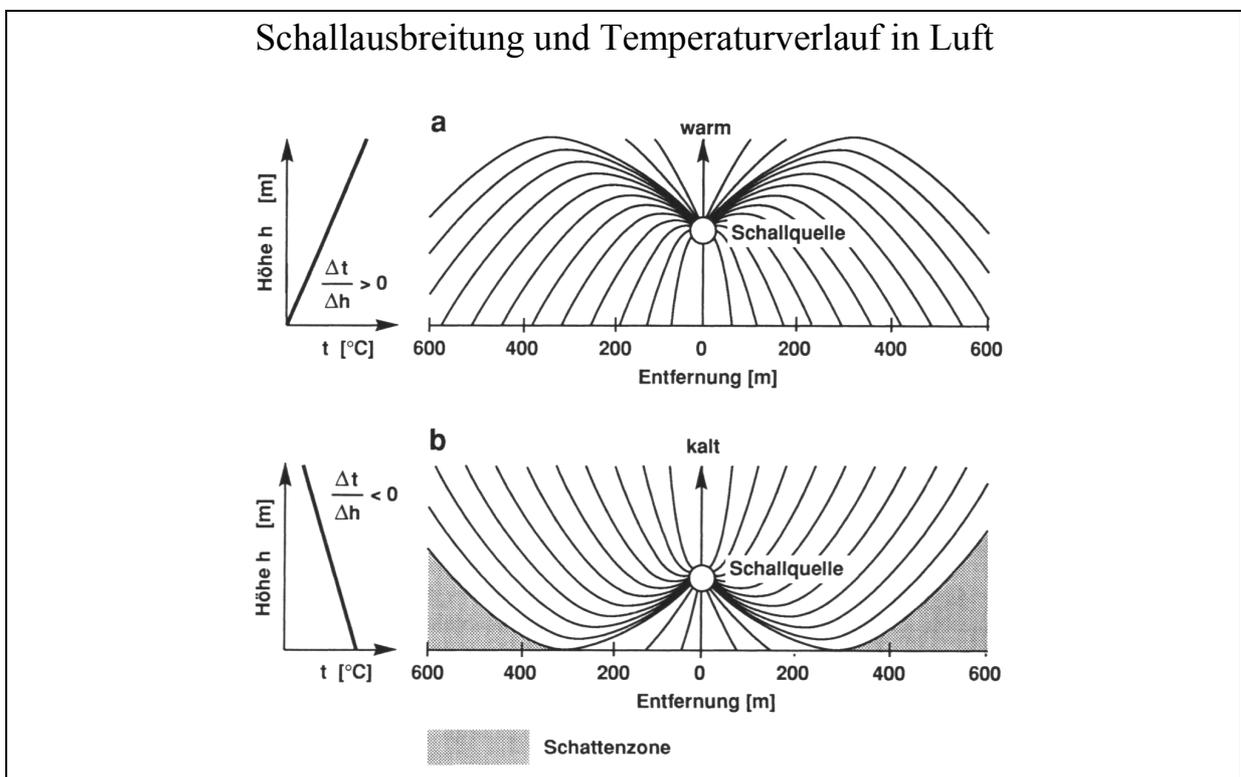


Abbildung 48 Auswirkungen von Luftschichten unterschiedlicher Temperatur auf die Schallausbreitung [aus 5]

5 Messtechnischen Größen in der Raumakustik

Die meisten raumakustischen Auswertungen beziehen sich auf den Nachhallverlauf. Der Nachhall eines Schallereignisses entsteht immer dann, wenn in der Umgebung von Sender und Empfänger Reflexionen auftreten. Keine Reflexionen gibt es lediglich in Messräumen und im Freifeld. Selbst im Freien bleibt jedoch im Normalfall die Bodenreflexion. Ein Nachhall entsteht natürlich nicht nur in Räumen sondern auch auf Freigeländen, wo die Reflexionen durch umstehende Gebäude etc. entstehen können.

Im Nachhallverlauf unterscheidet man den Direktschall, die ersten frühen Reflexionen und den eigentlichen Nachhallverlauf mit einem abklingenden und zunehmend dichter werdenden Verlauf von Reflexionen.

Im eigentlichen Nachhallbereich ist grundsätzlich ein möglichst gleichmäßig fallender Verlauf von Vorteil. Späte herausragende Spitzen deuten auf unschöne Echos hin. Ebenso sind Unstetigkeiten im Verlauf, z.B. durch fokussierende Flächen, gekoppelte Räume oder sehr ungleichmäßig verteilte Absorberflächen zu vermeiden.

Mit den sog. raumakustischen Parametern versucht man eine gewisse Bewertung durch messtechnische Größen, die aus dem Nachhallverlauf gewonnen werden.

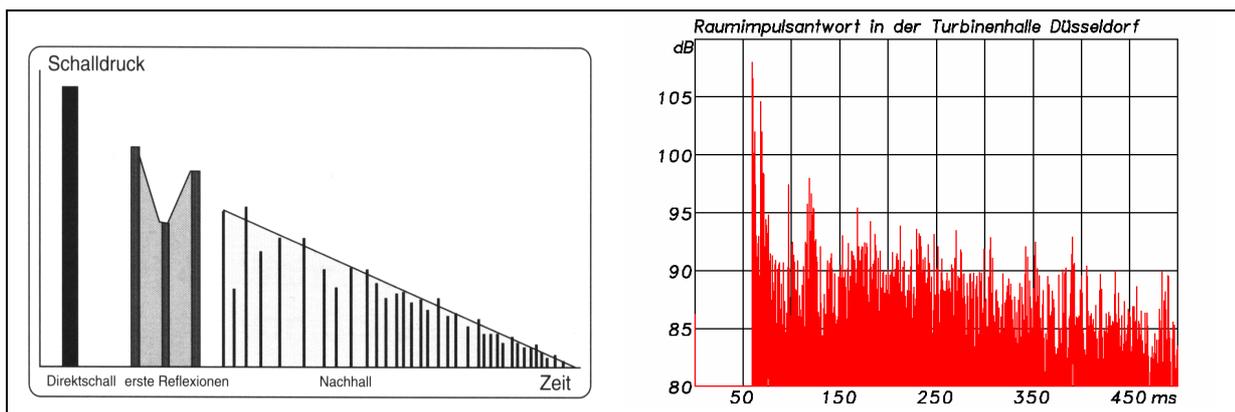


Abbildung 49 links: Schematische Darstellung von Direktschall, frühen Reflexionen und Nachhall
rechts: Gemessene Raumimpulsantwort in logarithmischer Darstellung

