
HFU

Digitale Medien

Matthias Reusch

AUDIO TECHNIK

Skript

SoSe 2024

Literatur:

Die unterstrichenen Bücher vermitteln einen grundlegenden Einstieg

Albrecht, Carlos:	Der Tonmeister: Mikrofonierung akustischer Instrumente in der Popmusik, Schiele & Schoen, 2017
Gerhard Bore:	<u>Mikrophone, Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele, Georg Neumann GmbH Berlin,</u> 4.Auflage 1999
Dickreiter e.a.:	<u>Handbuch der Tonstudientechnik, Bd.I+ II, 8. Aufl. München 2013</u>
Dickreiter, Michael:	Mikrofon-Aufnahmetechnik, Stuttgart, 2003
Görne, Thomas:	<u>Tontechnik, Carl Hanser Fachbuch, München, 4. Auf. 2014</u>
Görne, Thomas:	Mikrofone in Theorie und Praxis, Elektor-Verlag, 2007
Katz, Bob	Mastering Audio, GC Carstensen Verlag 2012
Owsinski, Bobby	Mischen wie die Profis: Das Handbuch für Toningenieure, 2013 Mastern wie die Profis: Das Handbuch für Toningenieure, 2009 GC Carstensen Verlag
Pieper, Frank	<u>Das P.A. Handbuch. Praktische Einführung in die professionelle Beschallungstechnik.</u> GC Carstensen Verlag; 4.Aufl. 2011
Watkinson, John:	The Art of Digital Audio, Focal Press, 2004

Vorbemerkung:

Dieses Skript ist kein Lehrbuch und es ersetzt nicht den Besuch der Vorlesung. Es dient als Gedankenstütze und Foliensammlung. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Vorlesung sollte jeder nach seinem Bedarf notieren.

Anmerkungen und Vorschläge bitte an:

matthias.reusch@hfu.eu

Jeder Teilnehmer des Kurses, der dieses Skript benutzt, stimmt folgenden Regelungen zu:

Mir ist bewusst, dass die Kursunterlagen urheberrechtlich geschütztes Material enthalten.
Ich versichere, dass ich dieses Material nicht an unbeteiligte Dritte weitergeben werde.
Mir ist bewusst, dass ich bei Zuwiderhandlung für alle juristischen Folgen verantwortlich bin.

Einsatzgebiete der Audiotechnik:

Hörfunk

- Studio
- AÜ, Aussenübertragung
- Podcast, Livestream, Mediathek
- Interviews
- Werbung
- Moderation
- Nachrichten
- Hörspiel
- Sport

Fernsehen:

- Studio, Aktuell, Sport und Show
- AÜ, AussenÜbertragung, Aktuell, Sport und Show
- Schaltraum, Sendeabwicklung
- Aktuelle Berichterstattung

Theaterton

- Orchester
- Musical
- Zuspielungen

Studioproduktion Musik

- Aufnahme
- Mix
- Mastering

Liveproduktion Musik

- Beschallung Musik, Club und Arena
- Beschallung Industrie

Filmton

- Postpro, Foley
- Synchronisation ADR
- SFX
- Filmmusik
- Surround, THX, Auro3D, Dolby Atmos

Hörbücher

Games

Interaktive Medien

- Funktionales Sounddesign

Virtual Reality

- Binaurales Hören

Sounddesign für die Industrie

- Durchsagen
- Warnsignale
- Sprachsteuerung

Kommunikation

- Noise Cancelling

Schallwellen:

Saite schwingt, Grundfrequenz

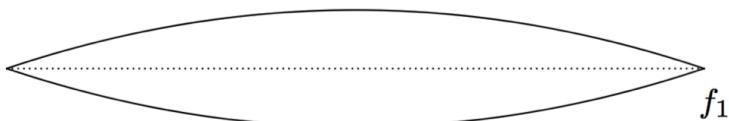
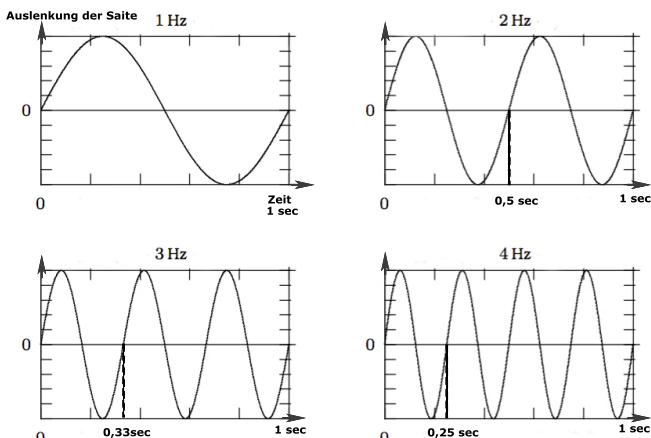
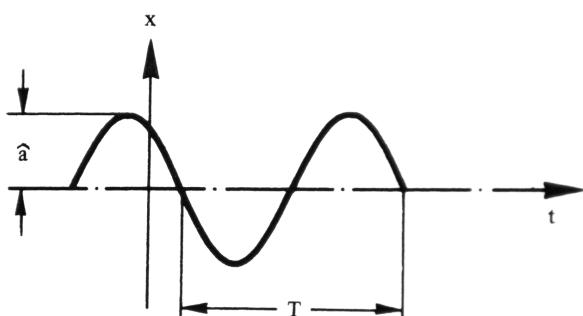
**Einführung Frequenz, Periodendauer, Amplitude:**

Abb. 1-4: Harmonische Schwingung für verschiedene Frequenzen
1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz

Frequenz f: Schwingungen pro Sekunde in Hertz, Hz oder 1000 Hz = Kilohertz, kHz

Periodendauer T: Dauer einer Schwingung in Sekunden, $T = 1/f$



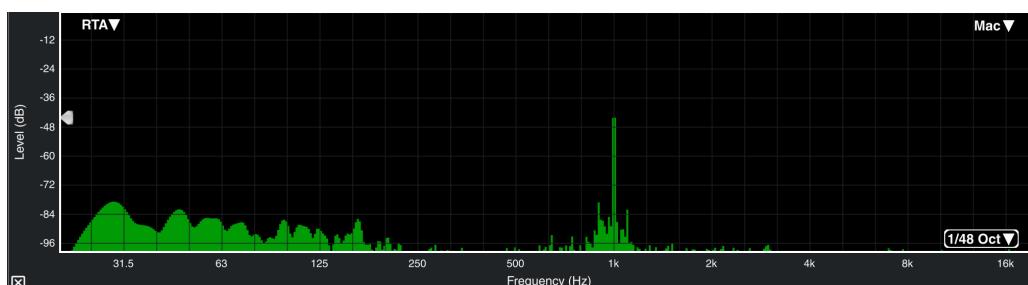
a = Amplitude, T = Periodendauer, t = Zeit, Amplitude entspricht Lautstärke

Hörbarer Bereich ca. 20 Hz-16 kHz (16 Kilohertz = 16.000 Hz)

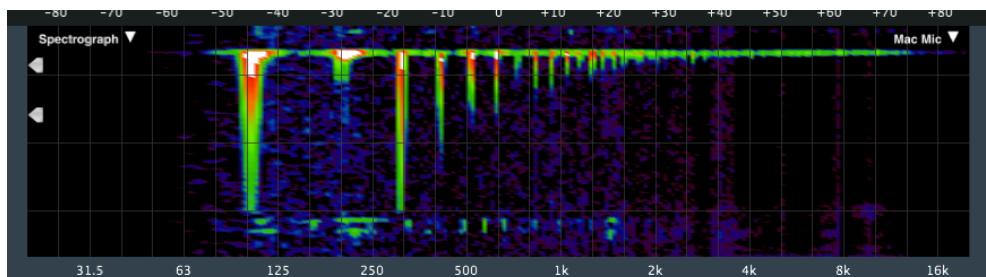
Infraschall, Ultraschall,

Beispiel Zeilenabtastfrequenz 25 frames * 625 Zeilen = 15.625 Hz

Darstellung Sinuston 1000 Hz auf Analyser im Messprogramm Smaart:



Obertonstruktur, Einschwingvorgang. Hier ein Gitarrenton, Darstellung im Spektrogramm:



Flagiolettöne, Obertöne:

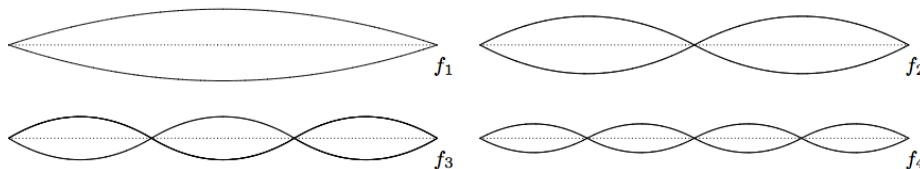


Abb. 1-22: Hüllkurven der Auslenkung einer Saite für die ersten vier Eigenfrequenzen

Alle **Obertöne** eines Tones sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz.

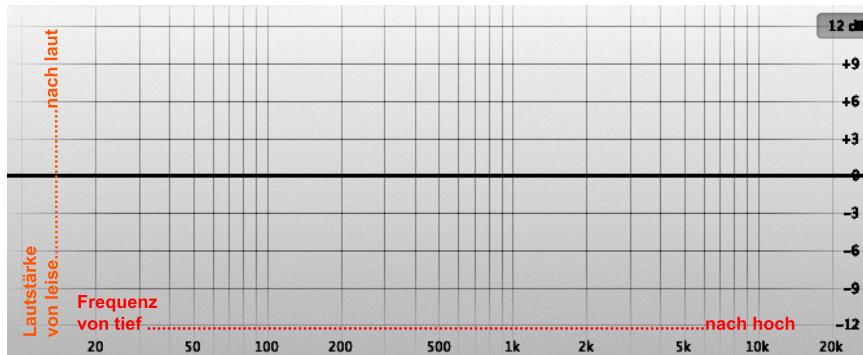
Verdoppelung Frequenz = Oktave

3:2, also 1,5 fache Frequenz: Quinte 4:3, also 1,33 entspricht Quarte Ende Stunde 1

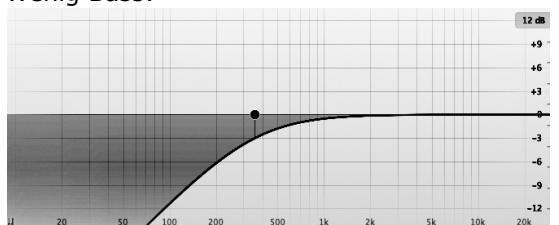
Frequenzgang:

Wie überträgt ein System die unterschiedlichen Frequenzen?

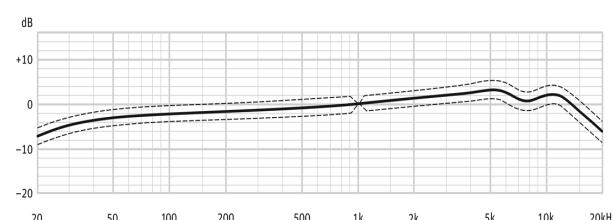
Idealer Frequenzgang -> Alle Frequenzen werden gleich laut übertragen:



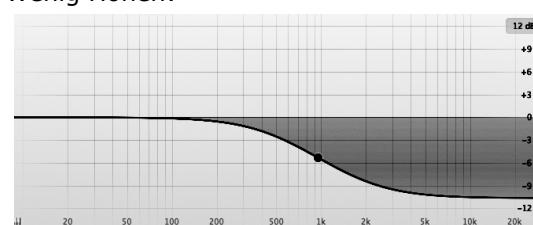
Wenig Bass:



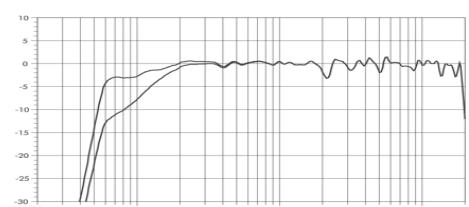
Typisches Mikrofon:



Wenig Höhen:



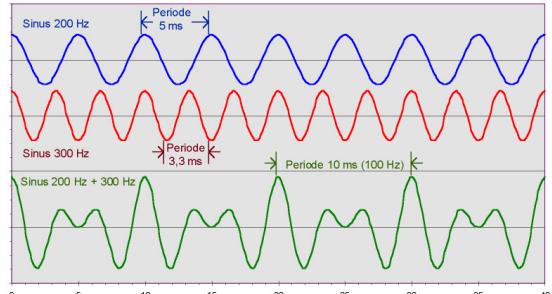
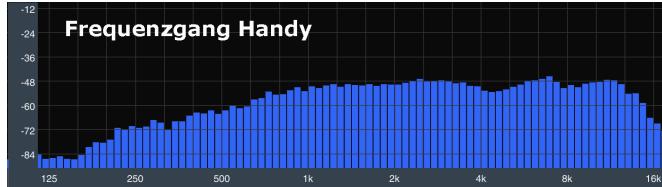
Typischer Lautsprecher:



Logarithmische Tonhöhenwahrnehmung, 10 Oktaven wahrnehmbar

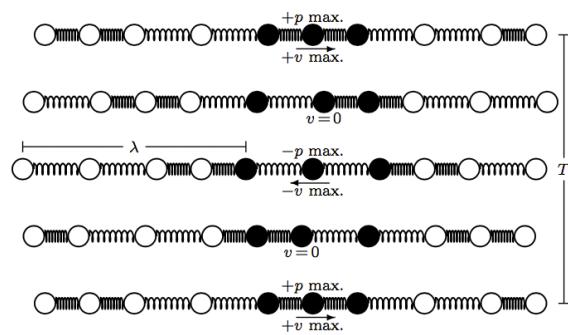
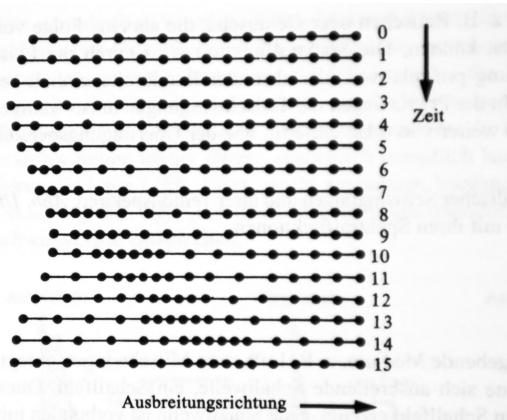
Echogrenze 50ms, 1/20tel s, entspricht 20 Impulsen pro Sekunde = 20Hz

Residualeffekt: 1. Ohr schliesst aus Obertonstruktur auf (fehlenden) Grundton (Psychoakustik).
2. Oberwellen addieren sich zur Grundwelle auf (Überlagerung von Wellen).



Schallausbreitung:

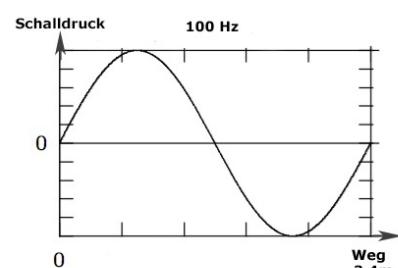
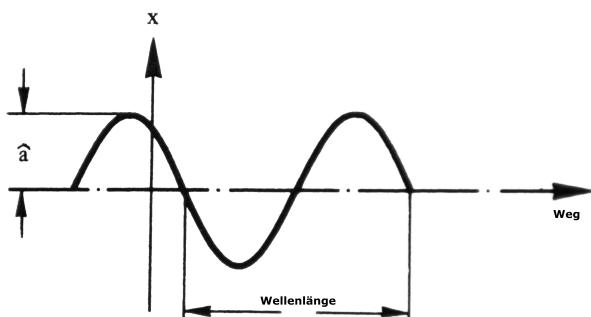
Wie gelangt Schall an unser Ohr? -> Sphärisch / kugelförmig.
Luftmoleküle bewegen sich um einen Ruhepunkt, keine wandernden Moleküle.



Schallgeschwindigkeit c in Luft ist für alle Frequenzen gleich und nur temperaturabhängig.