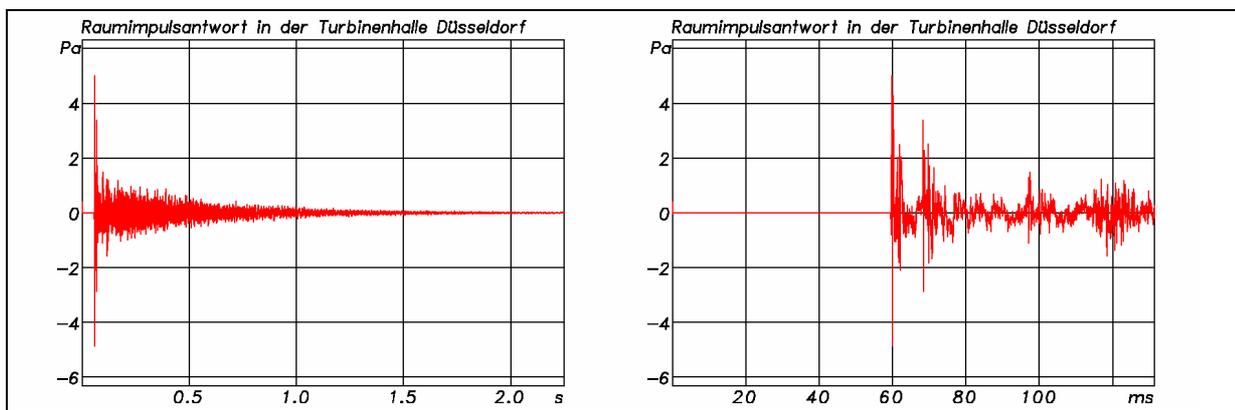


Abbildung 50 links: Raumimpulsantwort in kompletter Darstellung
rechts: Vergrößerter Anfang der Raumimpulsantwort mit Direktschall und einer recht kräftigen frühen Reflexion von der Seitenwand sowie einigen späteren stärkeren Reflexionen von der Decke und anderen Wänden

5.1 Die Nachhallzeit

Eine der wichtigsten Größen in der Raumakustik ist die Nachhallzeit. Definiert ist die Nachhallzeit T als die Zeit, nach der der Schalldruck im Raum nach Beenden einer Schallabstrahlung auf den tausendsten Teil (-60 dB) abgefallen ist. Eine Meßmethode besteht darin, ein breitbandiges oder bandbegrenztetes Rauschen in einem Raum abzuspielen und nach dem Abschalten der Quelle mit einem Pegelschreiber das Abklingverhalten aufzuzeichnen. Die Nachhallzeit ist dann dort abzulesen, wo der Schalldruckpegel um 60 dB gegenüber dem Wert bei noch eingeschalteter Rauschquelle abgeklungen ist. Eine Messung mit bandbegrenztem Rauschen (z.B. für Oktavbänder) führt zu einer frequenzselektiven Bewertung, so dass die Nachhallzeit anschließend für einzelne Frequenzbänder angegeben werden kann.

Da das Abklingverhalten eines Raumes vollständig über die Impulsantwort des Raumes beschrieben wird, kann die Berechnung der Nachhallzeit auch durch Auswertung der selbigen erfolgen. Als eine Reaktion des Raumes auf ein impulsförmiges Schallereignis wurde die Impulsantwort früher auch durch die Anregung des Raumes mit einem Pistolenschuss, durch einen platzenden Gasballon oder mit einer Knall-Latte aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. Moderne PC gestützte Messverfahren bedienen sich heute spezieller Rausch- oder Sweep-Signale, die über einen rundum abstrahlenden Lautsprecher wiedergegeben werden. Durch eine zeitliche Streckung der Signale und durch mehrfaches Mitteln können sehr zuverlässige Messergebnisse mit großen Störabständen gewonnen werden. Die einfachste Form jedoch, sich einen Eindruck von der Nachhallzeit eines Raumes zu verschaffen, ist das einmalige Klatschen mit den Händen, so dass man sich über das anschließende Abklingen des Schalls ein erstes Bild machen kann. Ebenso können mögliche Echos oder Fokuspunkte mit dieser simplen Methode oftmals schon aufgespürt werden.

Zurück zur Nachhallzeit, die bei einer raumakustischen Planung eine der wichtigen Größen ist. In der Planungsphase, wo mögliche Veränderungen noch nicht messtechnisch verifiziert werden können, kann die Nachhallzeit mit der Sabine'schen Nachhallformel aus dem Raumvolumen und der effektiven Absorberfläche berechnet werden.

$$\text{Sabine'sche Nachhallformel: } T = \left(0,163 \frac{s}{m} \right) \frac{V}{A} \quad \text{Gleichung 5-1}$$

mit V =Volumen in m^3 und A =absorbierende Fläche in m^2

Die effektive Absorberfläche errechnet sich aus der Summe aller Einzelflächen im Raum multipliziert mit ihrem jeweiligen Schallabsorptionsgrad. Eine $100m^2$ Fläche, die einen Schallabsorptionsgrad α von 0,3 hat, geht demnach mit $30m^2$ in die effektive Absorberfläche A der Sabine'schen Formel ein. Für handelsübliche Materialien des Innenausbau, für spezielle Absorber und auch für unterschiedlich dichtes Publikum kann man in Tabellen den Schallabsorptionsgrad für die 7 Oktavbänder von 125 Hz bis 8 kHz ablesen.

Absorptiongrad verschiedener Materialien

Material	Absorptionsgrad bei Frequenz (in Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Harte Flächen (Putz, Mauerwerk, harte Fußböden)	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Teppich in Schlingenwebart, 4,5 mm dick, imprägniert, direkt auf dem Boden	–	0,02	0,04	0,15	0,36	0,32
Satinvorhang 82 Rayl, 20 cm vor Wand, 1,5-fache Faltung	0,09	0,55	1,03	0,89	0,93	0,92
Gebundene Mineralfaserplatte 12 Rayl/cm, 30 mm dick	–	0,44	0,84	0,84	0,93	0,88
wie oben, mit 50 mm lichtem Abstand montiert	–	0,73	1,00	0,89	0,82	0,84
Mineralfaserplatte 20 Rayl/cm 50 mm dick, 50 mm lichter Wandabstand, sichtseitig mit 6 mm Sperrholz abgedeckt	0,40	0,53	0,29	0,18	0,11	0,11
Holz, 1,6 cm dick, auf 4 cm Holzlatten	0,18	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
18 mm Gipskartonplatte, 16 kg/m ² , 40 mm vor starrer Wand	0,10	0,09	0,05	0,05	0,07	0,04
wie oben, hinterlegt mit 30 mm Mineralfasermatte, 1,05 kg/m ²	0,18	0,10	0,08	0,07	0,10	0,10
Geschlossenes Doppelfenster	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Gipskartonlochplatte 19,6 % Lochflächenanteil, 15 mm Lochdurchmesser, 100 mm vor starrer Wand, hinterlegt mit Faservlies 12 Rayl, Mineralfasermatte 1,05 kg/m ²	0,30	0,69	1,01	0,81	0,66	0,62
Metallpaneele, 0,5 mm Alublech, 85 mm breit, 15 mm freie Schlitzbreite zwischen Paneelen, 164 mm Abstand vor starrer Wand, hinterlegt mit 20 mm Mineralfaserplatte 2,5 kg/m ²	0,30	0,69	1,01	0,81	0,66	0,62

Abbildung 51 Tabellen aus der Fachliteratur mit Absorptionsgraden in Oktavbändern für einige Materialien [aus 7]

Absorptiongrad von Publikum

Material	Absorptionsgrad bei Frequenz (in Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	6000
Publikum auf Holzstühlen 2 Personen pro m	0,24	0,40	0,78	0,98	0,96	0,87	0,80
Publikum auf Holzstühlen 1 Person pro m	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78	0,75
Publikum auf mäßig gepol- stertem Gestühl 0,85 m x 0,63 m	0,72	0,82	0,91	0,93	0,94	0,87	0,77
Publikum auf mäßig gepol- stertem Gestühl 0,90 m x 0,55 m	0,55	0,86	0,83	0,87	0,90	0,87	0,80
Mäßig gepolstertes, unbe- setztes Gestühl	0,44	0,56	0,67	0,74	0,83	0,87	0,80
dicht sitzendes Publikum, Orchester und Chor unter Einbeziehung angrenzen-der Gänge bis zu einer Breite von 1 m	0,60	0,74	0,88	0,96	0,93	0,85	0,80
unbesetztes, "durch- schnittliches" mit Stoff bezo- genes, gut gepolstertes Ge- stühl (Sitze mit perforierten Unterseiten)	0,49	0,66	0,80	0,88	0,82	0,70	0,64

Abbildung 52 Tabellen aus der Fachliteratur mit Absorptionsgraden in Oktavbändern für Publikum [aus 7]

Es stellt sich nun die Frage, welche Auswirkungen der Nachhallverlauf z.B. auf Musikdarbietungen oder Sprachübertragung hat. Zunächst einmal muss man sich darüber im Klaren sein, dass der Nachhall zu jedem Schallereignis entsteht, ebenso wie der Nachhall zusammen mit dem auslösenden Schall lauter oder leiser wird. Genauso wirkt der Nachhall nicht nur am Ende eines Musikstückes sondern ständig, nur ist er dann nicht so ausgeprägt wahrzunehmen. Sprache und Musik werden durch den Nachhall in ihrem zeitlich Verlauf verschmiert oder verschmolzen. Perkussive Klänge werden in einem halligen Raum von einem ganzen Nachhallteppich eingehüllt und klingen so erheblich anders als in einem stark bedämpften Raum. Ähnliches gilt für Sprache, wo durch den Nachhall aufeinander folgende Laute verschmolzen und damit undeutlicher werden. Auf der anderen Seite unterstützt die Schallenergie des Nachhalls einen Sprecher und lässt ihn lauter erscheinen. Bei der Musikwiedergabe verschmelzen ebenfalls einzelne Klänge durch den Nachhall, was meist sogar erwünscht ist, so dass Räume für Musikdarbietungen mit akustischen Instrumenten längere Nachhallzeiten haben als z.B. Konferenzräume oder Plenarsäle.