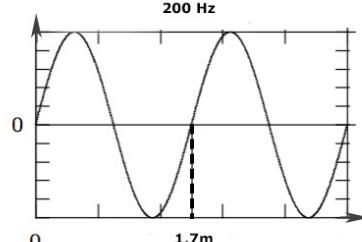
c bei 0 Grad: 331,5 m/s
 c bei 20 Grad: 343 m/s

Wellenlänge λ :



Die Wellenlänge ist der Abstand zwischen den Wellenbergen.
Je höher die Frequenz, desto kürzer die Wellenlänge.

$$c = \lambda * f$$

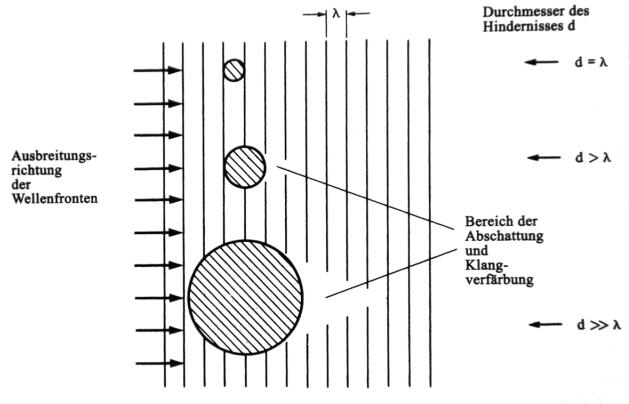


Frequenz und Wellenlänge in Luft.

Frequenz f	Wellenlänge λ
16 Hz	21,2 m
20 Hz	17 m
100 Hz	3,4 m
1.000 Hz	0,34 m
10.000 Hz	0,034 m
16.000 Hz	0,021 m
20.000 Hz	0,017 m

Ende Stunde 2

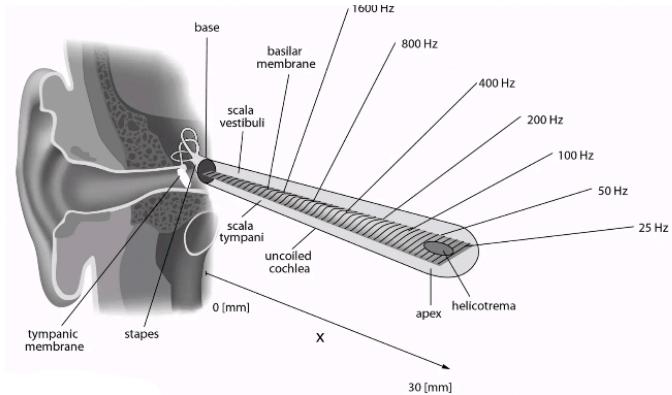
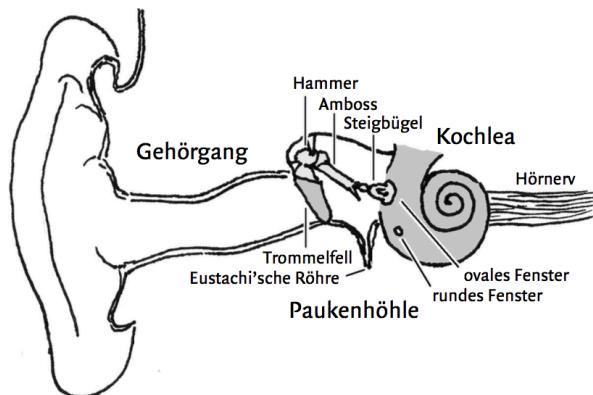
Beugung:



Schallbeugung an einem Zylinder für verschiedene Verhältnisse von Wellenlänge λ .

Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudientechnik/Wikipedia

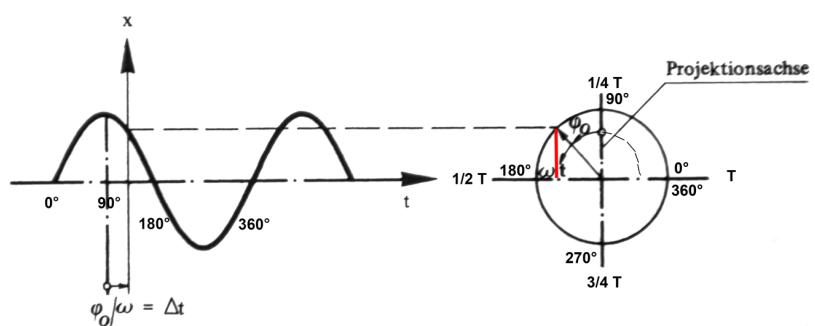
Aufbau des Ohres:



Kern, A., Heid, C., Steeb, W., Stoep, N., & Stoep, R. (2008). Biophysical Parameters Modification Could Overcome Essential Hearing Gaps. PLOS Computational Biology, 4(8), e1000161. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000161>

Quelle: Henle, Das Tonstudio-Handbuch

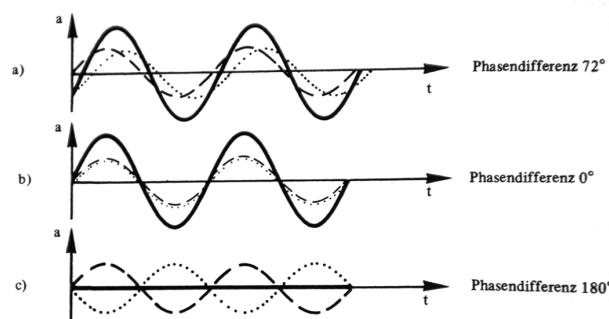
Zeigerdarstellung:



Einfache Schwingung als Projektion eines rotierenden Zeigers.

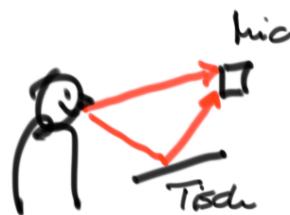
Video Zeigerdarstellung

Phase, Phasenverschiebung,i.e. Zeitverschiebung, bis hin zur Auslöschung:



Überlagerung zweier Schwingungen mit gleicher Amplitude und Frequenz und
a. mit beliebiger, b. ohne und c. mit 180° Phasendifferenz.,
 $a_1 \dots$, $a_2 \dots$, $a_1 + a_2 \dots$.

Auslöschungen bei zwei Lautsprechern/
Auslöschungen bei Sprechermikro und Reflexion via Tisch, Kammfilter

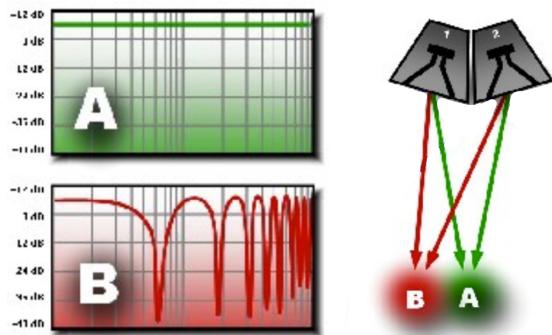


Signal ist jeweils zweimal zu hören.

A: Gleiche Distanz zu beiden Lautsprechern,
keine Auslöschung da phasengleich

B: Ungleiche Distanz, unterschiedliche Schalllaufzeit, daher Auslöschungen bei bestimmten Frequenzen
Kammfilter

Beispiel Phase invertieren, Delay, Logic
Noise Cancelling Kopfhörer



Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudiatechnik

Quelle: IFB Con, Mysterium Lineararrays

Pegelrechnung/Schalldruckpegel in Dezibel (dB):

Das Gehör verhält sich bei Frequenzen **logarithmisch**: Eine Verdoppelung der Frequenz wird immer als die gleiche Tonerhöhung empfunden.

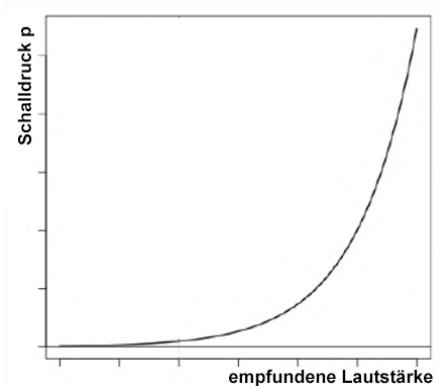
Gleiches gilt für die Lautstärke: Eine Verdoppelung des Schalldrucks wird immer als die gleiche Lautstärkesteigerung empfunden.

$\log_{10}(x)$ bedeutet $10^? = x$

<https://www.matheretter.de/rechner/logarithmus>

Aus Multiplikation wird Addition

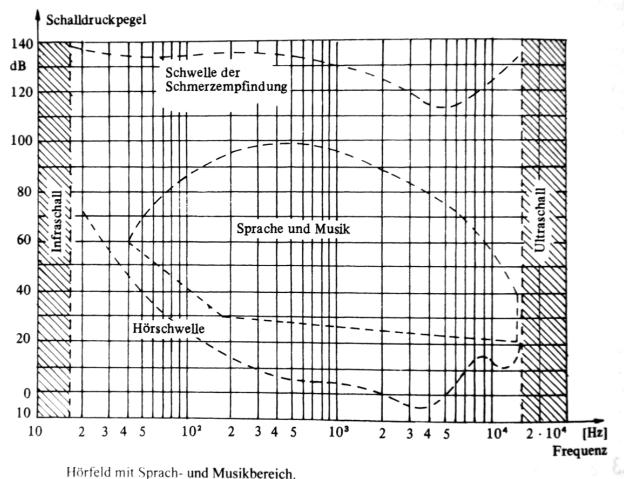
Faktor	dB	Faktor	dB
2	+ 6 dB	1/2	- 6 dB
4	+ 12 dB	1/4	- 12 dB
8	+ 18 dB	1/8	- 18 dB
10	+ 20 dB	1/10	- 20 dB



Bezugswert für **Schalldruckpegel**: 0dB ist die Hörschwelle, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pascal (N/m^2)

Bezugswert für Mischpulte, **Studionormpegel**: 0dB ist Vollaussteuerung = 1,55 V

Hörfeld, Hörschwelle/Schmerzschwelle:



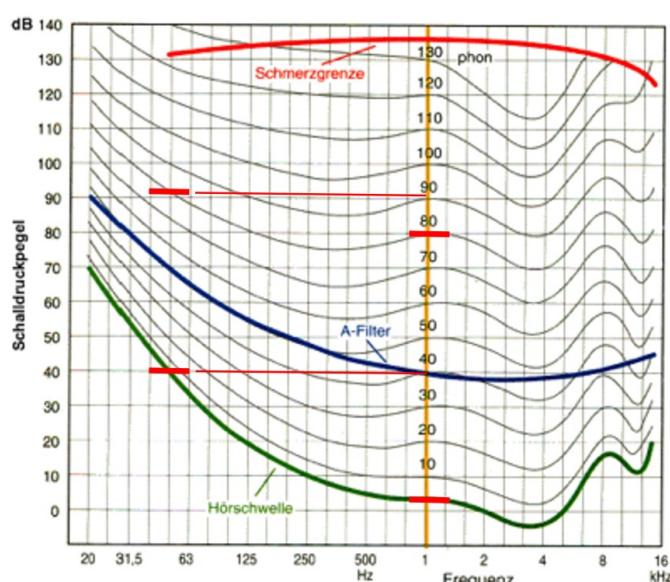
Quelle: ISO Norm 226

Grenzschalldruck: Minimal: $2 \cdot 10^{-5}$ Pascal, Maximal: 150 Pascal (Pa), 1 Pa=1 Newton/ m^2

Kurven gleicher Lautstärke:

Bei geringen Lautstärken werden die tiefen und hohen Frequenzen schwächer wahrgenommen. Deshalb Korrektur über Anhebung dieser Frequenzbereiche, Loudness

Folgerung für Abhörlautstärke im Studio:
Mit mittlerer Lautstärke abhören, denn die Klangbalance ändert sich in Abhängigkeit von der Lautstärke.



Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudientechnik

Mikrofone:**Wandlertypen:**

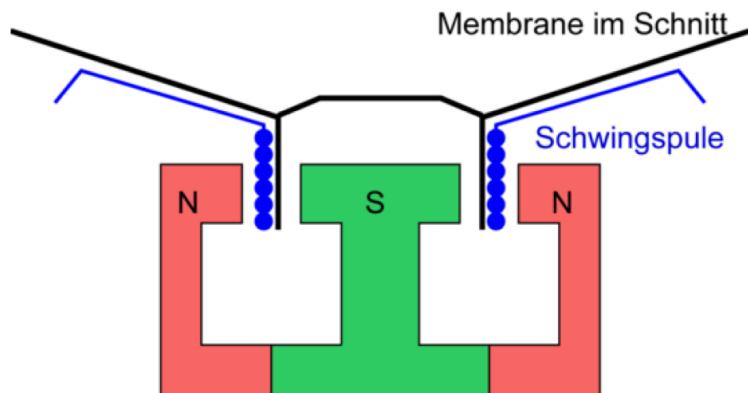
Wie wird Schall in elektrische Spannung umgesetzt? Wie wird Bewegung der Luftmoleküle in elektrische Spannung umgesetzt?

Dynamisches Mikrofon:

Membran folgt den Bewegungen der Luft analog.

Membran mit angehänger Spule befindet sich im Magnetfeld.

Elektrodynamisches Prinzip: In einen bewegten Leiter in einem Magnetfeld wird eine Spannung induziert. Je höher die Frequenz, desto öfter schwingt die Membran. Je höher die Lautstärke, desto grösser die Auslenkung der Membran, desto schneller die Bewegung, desto höher die Spannung.



Quelle: didaktik.physik.uni-muenchen.de

Bezeichnung **dynamisches Mikrophon**, weil durch die Geschwindigkeit der Membran Spannung erzeugt wird

Wirkprinzip das Gleiche wie beim **Lautsprecher**

Mikrofon: Bewegung wird in Spannung umgesetzt

Lautsprecher: Spannung wird in Bewegung umgesetzt.

Typische Vertreter dynamischer Mikrofone:

Sennheiser MD441

Shure Beta 52

ElectroVoice RE20



Quelle: Produktfotos Sennheiser, Shure, ElectroVoice

Vorteile dynamischer Mikrofone: Robust, günstig, druckvoller Klang.

Nachteil der dynamischen Mikrofone: recht träge, weil grosse Masse der Membran

-> Kompression der Dynamik, Transientendämpfung.

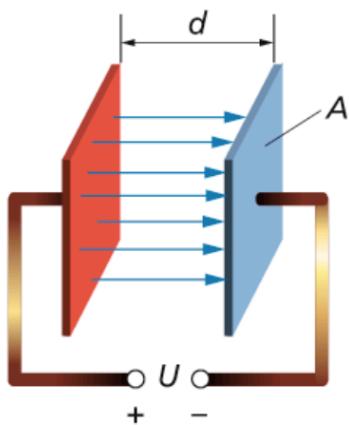
Kondensatormikrofon:

Membran ist eine metallbedampfte Kunststofffolie, geringe Masse, daher gute Übertragung von hohen Frequenzanteilen/Transienten



Quelle: Produktfoto Neumann GmbH

Aufbau Kondensatormikrofone: Membran ist Platte eines Kondensators.



Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik

Die Abstandsänderung d durch die Schwingung der Membran erzeugt eine Änderung der Spannung, die am Kondensator anliegt.

Für den Betrieb braucht man eine Dauerspannung. Diese Spannung wird im Mischpult erzeugt und heißt **Phantomspeisung**, Gleichspannung 48V.

Vorteile der Kondensatormikrofone: geringe Masse der Membran, daher gute Übertragung von hohen Frequenzanteilen / Transienten, impulsstreu.

Nachteile der Kondensatormikrofone: Nicht so robust, teuer.



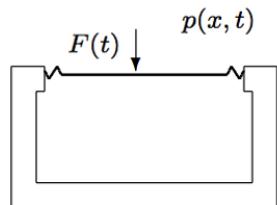
Quelle: Produktfoto Neumann GmbH

Klangbeispiel MD421 vs. KM 140 Keynote Mikrofone

Richtcharakteristiken:

Richtcharakteristik Kugel, Acht, Niere im Vergleich

Druckempfänger: Membran bewegt sich analog zum Schalldruck. Schalldruck wird direkt aufgenommen.



$$F(t) \sim p(x, t)$$

Abb. 9-8: Schema des Druckempfängers

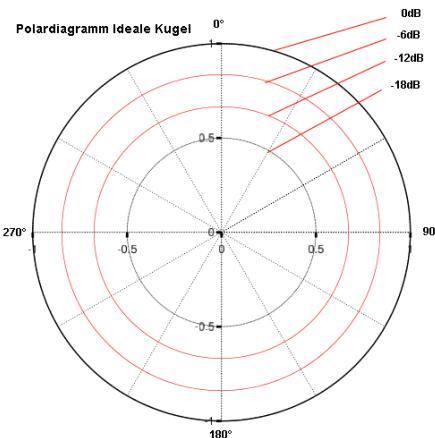
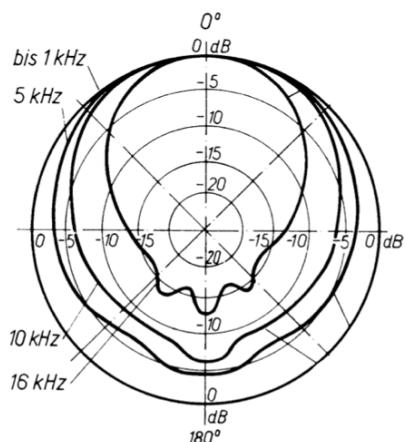


Abb. 9-10: Polardiagramm des idealen Druckempfängers (Kugelcharakteristik)

Richtcharakteristik: Kugel

Einfluss der Kapselgrösse auf das **Polar/Richtdiagramm** einer Kugel, Beugung



Frequenz f	Wellenlänge λ
16 Hz	21,2 m
20 Hz	17 m
100 Hz	3,4 m
1.000 Hz	0,34 m
10.000 Hz	0,034 m
16.000 Hz	0,021 m
20.000 Hz	0,017 m

Abb. 9 Richtdiagramm eines Druckmikrofons, das auf der Stirnseite eines zylindrischen Körpers mit 21 mm Durchmesser angeordnet ist.