Raumart und Nutzung	Günstige Nachhallzeit bei mittleren Frequenzen in s
Diskotheek, Musical, Techno	deutlich unter 1
Mehrzweckhalle	0,5 – 1,5
Hörsaal, Sitzungssaal	1
Schauspielhaus	1 – 1,4
Opernhaus	1,2 – 1,8
Konzertsaal	1,7 – 2,1
Kirche	größer 2

Tabelle 10 Räume und günstige Nachhallzeiten

Extremfälle finden sich an beiden Enden der Tabelle. Orgel- und Chormusik wird meist in Kirchen dargeboten, die mit ihrer langen Nachhallzeit gute Voraussetzungen für ein füllendes Klangbild der lang getragenen Klänge bieten. Genau das Gegenteil wünscht man sich bei elektronischer Musik, wo gerne ein präziser trockener Bass erzeugt wird, der durch den Nachhall völlig verschmiert zu einem unschönen Dröhnen würde. Ein weiterer Grund ist, dass man der elektronischen Klangerzeugung und Beeinflussung möglichst freie Hand lassen möchte, was durch langen Nachhall gestört würde. Bei Bedarf kann dieser dann auch auf elektronischem Wege erzeugt werden. Ähnliches gilt für Kinosäle, wo der Filmtone über die Surround Anordnung möglichst unbeeinflusst durch den Raum wiedergegeben werden soll. Für anspruchsvolle Kinos gibt es daher strenge Richtlinien für die raumakustische Ausstattung, so dass der Filmproduzent von weitgehend einheitlichen akustischen Randbedingungen in den Spielstätten ausgehen kann.

Die längsten Nachhallzeiten sind in Stadien und großen Hallen anzutreffen. Hier sind Größenordnungen von 5-20s an der Tagesordnung, die zu extremen Problemen bei der Sprachübertragung führen und daher sehr durchdachte elektroakustische Installationen erforderlich machen, wenn eine zufriedenstellende Sprachübertragung möglich gemacht werden soll.

Aus der Tabelle ist schon die Problematik sog. Mehrzweckhallen zu erkennen, die immer nur als Kompromiss oder aber mit wandelbarer Akustik gestaltet werden können. Besonders schwierig ist es, wenn ein Raum optimal für die Darbietung akustischer Musik sein soll, die einen gewissen Nachhall benötigt und auch für die heute gängige, elektronisch produzierte und verstärkte Musik geeignet sein soll. Bewegliche Wände mit einer stark absorbierenden und einer eher diffus streuenden Oberfläche sind hier eine gute aber auch sehr kostspielige Lösung, die sich meist nur anspruchsvolle Spielstätten leisten können.

Eine Lautsprecheranlage in einem Raum, die z.B. einem Sprecher zur Verstärkung dient, hat auf die eigentliche Größe der Nachhallzeit keinen Einfluss. Die Nachhallzeit ist eine raumspezifische Größe, die nicht von der Art der Schallquelle abhängig ist. Eine Lautsprecheranlage kann jedoch dazu beitragen, dass durch eine gezielte Ausrichtung des abgestrahlten Schalls der Direktschallanteil wesentlich erhöht und der Nachhall des Raumes weniger angeregt wird, im Vergleich zu einer ungerichteten Abstrahlung. Moderne Lautsprecher mit einem kontrollierten Abstrahlverhalten gestatten eine gezielte Beschallung des hoch absorbierenden Publikums, das so auch in halligen Räumen gut versorgt werden kann. Möglichst zu vermeiden ist dabei, dass die Lautsprecher auch andere stärker reflektierende Flächen anstrahlen. Für mittlere und hohe Frequenzen sind diese Ansprüche meist leicht zu erfüllen. Erst bei tiefen Frequenzen wird eine gerichtete Schallabstrahlung ohne ausgedehnte Lautsprecheranordnungen zum Problem.

In stark lärmbelasteten Räumen gilt es ebenfalls, die Nachhallzeit so gering wie möglich zu halten, da der Nachhall den Lärmpegel erhöht. Ein einfaches Beispiel aus dem Alltag sind hallige Räume moderner Gastronomie, die mit viel Glas, Marmor und Beton zwar nett anzusehen sind, auf der akustischen Seite jedoch zu einem hohen Lärmpegel durch Unterhaltung der Gäste, Küchengeräusche etc. führen, so dass eine gute Sprachverständlichkeit selbst bei direkt gegenüber sitzenden Personen kaum möglich ist. Das klassische Café mit schwerem Polstergestühl und reichhaltig plüschiger Einrichtung vermittelt dagegen zumindest akustisches Wohlbehagen und die Möglichkeit zu zivilisierter Unterhaltung.

5.2 Weitere raumakustische Parameter

Ein weiteres Kriterium bei der Auswertung der Raumimpulsantwort sind die frühen nützlichen Reflexionen. Diese wirken unterstützend zum Direktschall und werden vom Gehör dem Direktschall beaufschlagt. Bei Sprache wird als Grenzwert ca. 50ms nach dem Eintreffen des Direktschalls angesetzt.

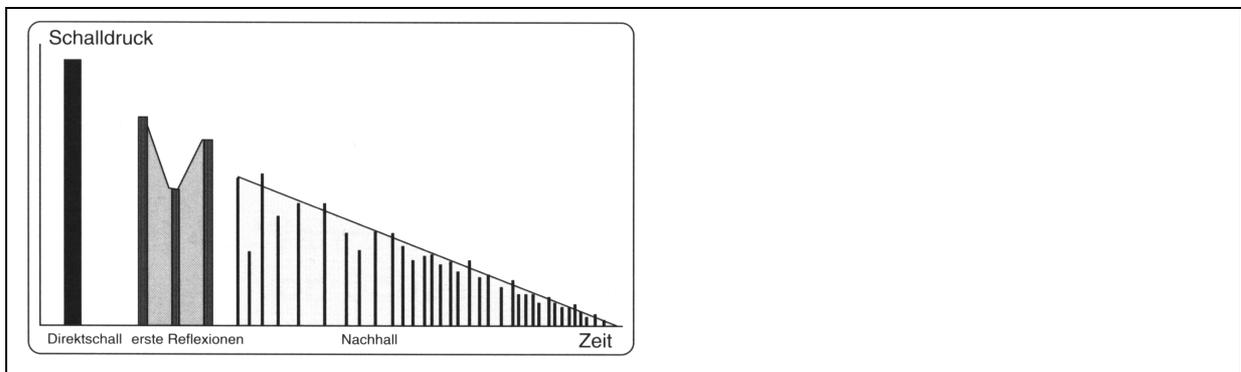


Abbildung 53 Schematische Darstellung von Direktschall, frühen Reflexionen und Nachhall in der Raumimpulsantwort

Als Messwert für die frühen Reflexionen wurde die Deutlichkeit (D oder D_{50}) eingeführt.

$$\text{Deutlichkeit: } D = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{Wert wird in \% angegeben}) \quad \text{Gleichung 5-2}$$

Die Deutlichkeit setzt die Energie des Direktschalls und der Reflexionen der ersten 50ms ins Verhältnis zur Gesamtenergie der Raumimpulsantwort. Für eine Deutlichkeit von 50% und mehr wird eine sehr gute Sprachverständlichkeit erzielt.

Vergleichbar der Deutlichkeit D bei Sprache gibt es für Musikwiedergabe das Klarheitsmaß (C oder C_{80}), das Reflexionen bis 80ms nach dem Direktschall berücksichtigt.

$$\text{Klarheitsmaß } C = 10 \lg \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{Wert in dB}) \quad \text{Gleichung 5-3}$$

Das Klarheitsmaß setzt die Energie des Direktschalls und der Reflexionen der ersten 80ms ins Verhältnis zur Energie der Raumimpulsantwort ab 80ms bis zum Ende. Der Wert wird in dB angegeben. Für Musikwiedergabe sind Werte zwischen -1 und +3dB empfehlenswert.

6 Raumakustische Modelle

Zur Planung von Neu- und Umbauten im akustischen Sinne bedient man sich verschiedener Hilfsmittel. Zu den einfachsten Verfahren gehören die zeichnerische Nachbildung der Schallausbreitung und einfache Nachhallberechnung. Zu früheren Zeiten ohne Mithilfe leistungsstarker Computer wurde immer dann, wenn eine hohe Planungssicherheit gefordert war auf die Modellmesstechnik zurückgegriffen.

6.1 Modellmesstechnik

Ihren Ursprung fanden die raumakustischen Simulationen in der Modellmesstechnik. Von den zu planenden Räumen wurden zunächst mehr oder weniger genaue Modelle in langwieriger Kleinarbeit erstellt, in denen dann mit Miniatursendern, Mikrofonen oder sogar Kunstköpfen Messungen in entsprechend zum Modellmaßstab hochtransformierten Frequenzbereichen gemacht wurden. Probleme entstehen bei diesem Verfahren vor allem durch Sender und Empfänger, die jetzt im Ultraschallbereich arbeiten müssen und dabei möglichst auch noch das gleiche Richtverhalten aufweisen sollen, wie es auch die späteren Originale haben. Für ein Modell im Maßstab 1:20 würden somit Lautsprecher oder, besser gesagt Ultraschallsender und Empfänger gesucht, die sich im Bereich von 2,5 kHz bis 160 kHz so verhalten, wie es die realen Quellen im Bereich von 125 Hz bis 8 kHz machen. Auch die Auswahl der Baumaterialien für das Modell bedarf einer sorgfältigen Auswahl, da ein möglichst ähnliches akustischen Verhalten im transformierten Frequenzbereich gefordert wird, wie es das reale Baumaterial im Hörbereich hat. Sorgfältige Arbeiten mit Modellen haben, wie man sich leicht vorstellen kann, durchaus Jahre in Anspruch genommen und stellten allerhöchste handwerkliche Ansprüche. Diese Modellbaumethode war somit nur den finanzstarken Großprojekten vorbehalten und führte zudem nicht immer zu befriedigenden Resultaten. Ein Vorteil der Modellmesstechnik gegenüber allen anderen Methoden ist in einer korrekten Nachbildung der Wellenausbreitung, also mit Beugungs- und Interferenzerscheinungen zu sehen.

Bereits in den 70er Jahren begann dann das Zeitalter der akustischen Simulationen mit Hilfe von Computern und Großrechnern.

6.2 Die Entwicklung der Computersimulation in der Raumakustik

Die folgende Auflistung gibt einen kleinen historischen Rückblick über die Entwicklung der Computersimulationen in der Raumakustik, ohne dabei einen Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben:

- 1970 CASSA von Philips erlaubt erste einfache Berechnungen für die Akustik auf einem HP41CX Rechner.
- 1981 CARLA von Philips ermöglicht auf einem PC die Berechnung von Nachhallzeiten und Sprachverständlichkeit.
- 1984 CADP von JBL berücksichtigt erstmals in einfacher Weise die Berechnung von Clustern.
- 1985 PETRA von ANT in Deutschland bietet die Clusterberechnung mit einer echten grafischen Darstellung.
- 1986 Bose kommt mit der ersten Version des eigenen Programms Modeler für Raumsimulationen auf den Markt.

- 1987 Von Altec Lansing erscheint Acousta CADD, das erste voll grafische Akustik CAD Programm unter DOS. Eine überarbeitete Version 2.0 erscheint 1992.
- 1990 Ahnert und Feistel stellen die Version 1.0 von EASE vor.
- 1991 CADP2 von JBL erscheint mit einer vollständig grafischen Oberfläche unter Windows 3.1.
- 1994 EASE wird in der Version 2.0 überarbeitet, bleibt aber weiterhin ein auf DOS basiertes Programm.
- 1998 Ulysses wird vom IFB auf der Musikmesse 98 vorgestellt. Mit einer Windows 95 Oberfläche stellt das Programm eine sehr offene und komfortable Plattform zur Berechnung von Beschallungsanlage und Clustern da.
- 1999 EASE 3.0 erscheint als vollständig überarbeitete Version für Windows 98.
- 2001 EASE 4.0 erscheint mit einem CAESAR Rechenkern, der an der im ITA der RWTH Aachen entwickelt wurde.