Beispielbilder Kugelmikros
DPA 4006:

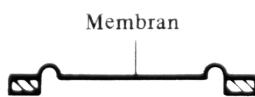


Schoeps MK2:

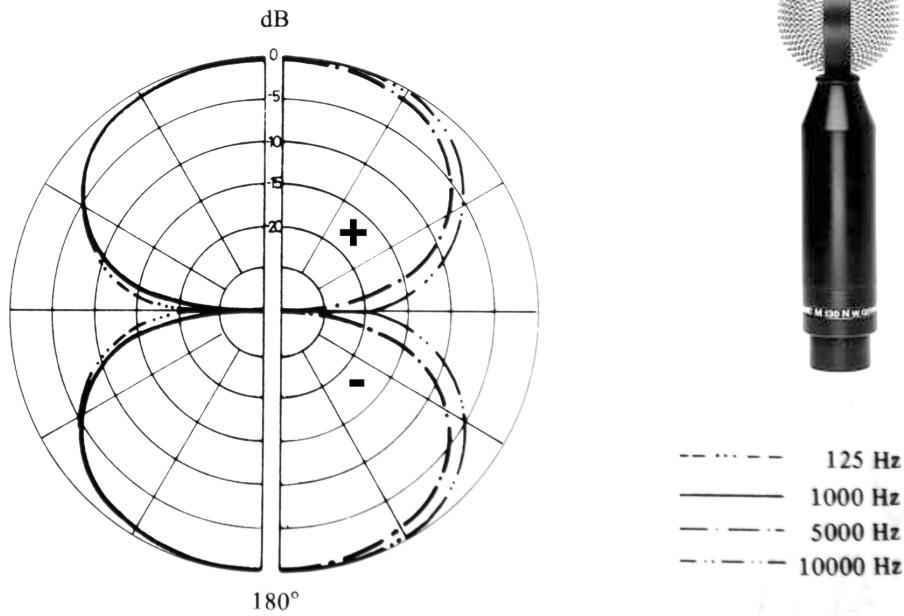


Quelle: DPA, Schoeps

Druckgradientenempfänger:



Prinzipieller Aufbau der Kapsel eines Druckgradienten-
empfängers mit Achterrichtcharakteristik.



Richtcharakteristik eines Druckgradientenempfängers mit Achterricht-
charakteristik bei verschiedenen Frequenzen.



Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik

Richtcharakteristik: Acht

Grund: Druckunterschied zwischen Kapselvorder- und rückseite führt zur Auslenkung der Membran.

Frequenzabhängigkeit des Druckunterschiedes:

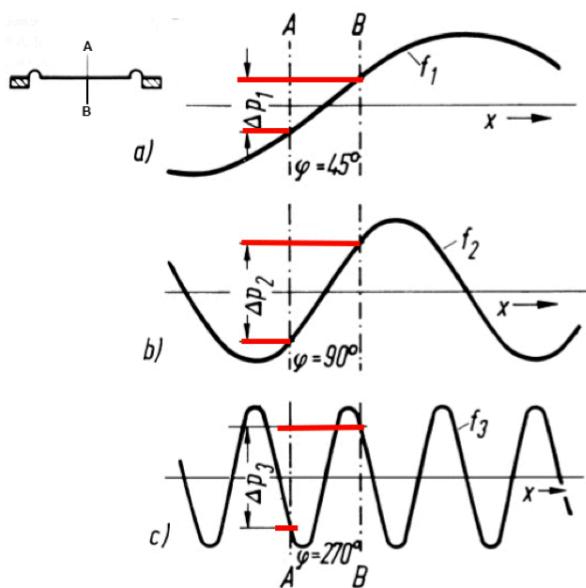


Abb. 2 Zustandekommen von Schalldruckdifferenzen $\Delta p_1 \dots \Delta p_3$ zwischen zwei Punkten, die den Abstand A-B voneinander haben, bei drei verschiedenen Frequenzen (in ebenen forschreitenden Schallwellen)

Polarität abhängig von Schalleinfallsrichtung

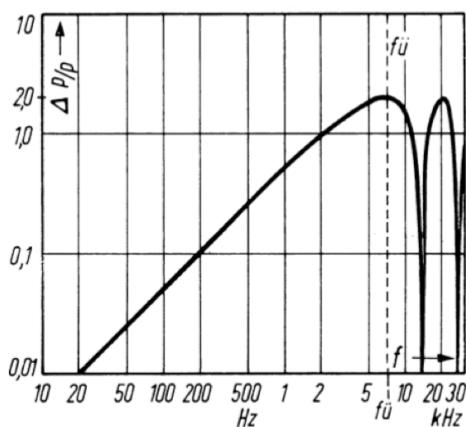
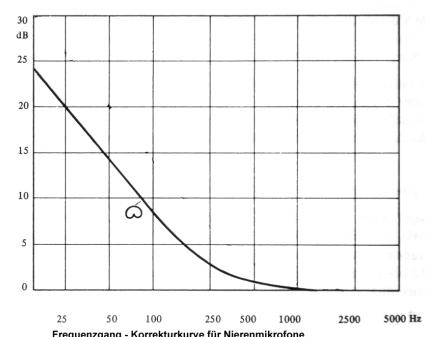


Abb. 3 Frequenzgang des Druckgradienten bzw. der Druckdifferenz Δp zwischen zwei Punkten im ebenen Schallfeld. Abstand der Punkte 25 mm ($f_{ü}$ = Übergangs frequenz)

Auslöschung, wenn Laufweg Vorn nach Hinten (A nach B) genau eine Wellenlänge.
Aber: Übergang zu Druckempfänger, wenn Membrangröße im Bereich der Wellenlänge. Übergang meist im Bereich vor erster destruktiver Interferenz.

Was macht man mit nichtlinearem Frequenzgang?

Korrektur durch Anhebung der tiefen Frequenzen.



Zusammensetzen der **Niere** aus Kugel und Acht:

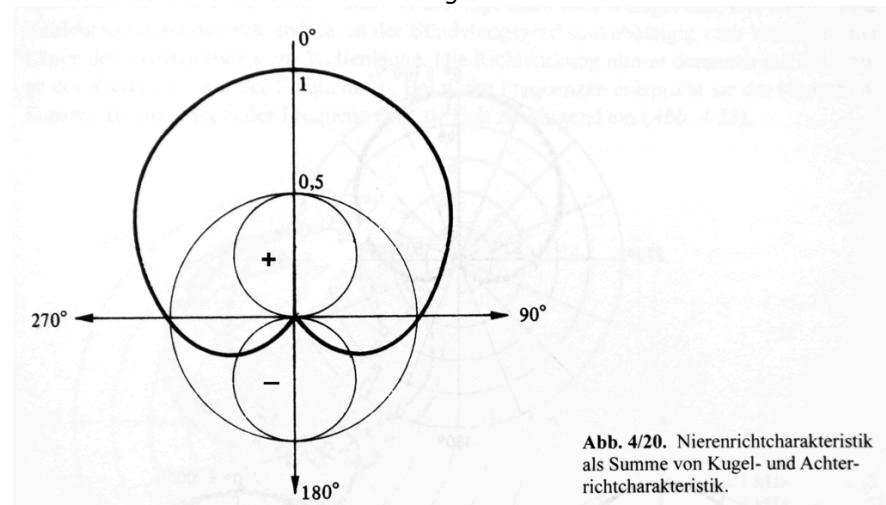
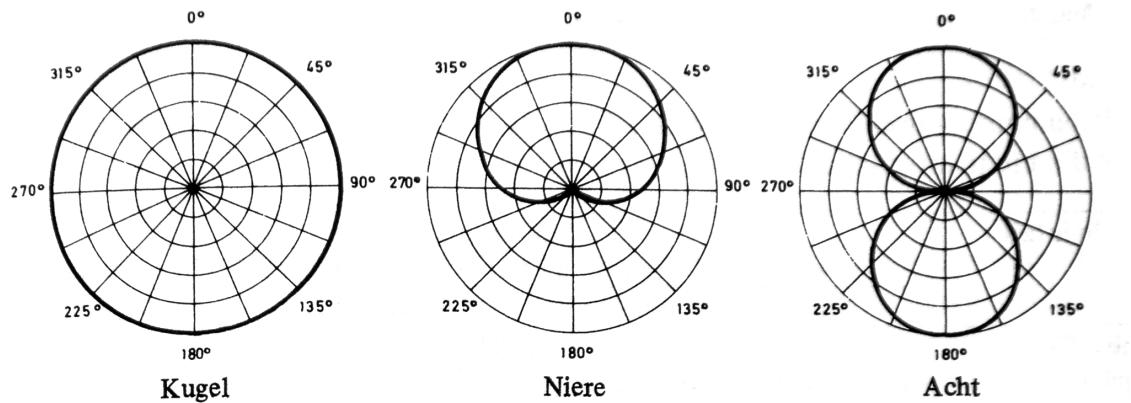
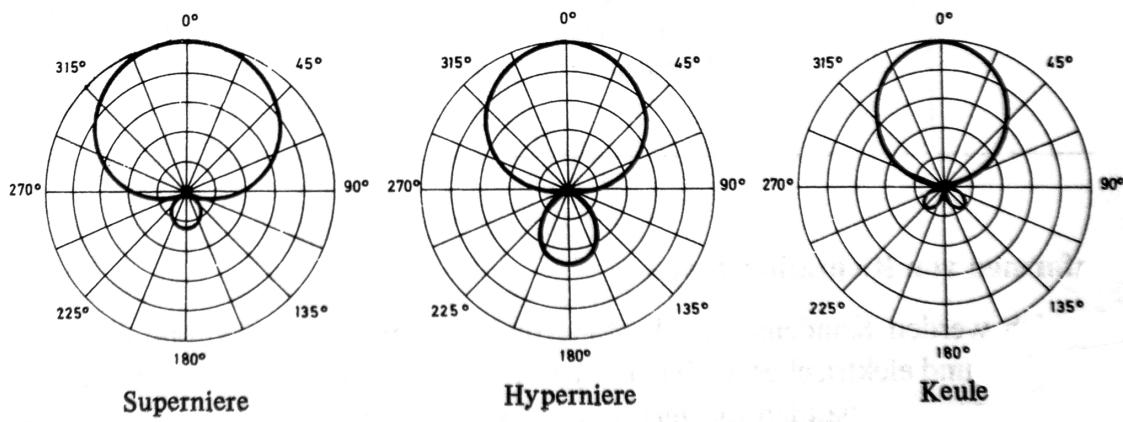


Abb. 4/20. Nierenrichtcharakteristik als Summe von Kugel- und Achterrichtcharakteristik.

Übersicht über **Richtcharakteristiken**:

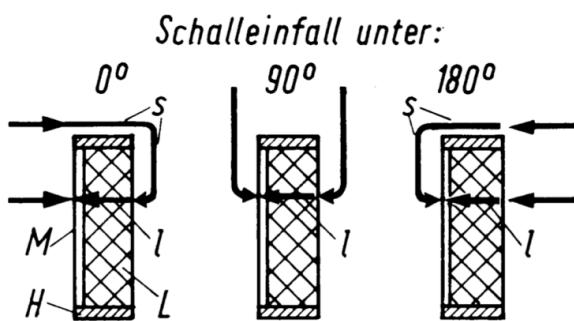


Grundformen



Zwischenformen

Niere in Ausführung mit akustischem Laufzeitglied:



Zur Wirkungsweise des „Nieren-Mikrophons“ mit akustischem Laufzeitglied

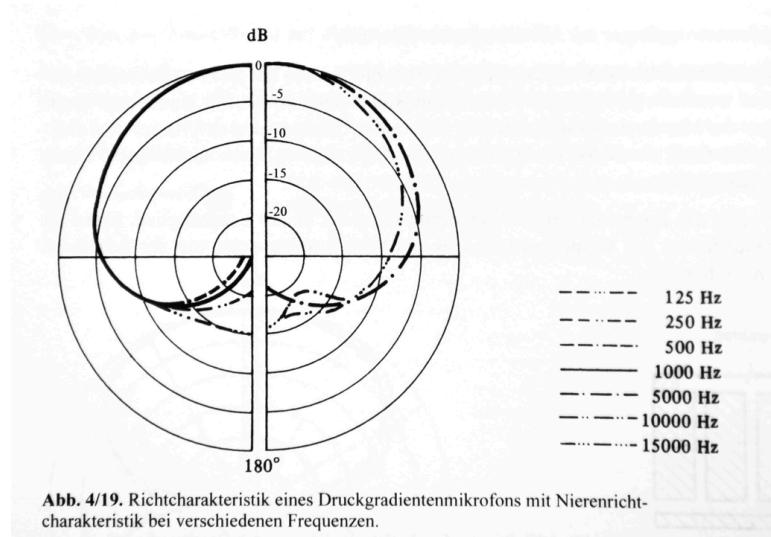


Abb. 4/19. Richtcharakteristik eines Druckgradientenmikrofons mit Nierenrichtcharakteristik bei verschiedenen Frequenzen.

Beispielbilder Nierenmikrofone:

Schoeps Niere MK4 breite Niere MK21 Hyperniere MK41



Hörbeispiele Sennheiser MD 21 vs. Electrovoice RE 20, Kugel vs. Niere, ruhig und Lärm Keynote Mikrophone

Niere: Nahbesprechungseffekt

Klang wärmer bei Annäherung der Quelle an Mikrofon, tiefe Frequenzen werden stärker übertragen.

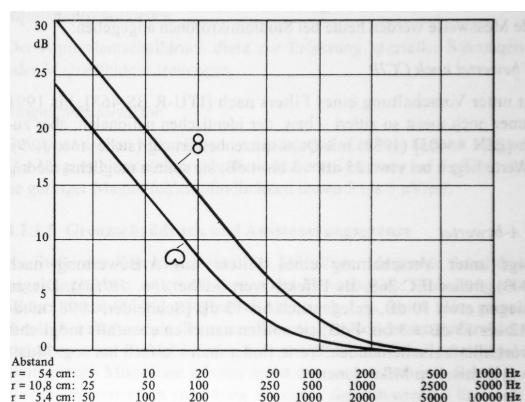
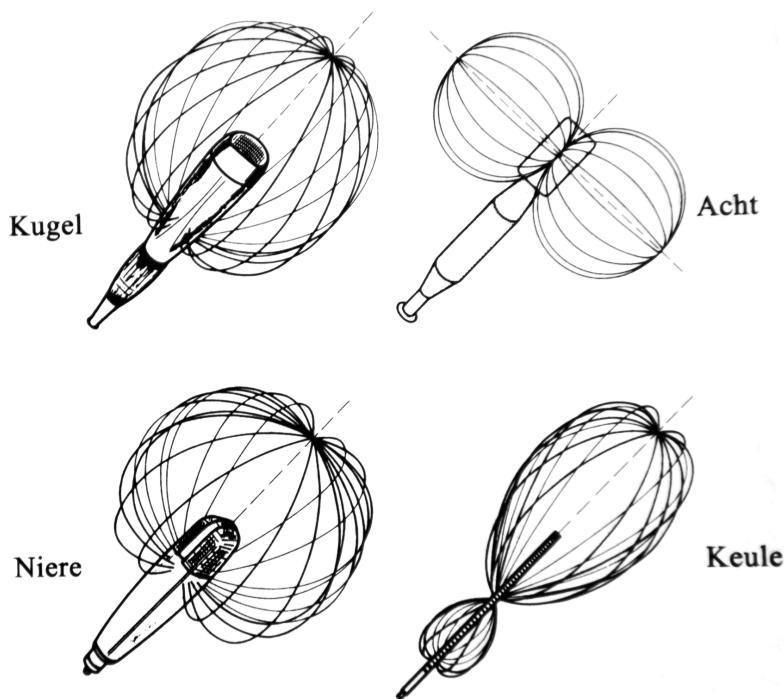


Abb. 4/7. Bassanhebung beim Nahbesprechungseffekt.

Verschiedene Richtcharakteristiken visualisiert:



Hauptformen der Richtcharakteristik in idealisierter
pseudo-dreidimensionaler Darstellung.

Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudioteknik

Richtrohr:

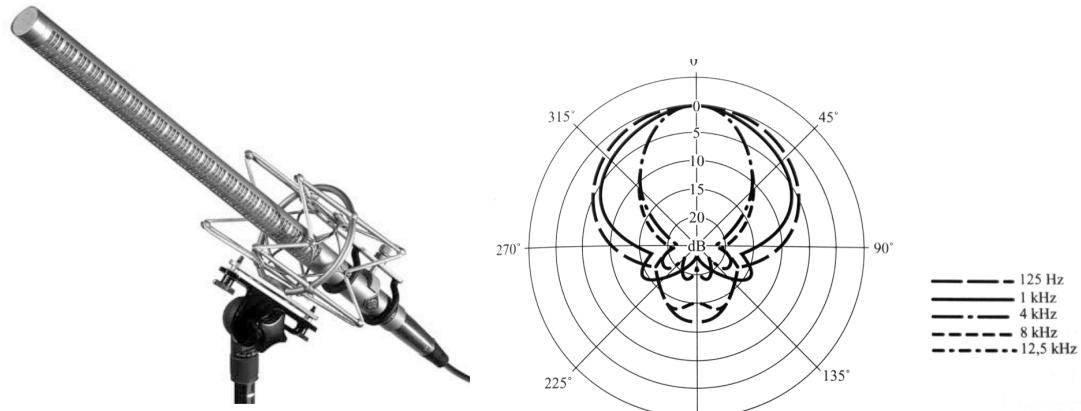


Abb. 34 Richtrohrmikrophon (KMR 82 i, Neumann)

Richtcharakteristik eines Druckgradientenempfängers mit Richtrohr.

Quelle: Bore, Mikrofone

Haupteinsatzbereich Richtrohr: Filmset-, Fernsehaufzeichnungen,

Achtung: Wandlertypen beeinflussen nicht! die Richtcharakteristik.
Es gibt dynamische Kugeln und Nieren, es gibt Kondensator-Kugeln und -Nierenmikrofone.

Bekannte Mikrofontypen:

Neumann U87, Kondensatormikro, der Studiostandard

Klangbeispiele Q Lab: Frozen, Stones, Lemmy,



Shure SM 57, Dynamisches Mikro, Klassiker, Snare, Gitarre, auch Gesang, wenn laut



Vocals: Shure KSM Serie (K), Shure SM 58 (D), Neumann KMS 105 (K)



Typische Schlagzeugmikrofonierung: Shure Beta 52 (D), Shure Beta 91 (K), Shure SM57 (D), Sennheiser E 904 (D), AKG C414 (K), Neumann KM 184 (K)

Klangbeispiel Mehrspur Tonbeispiele, Johannes Luther



Kick In Shure Beta 52



Kick Out Shure Beta 91



Hihat Neumann KM 184



Overheads 2 x AKG C 414



Snare 2 x Shure SM 57



Toms 2 x Sennheiser E 904

Quelle: Produktfoto Neumann GmbH

Quelle: Produktfoto Shure

Quelle: Produktfoto Shure, Neumann

Quelle: Produktfotos Shure, Neumann, AKG, Sennheiser

Gitarre Sennheiser E 906 (D)



Sonderformen:

Stereo Mikro Neumann SM 69 (Kondensator
Doppelmembran Kapsel)



Quelle: Bore, Mikrofone
Quelle: Produktfoto Sennheiser

Kunstkopf Neumann (K)

Abb. 29 Stereomikrophon mit Charakteristik-Umschaltern (USM 69 i, Neumann)



Quelle: Bore, Mikrofone

Abb. 31 Kunstkopf (KU 100, Neumann)

Ansteckmikrofone / Lavaliermikrofone, Headsets:



Abb. 38 Kapazitives Ansteckmikrophon (MKE 2, Sennheiser)

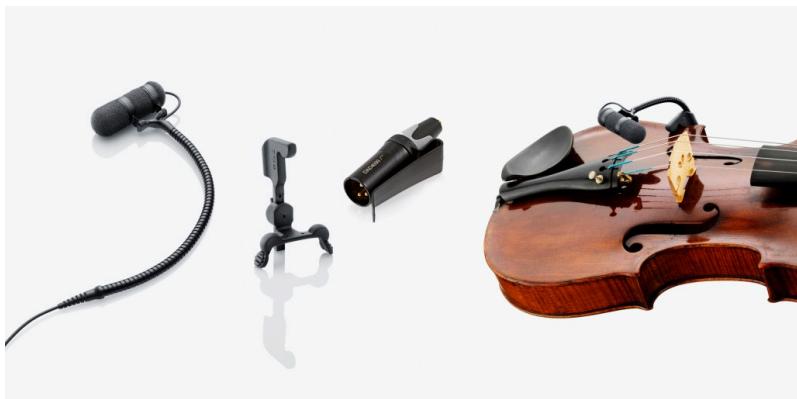
Sennheiser MKE 2



DPA dfine (K)

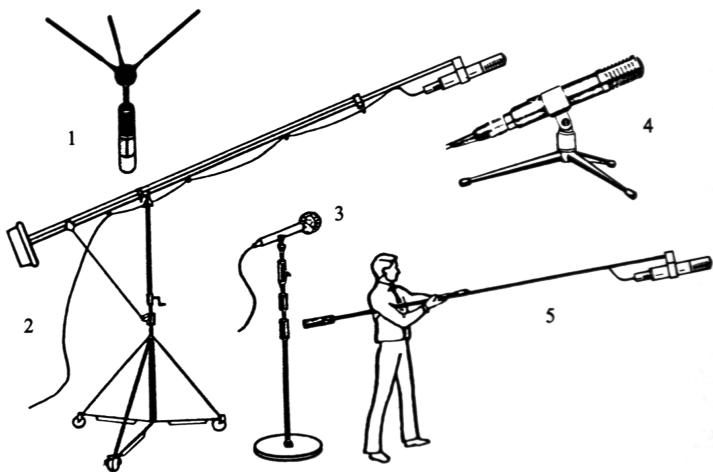
Quelle: Bore, Mikrofone

DPA 4099 (K) Schwanenhalsmikrofon:



Quelle: Produktfoto DPA

Stative: K+M (König & Meyer)



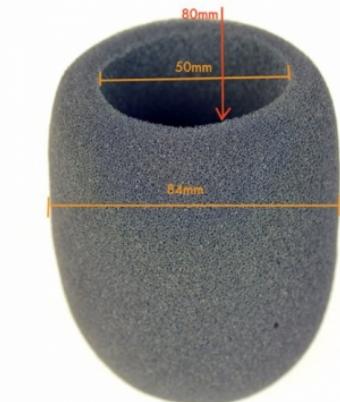
Verschiedene Mikrofonstände: 1. Mikrofonwinde, 2.. Mikrofonboom, 3. Stativ, 4. Tischstativ, 5. Mikrofonangel.

Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudientechnik / König & Meyer

Mikroklammern:



Windschutz:



Quelle: Produktfotos Neumann, K&M

Spinne:



Popschutz:



Windkorb:



Lokalisation: Richtungswahrnehmung einer Schallquelle.

Nicht zu verwechseln mit der **Räumlichkeit:** Das ist der wahrgenommene Raum, in dem eine Schallquelle zu hören ist.

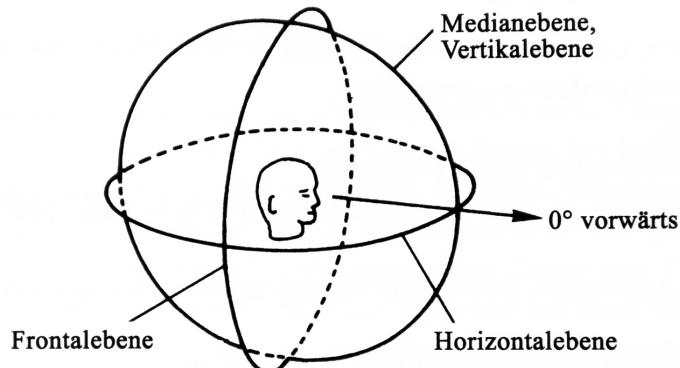


Abb. 3/7. Kopfbezogenes Koordinatensystem für die Beurteilung der Hörereignisrichtungen.

Lokalisation auf der Horizontalebene möglich durch

1: Interaurale Laufzeitdifferenz, durch 17cm Ohrenabstand max. 0,63 ms.

Geringste wahrnehmbare Differenz liegt bei 0,03 ms, entsprechend 3°-5° aus der Mitte, entsprechend 1 cm Laufzeitunterschied.

2: Pegeldifferenzen zwischen linkem und rechtem Ohr: Unterhalb 300Hz keine Unterschiede aufgrund Beugung um den Kopf. Oberhalb gibt es Pegelunterschiede, also Spektraldifferenzen, die zur Ortung führen. Ungenauer als Laufzeitunterschiede!

Ohr wertet im Bereich oberhalb 1600 Hz Laufzeit und Pegel aus und ist sehr präzise. Unterhalb von 1600Hz wird vorwiegend die Laufzeit ausgewertet.

-> **Horizontale Lokalisation** durch interaurale Laufzeitunterschiede und frequenzabhängige Pegelunterschiede.

Wir drehen unbewusst den Kopf ständig ein wenig, um genauer zu lokalisieren.

Vertikale Lokalisation nur durch durch spektrale Veränderungen, Einfluss der Ohrmuscheln: Richtungsbestimmende (Frequenz)-Bänder nach Blauert:

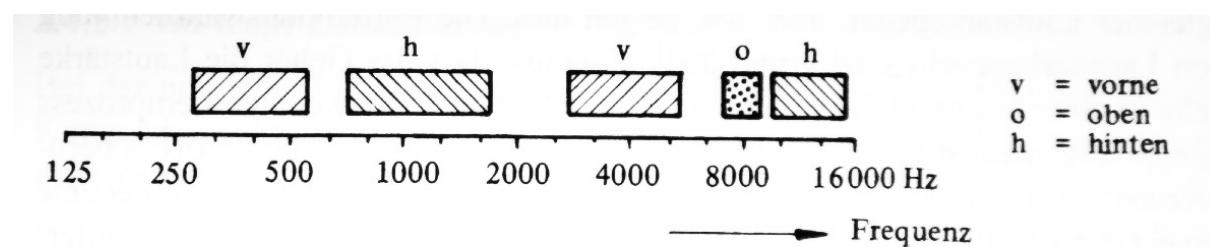


Abb. 3/9. Richtungsbestimmende Frequenzbänder bei der Richtungswahrnehmung in der Medianebene nach [Blauert, 1997].

Und: unser Ohr kann aus den Reflexionen des Raumes ebenfalls auf den Standort der Quelle schliessen.

[https://media.hs-furtwangen.de/m/29a9a8bffa398ddb635b3e59927d139e2968a232d5acee42fe5926dd975ee04c136ee1107e3ba c9166bc9defc68cff8c086af156c49b352fc3e8c2862f2a235a](https://media.hs-furtwangen.de/m/29a9a8bffa398ddb635b3e59927d139e2968a232d5acee42fe5926dd975ee04c136ee1107e3ba)

Ende Stunde 6

Stereo in der Audiotechnik:

Stereo Setup: die **Phantomschallquelle S** kann auf der gesamten Linie **b** zwischen den beiden Lautsprechern **L₁** und **L₂** geortet werden:

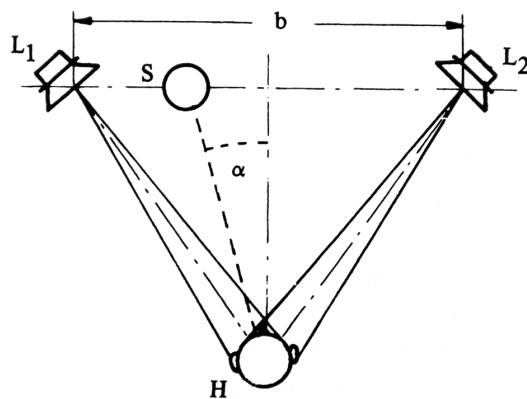


Abb. 5/2. Standard-Lautsprecheranordnung in einem gleichschenkligen Dreieck mit dem Hörer für Zweikanal-Stereowiedergabe.

Ortung der Phantomschallquelle in Abhängigkeit von der **Pegeldifferenz** zwischen linkem und rechtem Lautsprecher:

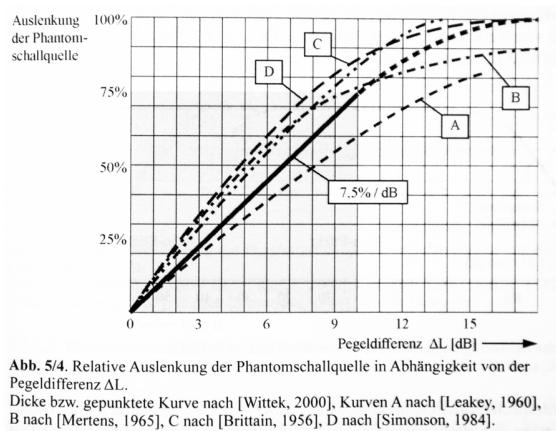


Abb. 5/4. Relative Auslenkung der Phantomschallquelle in Abhängigkeit von der Pegeldifferenz ΔL .
Dicke bzw. gepunktete Kurve nach [Wittek, 2000], Kurven A nach [Leakey, 1960], B nach [Mertens, 1965], C nach [Brittain, 1956], D nach [Simonson, 1984].

Ab 15 dB Pegeldifferenz wird die Phantomschallquelle ausschliesslich L bzw. R geortet

Ortung der Phantomschallquelle in Abhängigkeit vom **Laufzeitunterschied** zwischen linkem und rechtem Lautsprecher:

Ab 1,2 ms Laufzeitunterschied wird die Phantomschallquelle ausschliesslich L bzw. R geortet

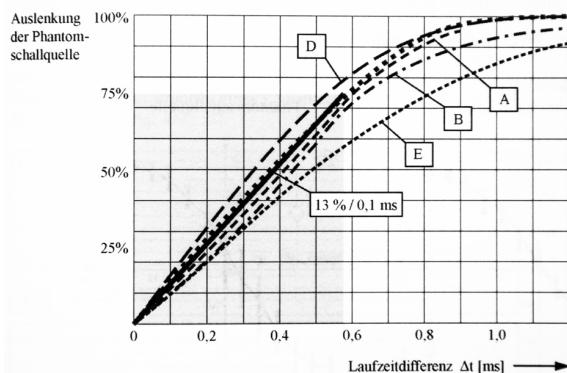
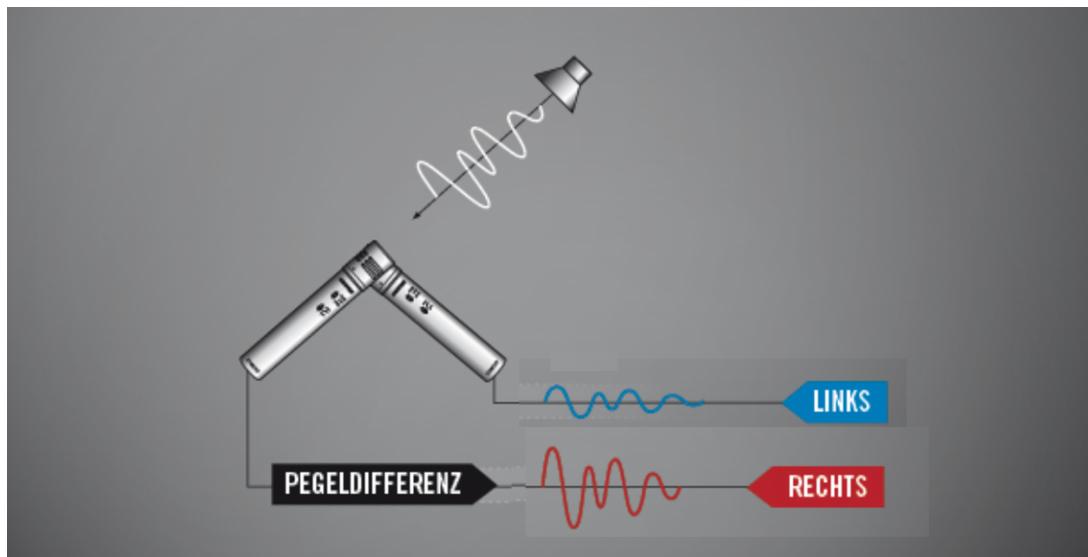


Abb. 5/6. Relative Auslenkung der Phantomschallquelle in Abhängigkeit von der Laufzeitdifferenz Δt .
Dicke bzw. gepunktete Kurve nach [Wittek, 2000], Kurven A nach [Leakey, 1960], B nach [Mertens, 1965], D nach [Simonson, 1984], E nach [Sengpiel, 2002].