Diese Auflistung kann bei weitem nicht den Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Bedenkt man alleine die Vielzahl von Simulationsprogrammen aus dem Umfeld der Universitäten, so könnte die Aufzählung leicht vervielfacht werden. Kommerziell erfolgreich wurden von den oben gelisteten Programmen in jedem Fall Acousta-CADD, CADP2, EASE und der Modeler von Bose. Modeler ist dabei das einzige Programm auf einer Macintosh Hardware Plattform. Eine weitere Einschränkung ist auch bis heute die ausschließliche Anwendung auf Bose Lautsprecher. Systeme anderer Hersteller sind in den Bibliotheken des Programms leider nicht möglich. CADP2 und EASE fassten sich dagegen von jeher als unabhängige Planungswerkzeuge auf, die nicht ausschließlich dem Support eines speziellen Produktes dienen. Weitgehend offen gestalten sich daher bei diesen Programmen die Erweiterungsmöglichkeiten der Lautsprecher- und Materialdateien.

6.3 PC Simulation mit Spiegelquellen und Strahlenverfolgung

Die einzig wirklich exakte Beschreibung der Schallausbreitung ist über die wellentheoretische Betrachtung unter Beachtung aller Randbedingungen möglich. Randbedingungen sind dabei die auf den Raumbegrenzungen erzwungenen Zustände, z.B. ein Schalldruckmaximum auf einer schallharten Wand. Eine analytische oder auch nur numerische Lösung der Wellengleichung ist aber nur für sehr einfache Fälle, z.B. ein Quaderzimmer, überhaupt praktikabel. Anwendungen in der Forschung finden sich zur Zeit mit der Finite- Elemente-Methode (FEM) zur Untersuchung von Beugungseffekten bei tiefen Frequenzen.

Für diejenigen Frequenzbereiche, bei denen die Raumabmessungen als groß gegenüber der Wellenlänge betrachtet werden können, bietet die einfachere Modellvorstellung der geometrischen Akustik die effektivste Möglichkeit einer Berechnung des Schallfeldes. Die Schallausbreitung wird hier auf Spiegelquellen bzw. Strahlengänge beschränkt, deren Position bzw. Verlauf nach geometrischen Gesetzen verfolgt werden kann.

Bei der Strahlenverfolgung kann eine Schallquelle anschaulich als Sender von Schallteilchen betrachtet werden, deren richtungsabhängige Dichte das Richtverhalten der Quelle beschreibt. Die Schallteilchen gelangen dann auf direktem Wege (Direktschall) oder über eine oder mehrere Wandreflexionen zum Empfänger. Abhängig von der Beschaffenheit des Wandmaterials und der Frequenz, werden die Schallteilchen bei der Reflexion mehr oder weniger stark absorbiert. Die Reflexion kann rein geometrischen Charakter haben oder auch diffus streuend sein. Soll nun für

einen gegebenen räumlichen Bereich die Schallfeldverteilung berechnet werden, so ist diese gleich der Bestrahlungsdichte durch die Schallteilchen. Wandabsorption und Luftdämpfung können in diesem Modell durch eine frequenzabhängige Verminderung der Schallteilchenenergie bedacht werden.

Ulysses und EASE verwenden die beiden Verfahren der geometrischen Akustik mit Spiegelquellen bzw. Strahlenverfolgung in Kombination. Für das Spiegelquellenverfahren ist jede Quelle im ersten Durchlauf an jeder, von ihrer Position aus sichtbaren Begrenzungsfläche zu spiegeln, um alle Reflexionen erster Ordnung zu erfassen. Im zweiten Durchlauf für die Reflexionen zweiter Ordnung sind nun all diese Spiegelquellen ihrerseits wieder an allen für sie sichtbaren Begrenzungsflächen zu spiegeln, womit die Anzahl der Quellen exponentiell ansteigt. Für einen Beispielraum mit 36 Wandflächen (Anzahl W) und 4 Quellen (Anzahl Q) sind somit für den Direktschall 4 Quellen, für die Reflexionen 1.Ordnung 144 Quellen, für die Reflexionen 2.Ordnung schon 5184 Quellen zu berücksichtigen, womit sich leicht erkennen lässt, dass der Rechenaufwand sehr schnell unermessliche Formen annehmen kann. Für die n -te Ordnung lässt sich die Anzahl der Rechenoperationen damit zu

$$\text{Summe} = Q \times \sum_{m=0}^{m=n} W^m = Q \times (1 + W + W^2 + W^3 + \dots) \quad \text{Gleichung 6-1}$$

berechnen.

Das Verfahren der Strahlenverfolgung verhält sich hier weniger kritisch, wo der Rechenaufwand nur linear mit der Ordnung wächst.

Für den Fall, dass von der Quelle die Schallstrahlen im 1° Grad Raster ausgesandt werden, starten ca. 65000 Strahlen (Anzahl S) pro Quelle, die über eine bestimmte Anzahl Reflexionen bis zum gewünschten Ordnungsgrad verfolgt werden.

Für die n -te Ordnung ist jetzt die Anzahl der Rechenoperationen mit

$$\text{Summe} = Q \times W \times S \times n \quad \text{Gleichung 6-2}$$

zu berechnen. Bezüglich des Rechenaufwandes bietet die Strahlenverfolgung so schon bei recht geringen Ordnungen deutliche Vorteile bezüglich des Rechenaufwandes, der allerdings mit dem Nachteil einer geringeren Genauigkeit erkaufte werden muss, da die Schallstrahlen nicht unendlich dicht sind und unter Umständen daher auch nicht alle Begrenzungsflächen treffen. Ulysses macht daher einen guten Kompromiss und berechnet die ersten und besonders wichtigen Reflexionen nach der 100% genauen Spiegelquellenmethode und die späteren Reflexionen mit der Strahlenverfolgung, beginnend mit der Ordnung, bei der die Strahlenverfolgung eine geringere Rechenleistung erfordert, als die Spiegelquellen. In einer Formel ausgedrückt heißt das, ab einer Ordnung n , für die gilt:

$$Q \times W \times S \times n \leq Q \times \sum_{m=0}^{m=n} W^m \quad \text{Gleichung 6-3}$$

wird die Strahlenverfolgung verwendet und für alle geringeren Ordnungen die Spiegelquellenmethode.