XY Mikrofonierung, Intensitäts-Stereofonie, Koinzidenz-Stereofonie:

Zwei **Nieren**mikrofone am gleichen Punkt, unterschiedlich ausgerichtet:

Der Pegelunterschied zwischen linkem und rechtem Mikrofon ist entscheidend für die Positionierung des Signals als Phantomschallquelle.



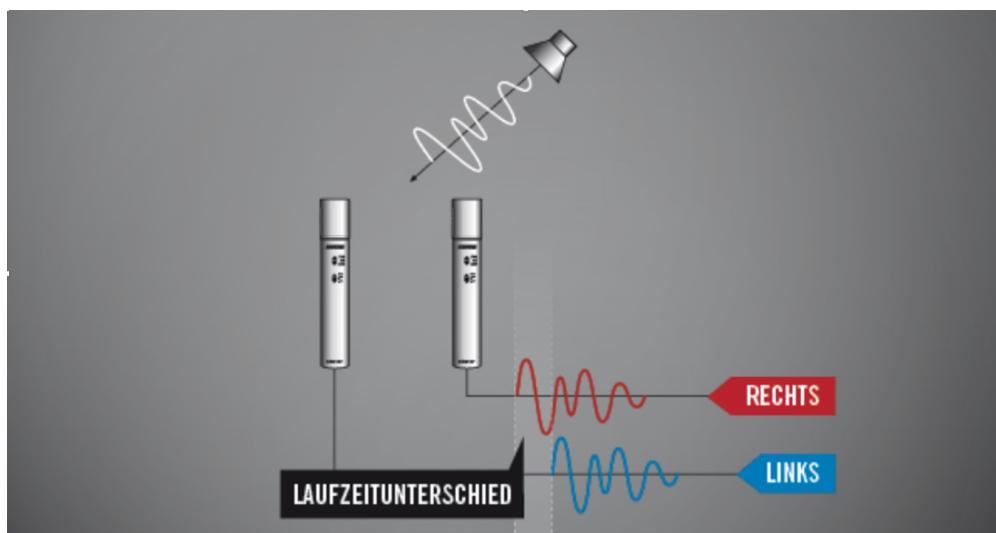
Merkmale der Koinzidenzstereofonie:

- Präzise Ortung
- geringe Räumlichkeit, keine glaubhafte Tiefenstaffelung
- Steriles Klangbild mit vielen Höhen
-

Laufzeit-Stereofonie, AB Stereofonie:

Zwei **Kugel**-Mikrofone in Abstand zwischen 20 und 80 cm, teilweise noch grösser:

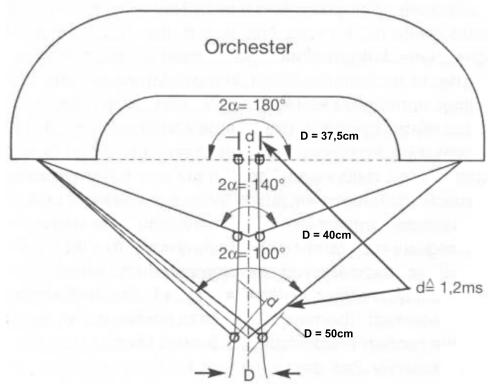
Der Laufzeitunterschied zwischen linkem und rechtem Mikrofon ist entscheidend für die Positionierung des Signals als Phantomschallquelle.



Merkmale der AB-Stereofonie:

- Hervorragende Räumlichkeit, gute Tiefenstaffelung
- Warmes, volles, musikalisches Klangbild
- schlechtere Ortung

Ab 1,2ms Differenz werden alle Signale nur noch auf einer Seite geortet. Deshalb ist der Abstand zwischen den Mikrofonen (Basisbreite) entscheidend für den möglichen Aufnahmewinkel:



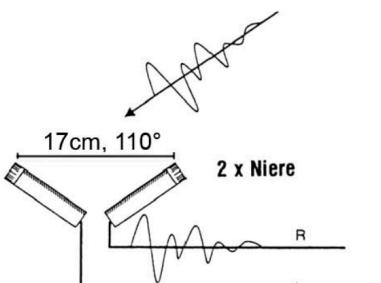
2α	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
D/cm	76	60	50	44	40	38,5	37,5

Aufgelöster Aufnahmewinkel
Basisbreite = Abstand der Mikrofone zueinander

Je breiter die Basis, desto kleiner der positionskorrekte Aufnahmewinkel, aber desto breiter wird das Ensemble gezogen.



Gemischte Verfahren, Laufzeit und Pegeldifferenzen, die sich gleichsinnig unterstützen:



Äquivalenz-Stereophonie (hier: ORTF)
Pegel- und Laufzeitdifferenzen
 ΔL und gleichsinniges Δt

Typischer Vertreter: ORTF-Mikrofonierung:

Office de Radiodiffusion Télévision Française

17,5 cm Basisbreite

110° Öffnungswinkel

60 % Pegelunterschied

40 % Laufzeitunterschied

max. Aufnahmebereich beträgt 96° für 100 %
Lokalisation (Ausnutzen der vollen Basisbreite)

Gemischte Verfahren bieten einen guten Kompromiss aus Abbildungstreue und akzeptabler räumlicher Abbildung.

Kunstkopf Stereophonie:



Abb. 31 Kunstkopf (KU 100, Neumann)

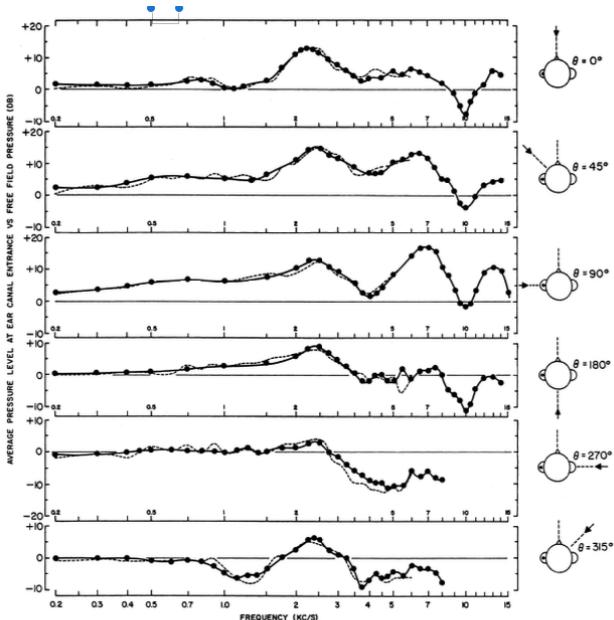


Abb. 3-3: Winkelabhängige Außenohr-Übertragungsfunktionen (HRTF), gemessen im linken Gehörgang. Oben: Messungen an zehn Versuchspersonen, frontal Schalleinfall (0°). Unten: aus je zehn Messungen gemittelte Kurven für unterschiedliche Schalleinfallsrichtungen Θ : $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ (= senkrecht auf das Ohr), $180^\circ, 270^\circ, 315^\circ$. Skalierung der Frequenzachse 200 Hz bis 15 kHz (aus: Shaw 1966)

Samplitude: Stereosammlung

Tab. 5/4. Eigenschaften des Klangbilds bei den verschiedenen Mikrofonverfahren bei Stereoaufnahmen und ihre Eignung für verschiedene Programmparten.

Eigenschaften des Klangbilds bei der Wiedergabe	Intensitätsverfahren (MS, XY)	Einzel-mikrofon-verfahren	Laufzeit-verfahren (AB)	gemischte Verfahren (z. B. ORTF, KFM)	Stütz-mikrofon-verfahren
gute Abbildung der Richtung	+	+		+	+
gute Präsenz der Schallquellen		+		+	+
gute Tiefenstaffelung der Schallquellen			+	+	
guter Raumeindruck			+	+	
besonders geeignet für					
aktueller und dokumentarisches Wort	+	+			
Hörspiel	+	+		+	
populäre Musik	+	+			
Jazz	+	+		+	+
klassische Musik			+	+	+

Anschlusstechnik:

male – Stecker
female - Buchse

Steckernormen:
XLR

6,3mm Klinke symmetrisch/unsymmetrisch:



Chinch:



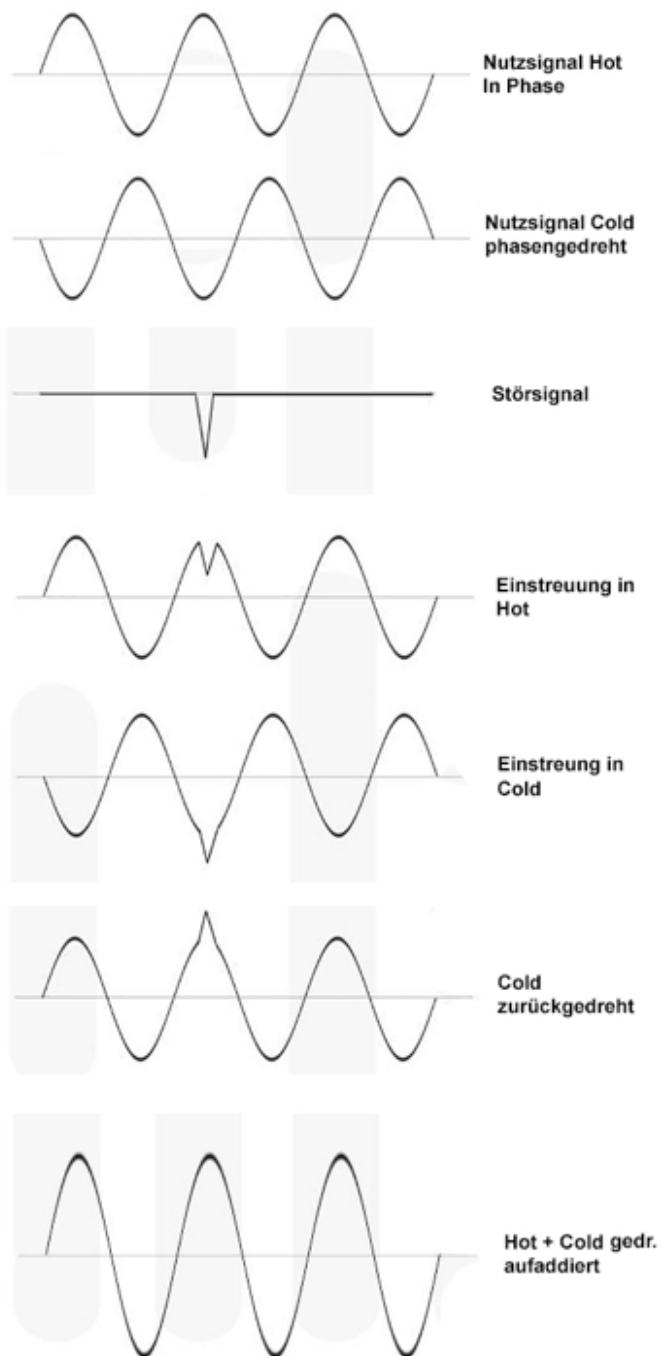
3,5mm Klinke:

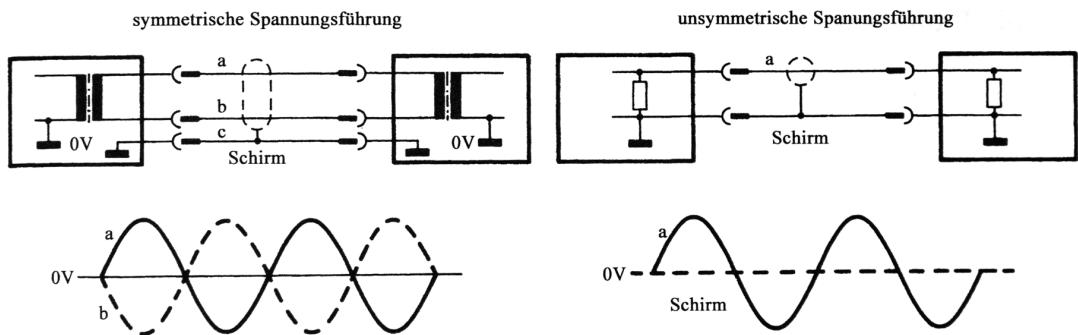


Symmetrische Kabelführung: Balanced

Mikropegel Größenordnung 5-20mV

Magnetfelder erzeugen Einstreuungen -> es brummt: Abhilfe: Symmetrische Kabelführung, in der Nutzsignal zweimal im Kabel übertragen wird: einmal phasenrichtig (hot), einmal um 180 Grad phasengedreht (cold):





Anwendungen:

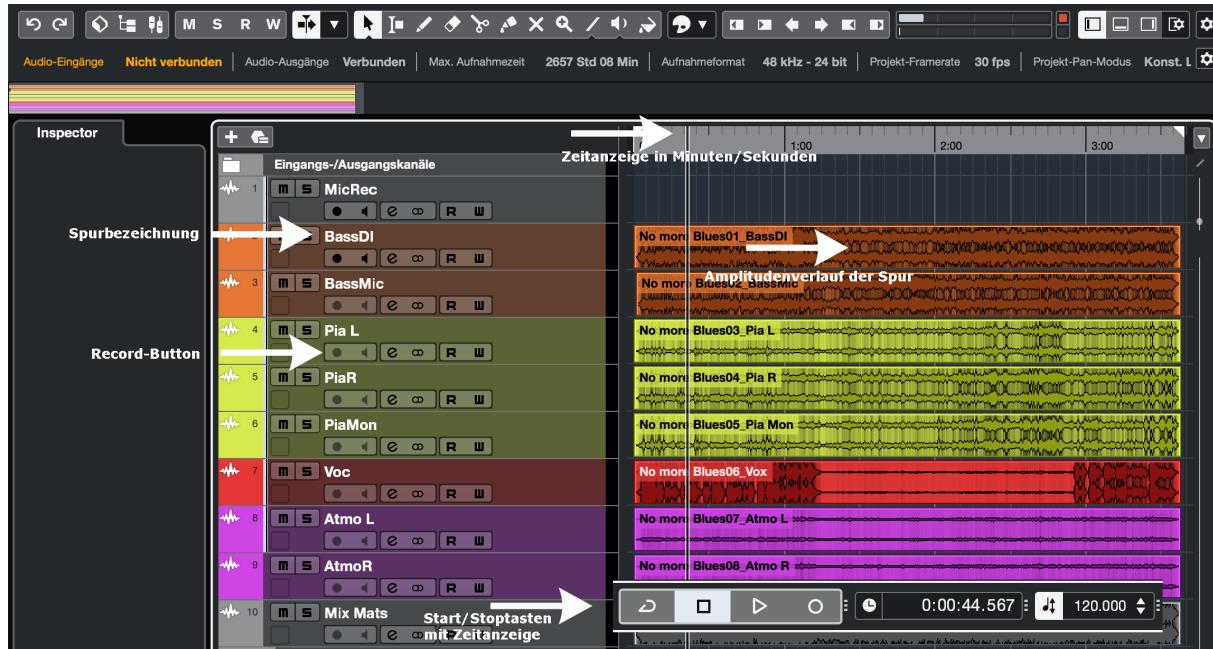
DI Box: Symmetrierung von unsymmetrischen Signalen wie Keyboards, Bässe, akustische Gitarren oder Rechnern durch einen Übertrager.



Verkabelung:

Multicore, Subcores: bringen Ordnung in die Kabelführung
Von Stagebox über Multicore zur Auflösung/Peitsche

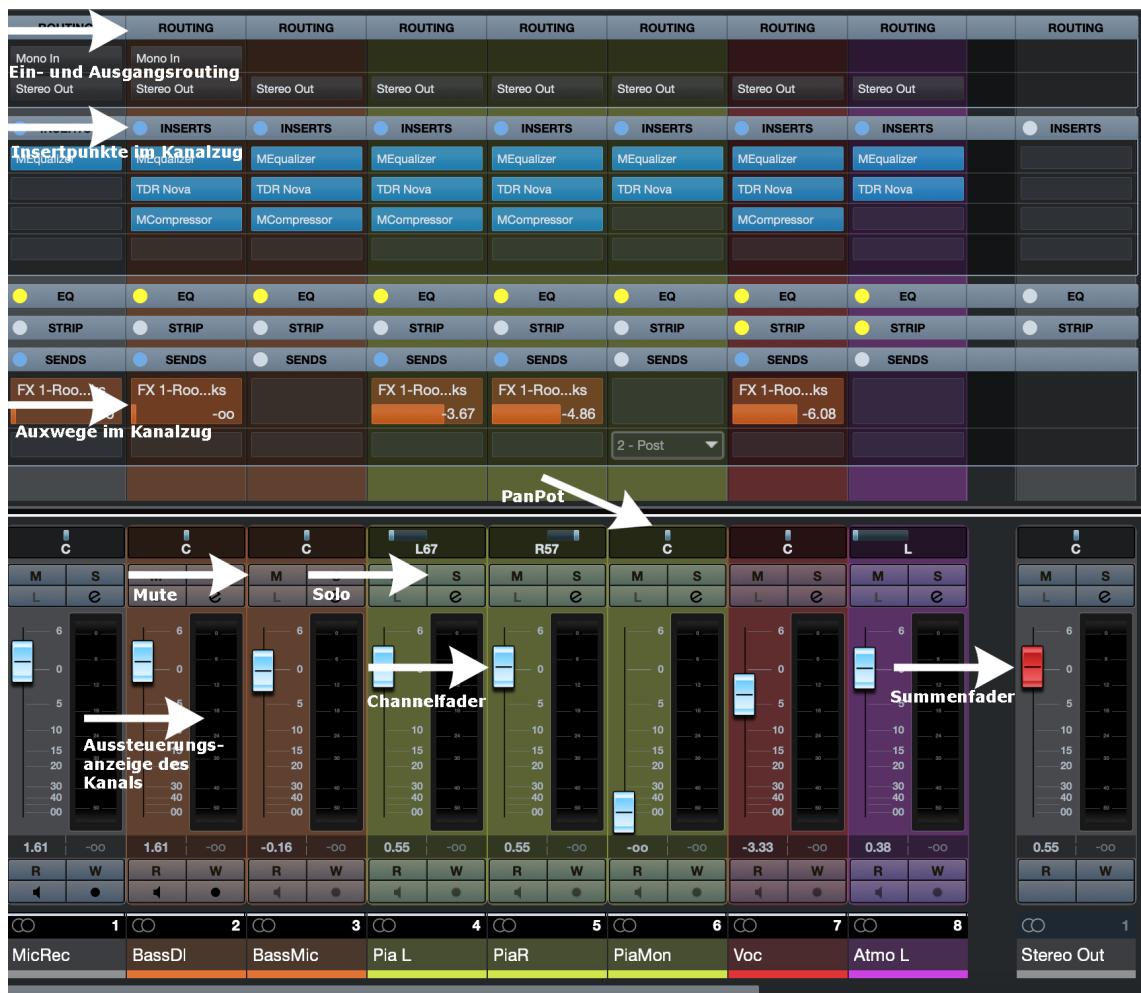


Digitale Audio Workstation:**Digitale Mehrspuraufzeichnung / Virtuelle Bandmaschine / Edit-Fenster:**

Jede Quelle wird auf einer eigenen Spur aufgezeichnet und abgespielt.

Im Anschluss werden die Signale im **Mischpult** bearbeitet:

Ende Stunde 7



An dieser Stelle sollten Sie sich eine **DAW** auf Ihrem eigenen Rechner installieren.
Jede DAW, ob ProTools, FL Studio, Cubase, Logic, Ableton Live, Samplitude, Audition, Reaper etc. ist geeignet.

Reaper Zugang: <https://www.reaper.fm/download.php>

Mischpult Analog:



Quelle: Midas

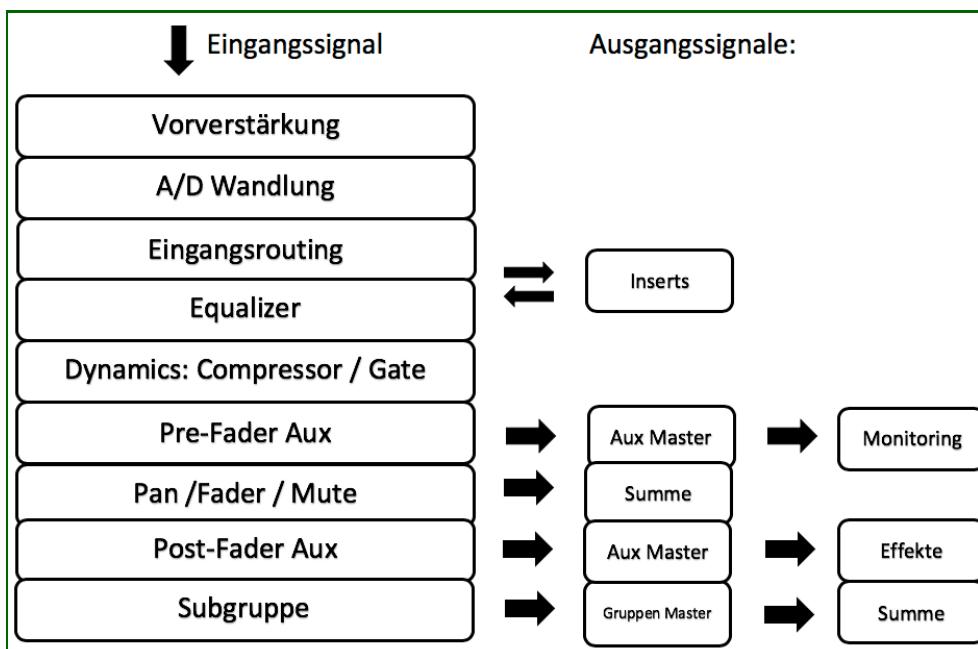
Mischpult Digital:



Quelle: Soundcraft

Grundsätzliche **Struktur**: Ein Eingangskanal wiederholt sich,
senkrecht Kanalzüge, waagrecht Summen/Busse.

Darstellung der Pultstruktur:



Bearbeitung von:	Pultbereiche:	Werkzeug:
Klang	Eingangssektion:	Vorverstärkung, A/D Wandlung, Eingangsrouting
Dynamik	Filtersektion:	Equalizer: Shelf, Parametrische Filter, High/LowCuts
Räumlichkeit	Dynamiksektion:	Kompressoren, Limiter, Gates
Lautstärken	Effektsektion:	Hall, Delay, Phaseneffekte
	Summensektion:	Summen, Auxe pre und post, Gruppen, Matrix
	Ausgangssektion:	Ausgangsrouting

Eingangssektion:



Quelle: Focusrite

Quelle: Soundcraft

Vorverstärkung/Gain auf analoger Ebene:

Verschiedene Eingangs-Pegel werden angeglichen.

Wichtigster Bezugspegel: **Studionormpegel 1,55 V = 0dB**

48V Phantomspeisung: Speisung der Kondensatormikrofone.

Pad: Vordämpfung, falls zuviel Pegel am Eingang anliegt.

Aussteuerungsanzeigen, Peakmeter. +18dB Analog Aussteuerungsgrenze, entspricht 0dBFS (Full Scale). Maximal mögliche Aussteuerung des digitalen Fensters, darüber hinaus wird das Signal abgeschnitten und somit verzerrt.



Quelle: Samplitude

Digitalisierung des Analog-Signals, die A/D-Wandlung

Digitale **Stageboxen**: verstärken vor, digitalisieren das analoge Signal.

Entspricht einem **Audiointerface** mit vielen Kanälen.

Für Audiointerface Treiber notwendig.



Quelle: Yamaha

Eingangskreuzschiene / Inputrouting / Virtuelle Patchbay:

Alle Eingangssignale des Interfaces liegen digital vor. Eine Quelle für einen Kanal auswählen.

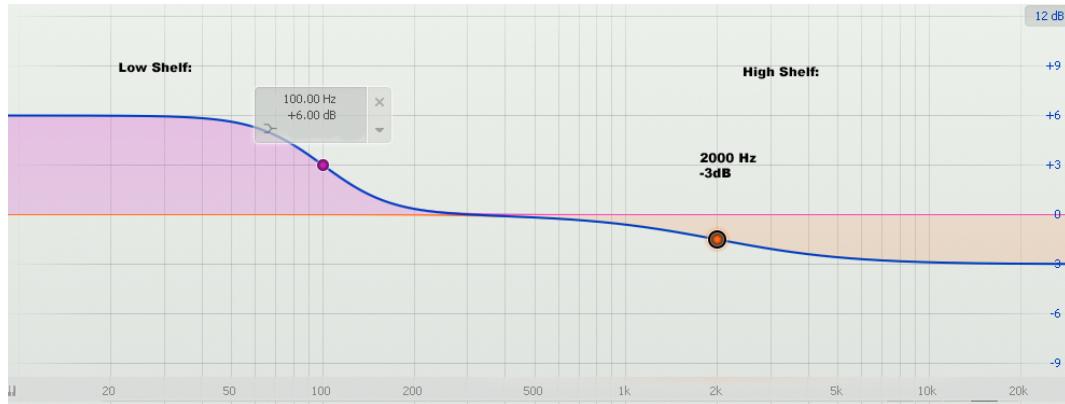


Quelle: PortTools

Klanggestaltung: EQ (Equalizer)/Filtersektion:

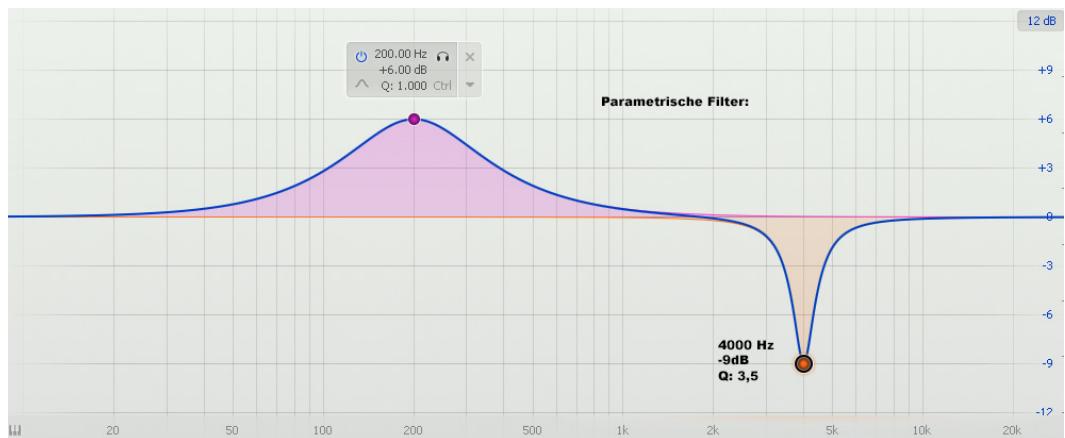
Shelving Filter (High Shelf / Low Shelf)

Parameter: Einsatzfrequenz f / Gain (Anhebung/Absenkung) in dB



Parametrischer EQ, Glockenfilter:

Parameter: Frequenz f, Gain in dB, Güte (Breite) Q

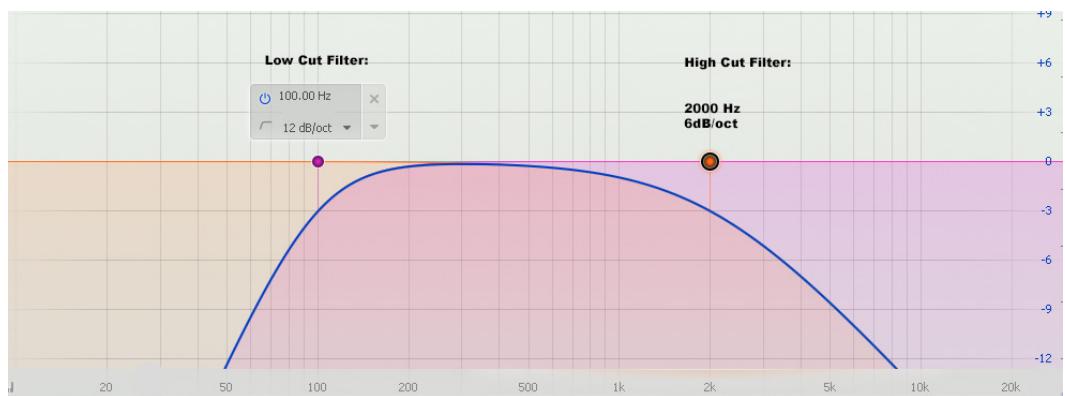


Low Cut und High Cut:

Parameter: -3dB Einsatzfrequenz, Flankensteilheit in dB/Oktave

Low Cut = Hochpass (hohe Frequenzen können passieren)

High Cut = Tiefpass (tiefe Frequenzen können passieren)



Equalizer Plugin:



Grundsätzliche Ansätze beim Filtern:

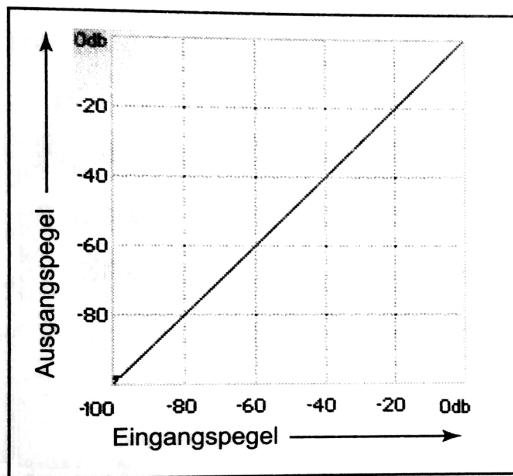
Additiv filtern: Frequenzbereiche anheben -> Signal nach vorn holen, partiell hörbar machen, Griffigkeit, aber auch Aggressivität im Klang, Phasenprobleme werden betont.

Subtraktiv filtern: Frequenzbereiche absenken -> schlecht klingendes absenken, Klarheit schaffen, Durchsichtigkeit, Phasenprobleme verstecken.

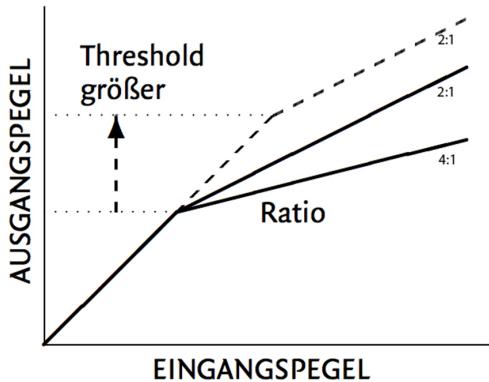
Ende Stunde 8

Dynamiksektion / Compression:

Kennlinie linear:

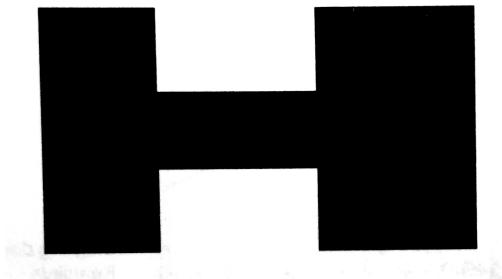


Quelle: Katz, Mastering audio

Compressorkennlinie, Parameter **Ratio** und **Threshold**:

Quelle: Görne, Tontechnik / ProTools

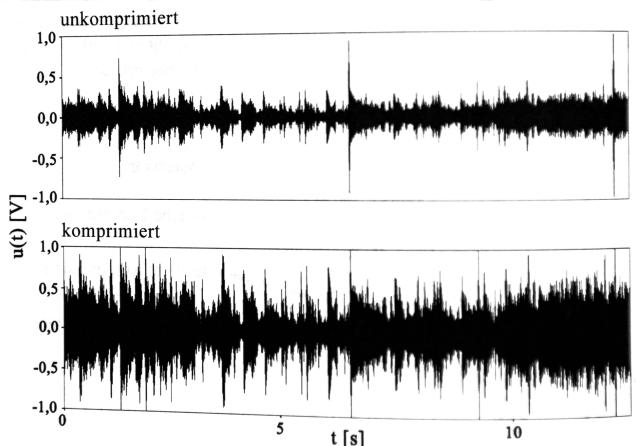
Eingangssignal vor Kompression:



Ausgangssignal nach Kompression:



Quelle: Katz, Mastering audio

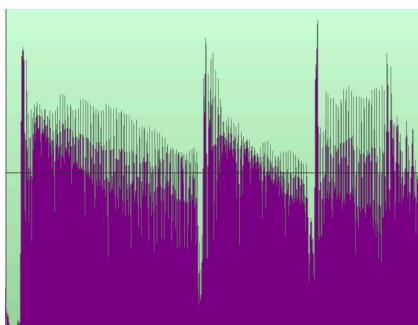


Signal unkomprimiert

Signal komprimiert,
Lautstärkeverlust ausgeglichen
Makeup Gain

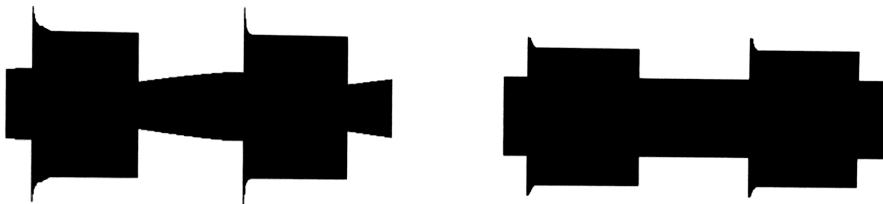
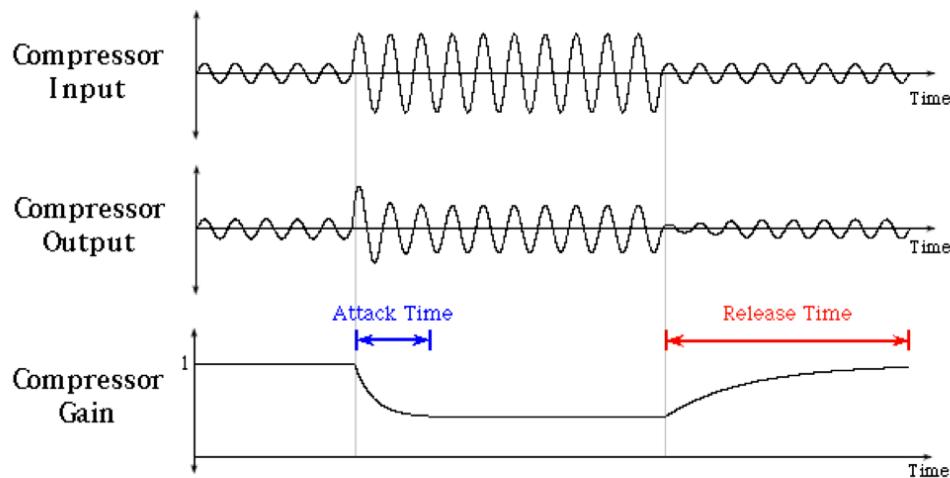
Quelle: Katz, Mastering audio

Pegeldarstellung Gitarre mit Anzupfgeräusch, Einschwingvorgang entscheidend für den Klang des Instrumentes.