Die größten Schwachpunkte der heute bereits sehr komfortabel zu bedienenden und schnell zum Ergebnis führenden Simulationsprogramme dürften noch in der fehlenden Berücksichtigung der diffusen Streuung und der Beugung liegen.

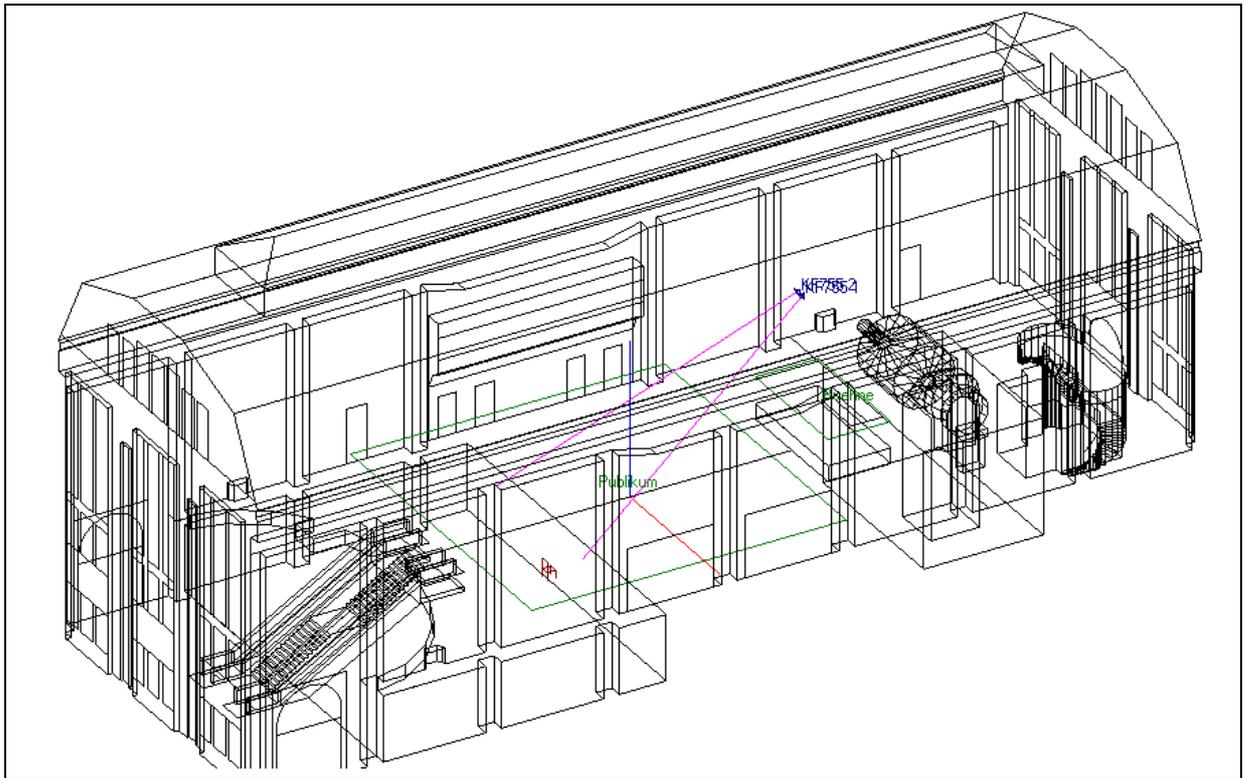


Abbildung 54 Drahtgittermodell einer großen Halle mit Lautsprechern, Publikumsfläche und Hörerplatz (Quelle EASE 3.0)