Quelle: Samplitude

Parameter Attack und Release:



Links ein Kompressor mit niedriger Ratio und langsamem Attack- und Release-Zeiten. Rechts eine höhere Ratio, schnellere Attack und sehr schnelle Release.

Effekte der Compression: Verdichtung des Klangmaterials, gefühlt grössere Lautstärke, bessere Konturierung und Griffigkeit des Signals. Aber: Gefahr, das Signal zu zerquetschen!

Compressor Plugin:

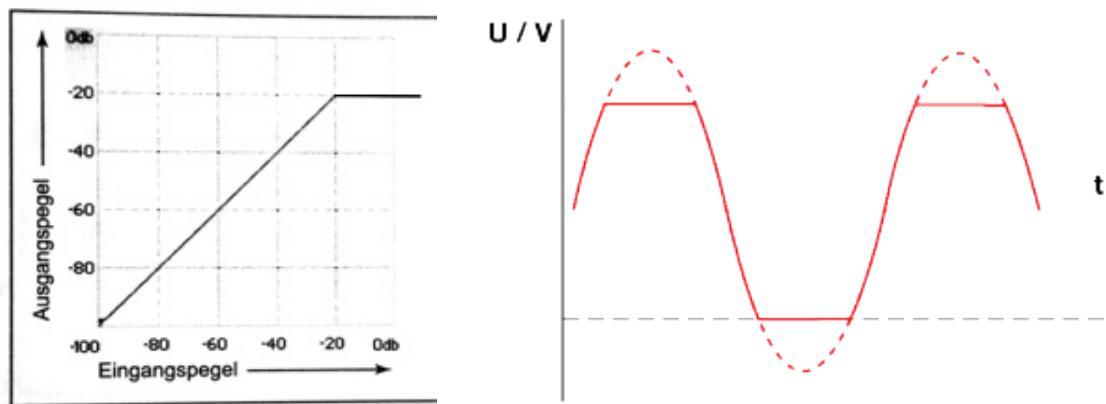


Quelle: cara.gsu.edu

Quelle: Katz, Mastering audio

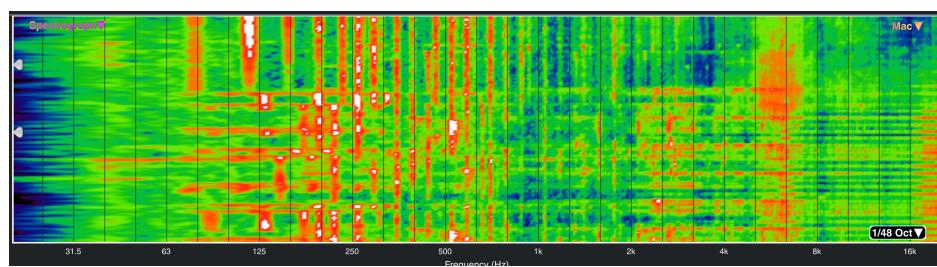
Verzerrungen:

möglich bei Einsatz einer **Limiters**, das ist ein Kompressor mit hoher Ratio:

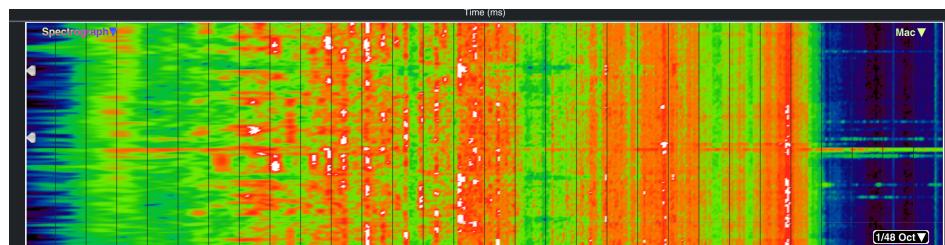


Fouriertransformation: Jede periodische Schwingung (Ton) lässt sich in harmonische Einzelschwingungen zerlegen. Hier die Darstellung einer Gitarre im Analyzer:

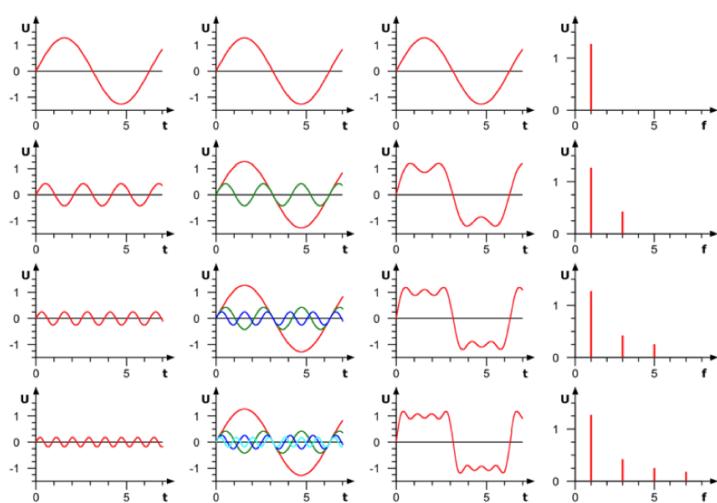
Unverzerrt:



Verzerrt:
Hier sind neue
Obertöne
entstanden

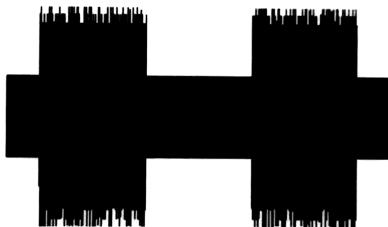


Rechteckschwingung als Aufsummierung von Grundton und ungeradzahligen Obertönen:



Preis des Komprimierens: Durch die pegelabhängige Übertragung entstehen während der Regelung Verzerrungen.

Oftmals verliert man die Luftigkeit des Signal, es wird stumpf und klingt eng.



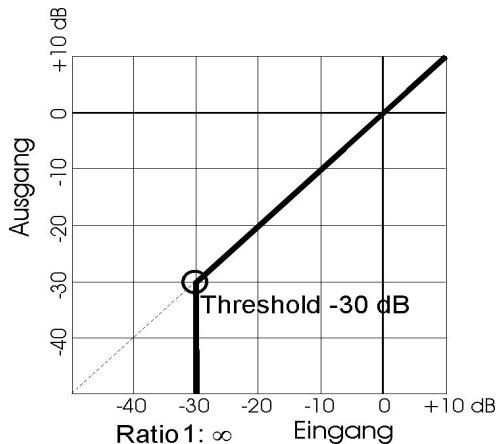
Hier sind Attack und Release zu kurz, so kann ein Kompressor starke Verzerrungen produzieren.

Aber: Durch längere Attack- / Releasezeiten kann dieses Phänomen auf den kurzen Regelbereich begrenzt werden.

Gute Startzeiten: Attack 20ms, Release 120ms.

Gate:

Kennlinie:



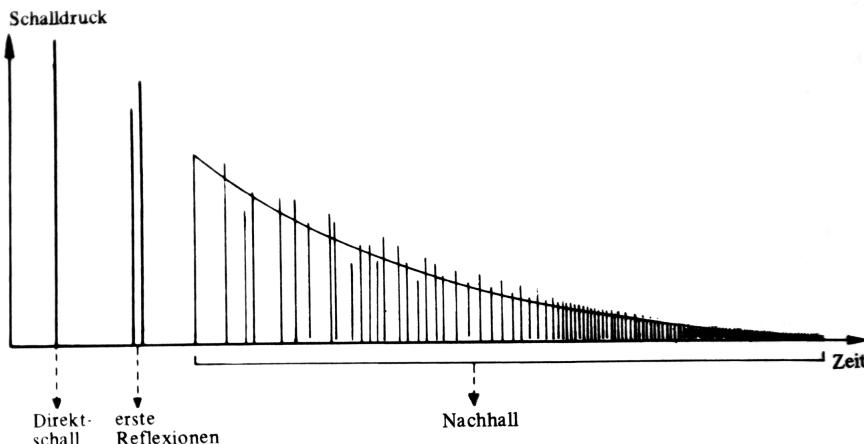
Gate Plugin:



Wird eingesetzt für: leise Störgeräusche ausblenden, Freistellen Toms, brummender Bass, Kick knackig.

Effektsektion, FX/ Effekte:

Nachhallkurve eines Raumes setzt sich zusammen aus: Direktsignal, erste Reflexionen, Nachhall



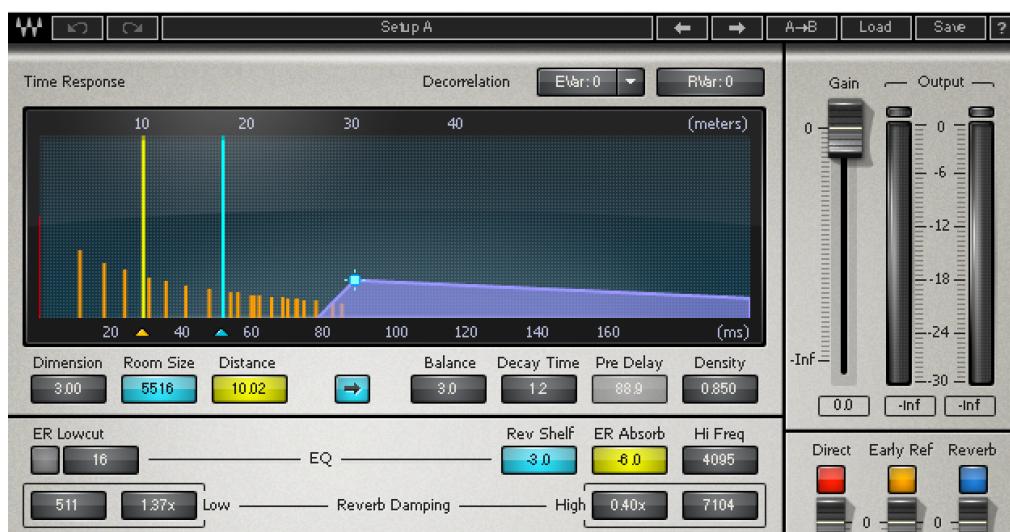
Zeitliche Folge der Reflexionen in einem Raum bei Impulsschall.

Nachhallzeit RT_{60} (Reverb Time 60): Die Zeit, bis der Nachhall von 0dB auf -60 dB abgesunken ist.
In der Praxis: Wie lange höre ich den Nachhall?

Tab. 1/8. Richtwerte für optimale Nachhallzeiten.

Art des Raums	optimale Nachhallzeit T	Volumenkennzahl K
Sprecherstudio	0,3 s	
Hörspielstudio	0,6 s	
großes Fernsehstudio	0,8 s	
Vortragssaal, Theater	0,7 bis 1,2 s	3 bis 5 m ³ /Platz
Opernhaus	1,5 s	6 bis 7 m ³ /Platz
Konzertsaal, großes Musikstudio	2,0 s	8 bis 10 m ³ /Platz
Kirche	2,5 bis 3,0 s	10 bis 12 m ³ /Platz

Hall-Effekte: Hall Gross, Hall Raum, Hall Platte, Gated, Reverse



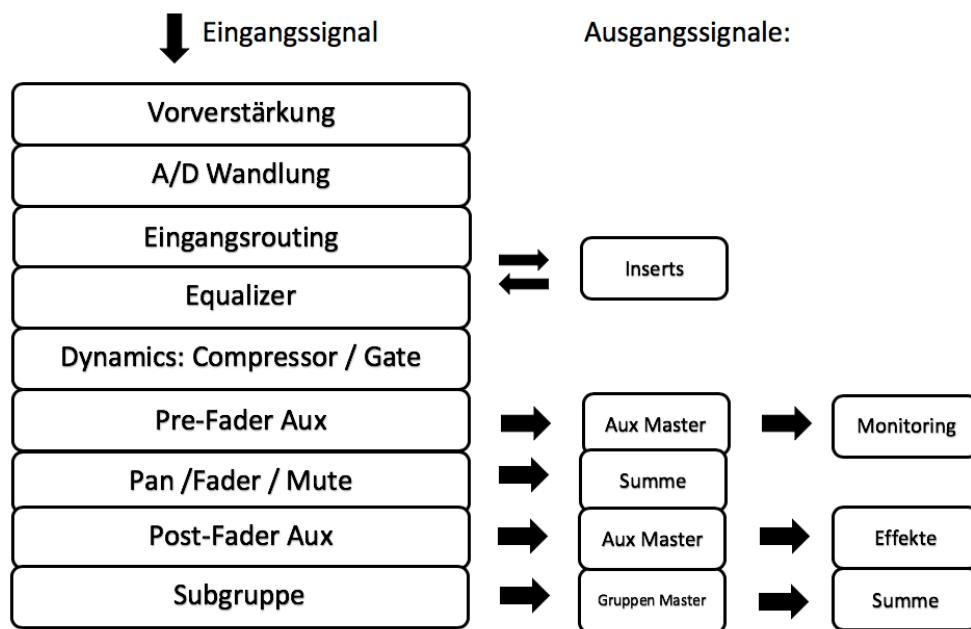
Ende Stunde 9

Delayeffekte: Reflexionen, Tap Delay, Ping Pong Delay, Echo



Phaseneffekte: Phaser, Flanger, Chorus, Whawha, Frequency-Shifter, Autotune

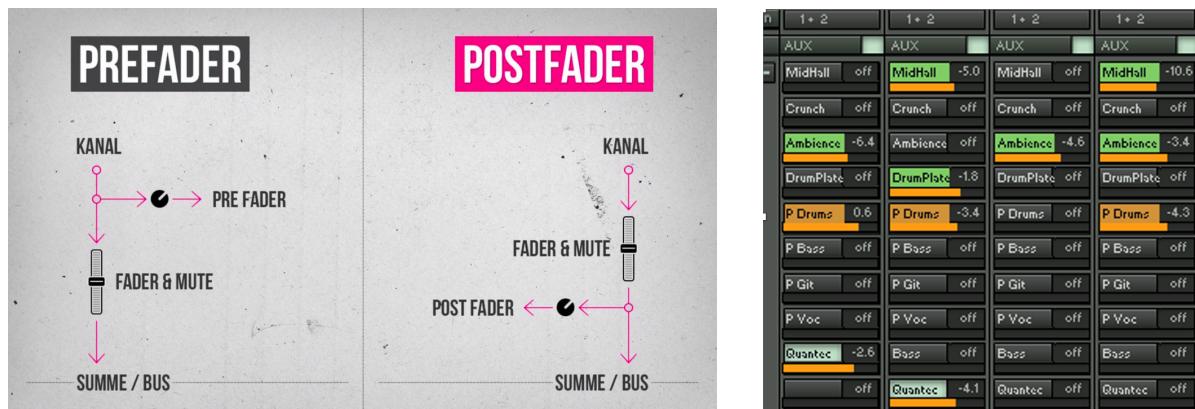


Summensektion:

Auxwege/Sends: zusätzliche Mischungen/Summen/Busse, mono oder stereo, Unterteilung in