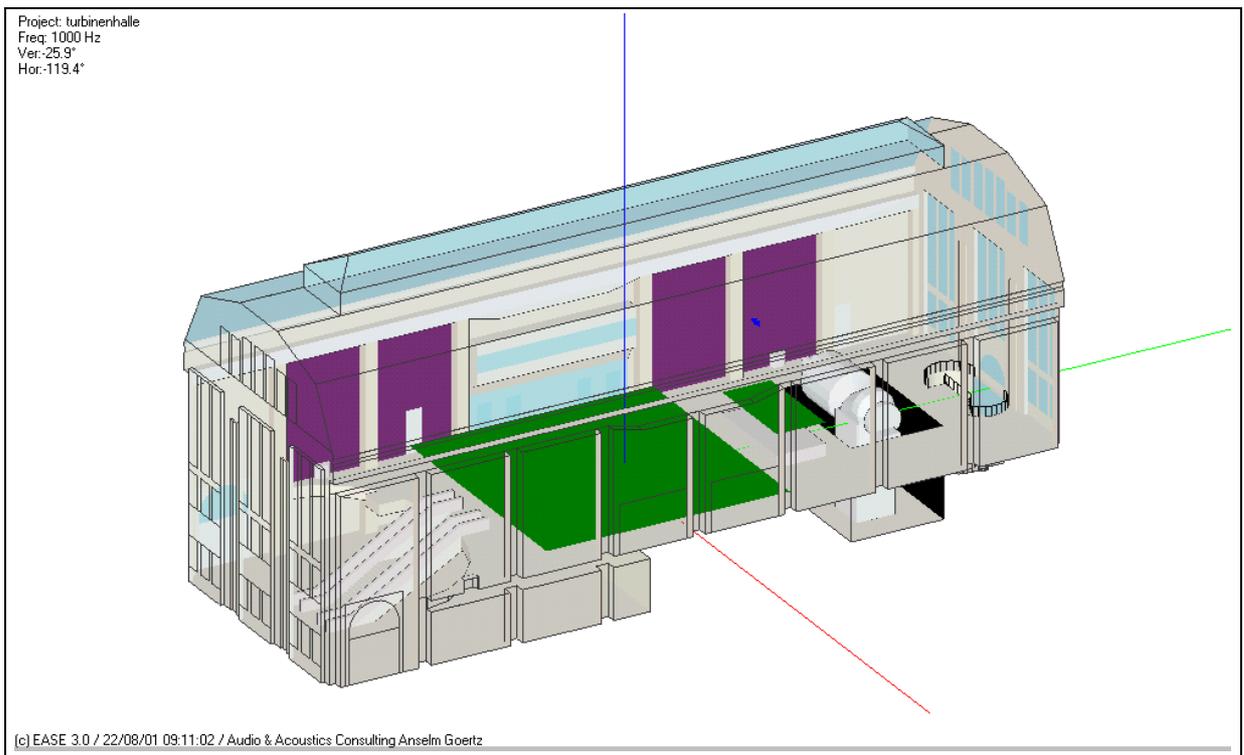


Abbildung 55 Modell mit farblicher Unterscheidung der Absorptionsgrade bei den Wandmaterialien (Quelle EASE 3.0)

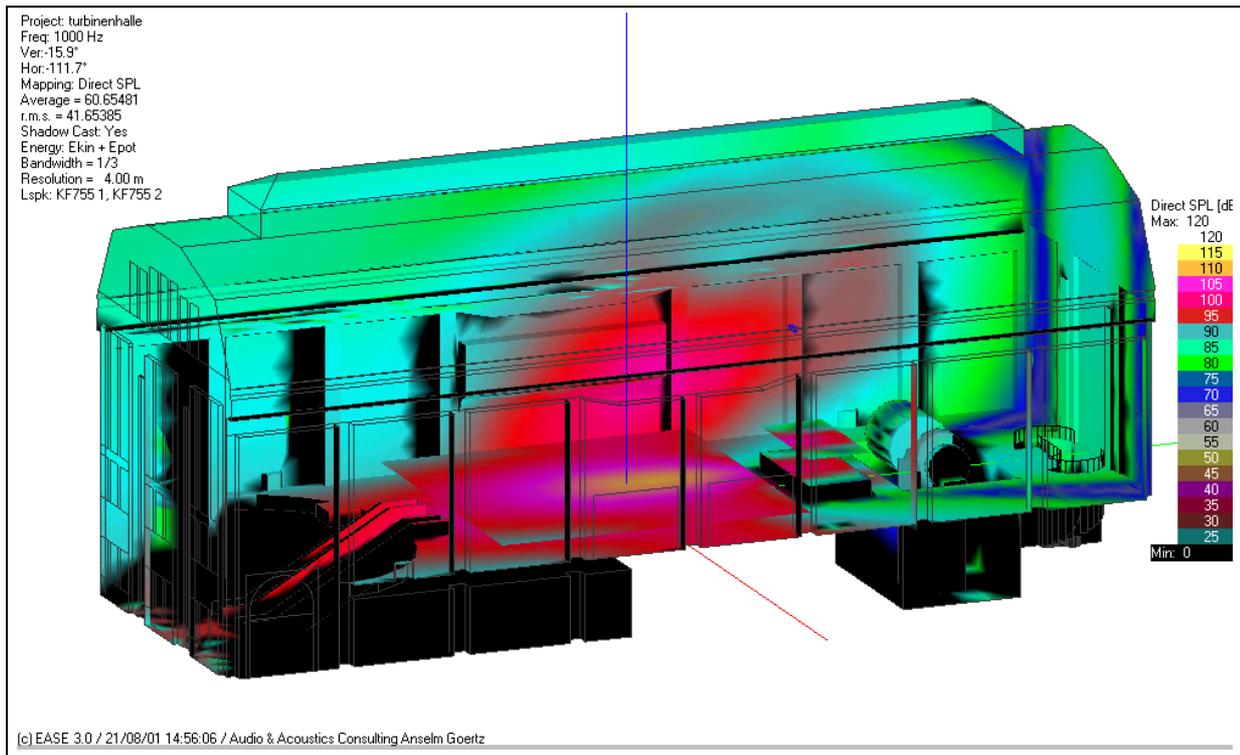


Abbildung 56 Berechnete Direktschallverteilung auf allen Begrenzungsflächen (Quelle EASE 3.0)

7 Literaturliste zum Thema

- 1 Moving Acoustics
Chalmers Vibroacoustic Group
Göteborg 1999

Bem.: Software mit anschaulichen Darstellungen zur Akustik und vielen Hörbeispielen [Englisch]

- 2 Schallmessung
Broschüre von Brüel & Kjær
Nærum 1984

Bem.: Kurze Broschüre des Messgeräte-Herstellers Brüel & Kjær zum Thema Schallmessungen

- 3 Das Tonstudio Handbuch
Hubert Henle
Carstensen Verlag
München 1993

Bem.: Sehr gutes Buch mit Grundlagen zur Akustik und anschließendem Schwerpunkt auf Tonstudioteknik

- 4 Technische Dokumentation
Lautsprechersystem V-DOSC
L-Acoustics ; Christian Heil

Bem.: Theoretische und praktische Überlegungen zum Einsatz von Line-Arrays in der Beschallungstechnik mit produktspezifischen Informationen zum V-DOSC System [Englisch]

- 5 Schallschutz + Raumakustik in der Praxis
W.Fasold , E.Veres
Verlag für Bauwesen
Berlin 1998

Bem.: Sehr gutes Buch mit Grundlagen zur Akustik und anschließendem Schwerpunkt auf Raum- und Bauakustik

- 6 Akustische Messtechnik
Vorlesungsumdruck an der RWTH Aachen
Michael Vorländer
Aachen 1997

Bem.: Vorlesungsskript mit vielen Grundlagen zur akustischen Messtechnik.

- 7 Raum- und Bauakustik
Vorlesungsumdruck an der RWTH Aachen
Michael Vorländer
Aachen 1997

Bem.: Vorlesungsskript mit vielen Grundlagen zur Raum- und Bauakustik. Sehr mathematisch abgefasst.