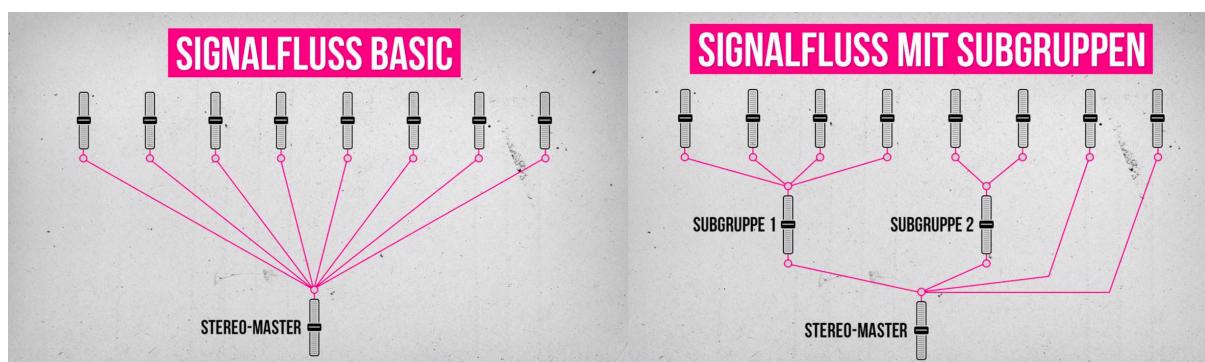
prefader Aux / Sends, z.B für Monitoring

postfader Aux / Sends, z.B. für Ansteuerung von Effekten. Auxwege in einer DAW:

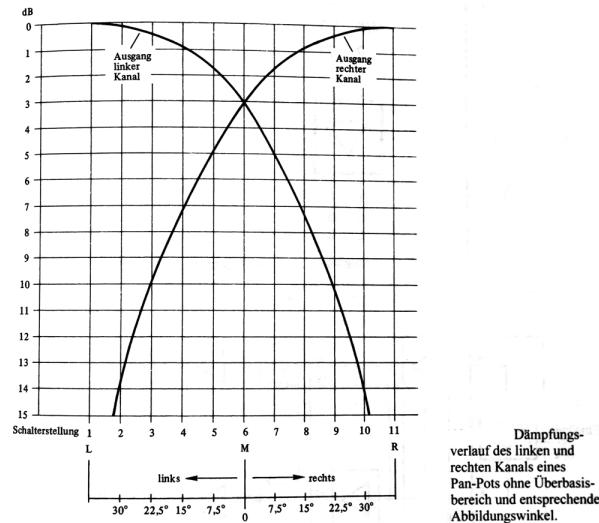


Quelle: Samplitude

Subgruppen: zusätzliche Mischungen, z.B. für Summenkompression, Summenfilterung. Abgriff am Kanal immer nach Panpot und Fader. Gruppen gibt es Mono oder Stereo.



Inserts: Möglichkeit, externe Geräte (EQ, Comp, FX) einzuschleifen,
In einer DAW werden hier **Plugins** in den Kanalzug insertiert.



Panpot: Positionierung der **Phantomschallquelle** zwischen linkem und rechtem Lautsprecher. Es wird nur der **Pegel** zwischen L und R geändert, nicht die Laufzeit.

Quelle: Dickieiter, Handbuch der Tonstudientechnik

Fadersektion in einer DAW:



Fader: Lautstärkeregelung des Kanals/Busses

Mute: Kanal/Busse stummschalten

Solo/ PFL (Pre Fader Listening): Kanäle/Summen einzeln abhören

Masterfader/ Summenfader: Gesamt-Lautstärkeregelung von Bussen, das sind Summen/Auxes/Sends/Gruppen

Ausgangssektion: Outputrouting (wohin fliessen die Signale?):

Routing eines Kanalzuges auf einen Bus.

Routing der Busse auf einen Ausgang des Interfaces.

Quelle: Samplitude

Bearbeitung von:

Klang
Dynamik
Räumlichkeit
Lautstärke

Pultbereiche:

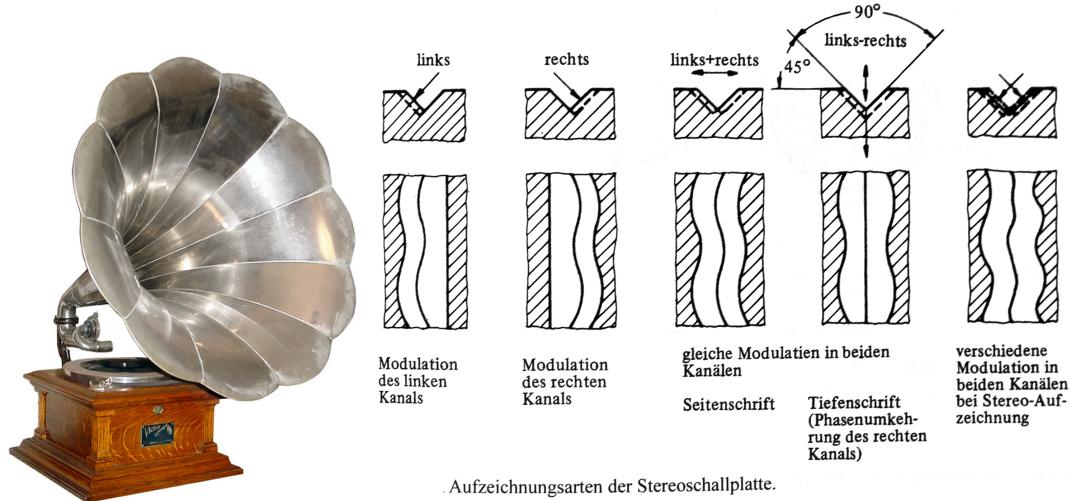
Eingangssektion:
Filtersektion:
Dynamiksektion:
Effektsektion:
Summensektion:
Ausgangssektion:

Werkzeug:

Vorverstärkung, A/D Wandlung, Eingangsrouting
Equalizer: Shelf, Parametrische Filter, High/LowCuts
Kompressoren, Limiter, Gates
Hall, Delay, Phaseneffekte
Summen, Auxes pre und post, Gruppen
Ausgangsrouting

Analoge Aufzeichnung:

Wie wird Ton **analog** gespeichert:
Mechanisch, Edison Grammophon, Plattenspieler:

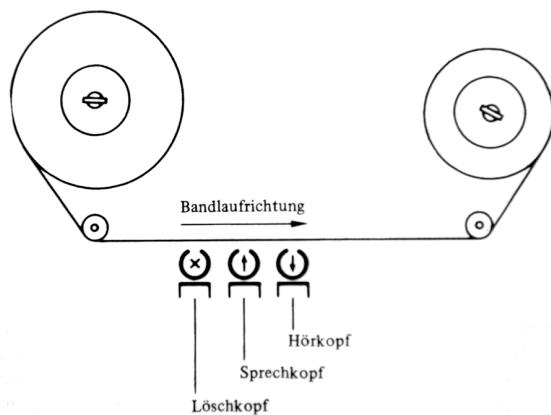


Aufzeichnungsarten der Stereoschallplatte.

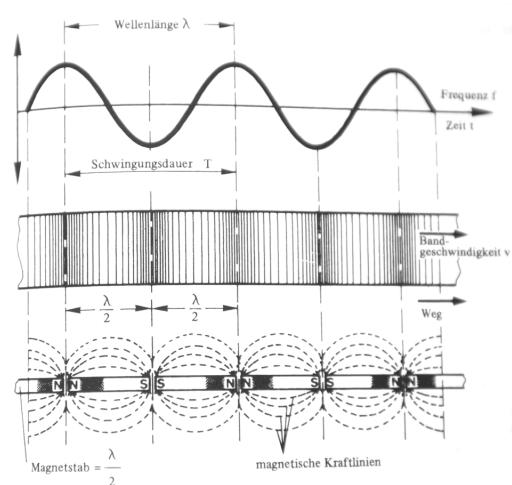
Analoges Tonband:



Prinzip Magnetband:



Prinzip der Magnettonaufzeichnung.



Magnetisch aufgezeichnetes Signal.

Vorteile der analogen Schallspeicherung: Analoge Verzerrungen und Bandkompression werden als warm und schön klingend empfunden.

Nachteile: Rauschen, Abnutzung, Verschlechterung der Qualität bei jeder Kopie, Distribution nur über physikalischen Träger oder Echtzeit-Überspielung.

Digitalisierung eines Signals, Pulsamplitudenmodulation PAM:

Ziel der Digitalisierung: Exaktes Abbild der Schwingung bei möglichst geringem Datenaufkommen.

Wir haben eine Sinusschwingung mit der Frequenz f_0 .

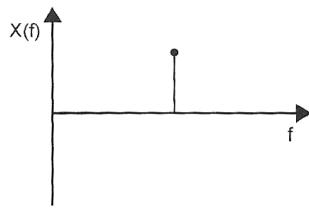
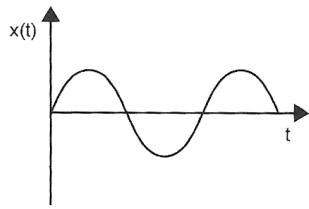
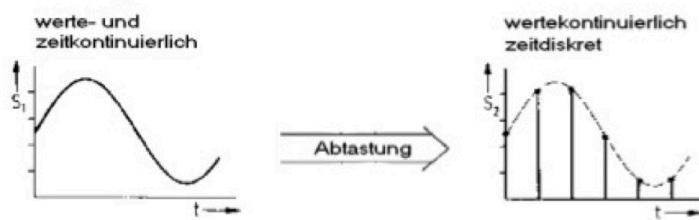


Abb. 11/2. Der Sinuston im Zeit- und im Frequenzbereich.

Dieses Sinussignal wird in regelmässigen Abständen abgetastet (**Samplerate/Samplefrequenz f_s** oder auch **Abtastfrequenz f_a**) und ein **Sample** (Probe) genommen, d.h. die Lautstärke gemessen:

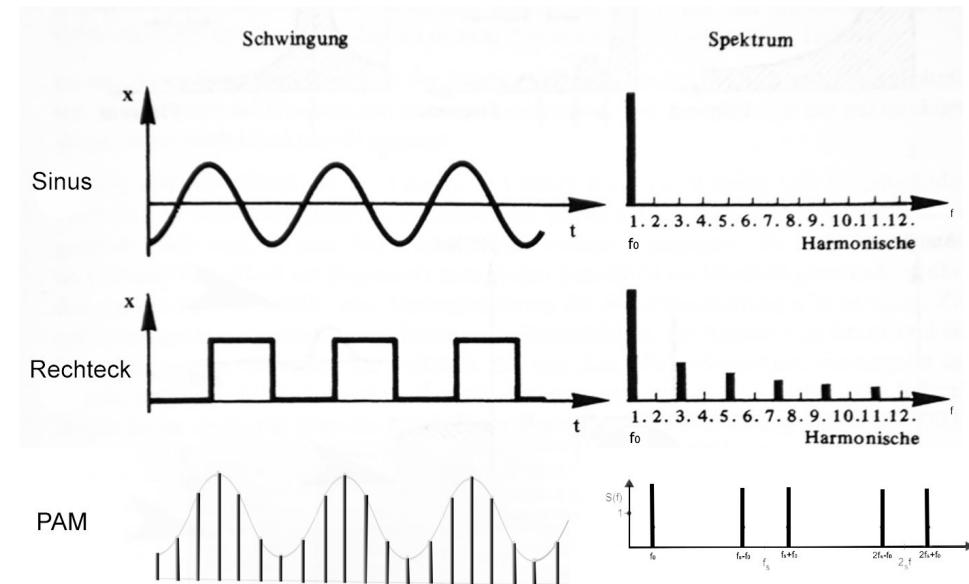


Das Signal besteht nun aus einer Reihe von diskreten Impulsen, die in der Amplitude dem Originalsignal entsprechen -> **Pulsamplituden-Modulation PAM**.

Welche Information ist in diesen Impulsen enthalten?

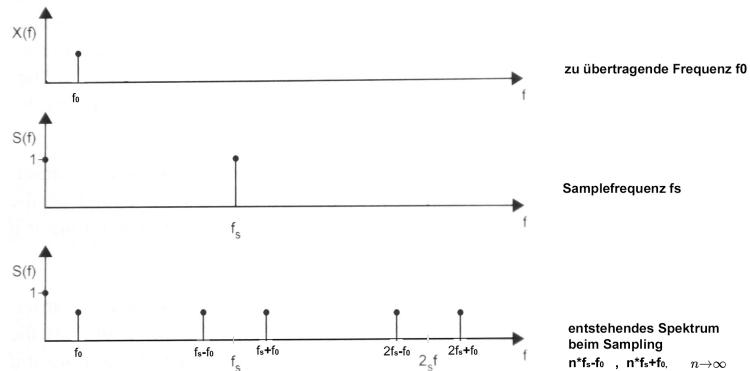
Zur Erklärung folgende Analogie: Ein Sinussignal wird verzerrt, einmal zur Rechteckschwingung, einmal wird es pulsamplitudenmoduliert. Wichtig: Das Signal bleibt trotz Verzerrung periodisch.

Das Prinzip der **Fouriertransformation** besagt: Jede periodische Signalform kann in eine Reihe von harmonischen Einzelfrequenzen zerlegt werden.



Man sieht, dass bei Rechteck und PAM durch die Verzerrung neue Frequenzen hinzugekommen. Es sind zusätzliche Obertöne entstanden.

Das pulsamplitudenmodulierte Signal f_0 abgetastet mit der Samplefrequenz f_s enthält folgende Frequenzanteile:



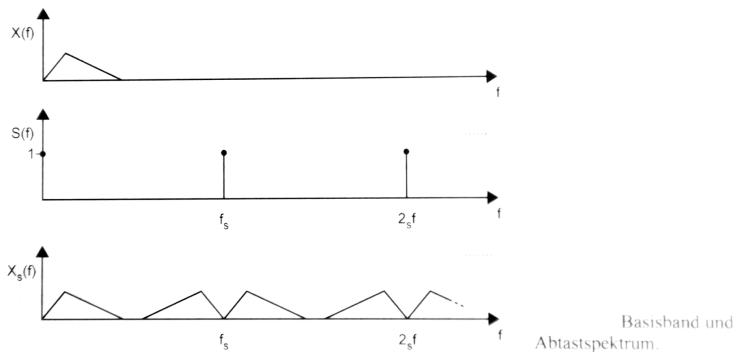
Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudientechnik

Wichtig: Die ursprüngliche Frequenz f_0 ist nach wie vor vorhanden.

Es sind lediglich zusätzliche Frequenzen entstanden. Durch das Samplen ist also keine ursprüngliche Information verloren gegangen.

Das Spektrum erstreckt sich zu höheren Frequenzen hin theoretisch unendlich fort, die Amplitude nimmt dabei kontinuierlich ab. Aufsummiert ergeben all diese Frequenzen das gesampelte, impulsförmige Signal, die PAM.

Das Samplen (**Puls Amplituden Modulation PAM**) funktioniert natürlich auch mit Signalen, die aus vielen Frequenzen bestehen. Das beim Samplen entstehende Spektrum ist dann breitbandiger:

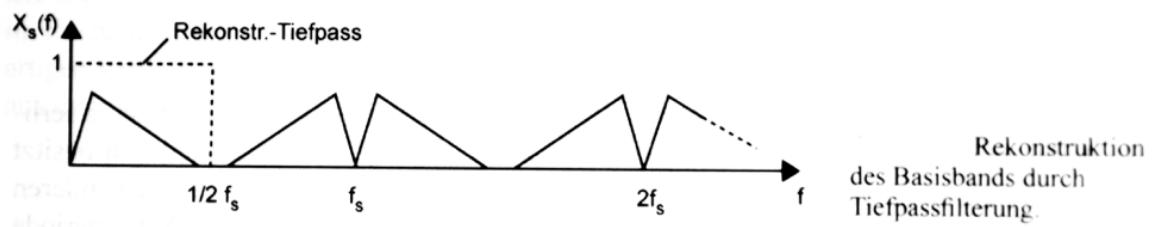


Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudientechnik

Rekonstruktion:

Um das ursprüngliche Signal wieder zu gewinnen, muss man die zusätzlich entstandenen hohen Frequenzen ausschliessen. Dazu wird das gesampelte Signal durch einen **HighCut / Tiefpassfilter** geschickt.

Das Signal muss bei der halben Samplefrequenz f_s , der **Nyquistfrequenz** abgeschnitten werden.



Als Ergebnis erhält man das ursprüngliche Signal **verlustfrei** wieder.

Abtasttheorem / Shannon-Nyquist-Theorem:

Damit das Signal verlustfrei wiederhergestellt werden kann, muss die Abtastrate f_s mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste zu übertragende Frequenz f_{\max} . Das Signal muss also mindestens zweimal pro Schwingungsperiode abgetastet werden.

$$f_s \geq 2 * f_{\max}$$

Was passiert bei **Unterabtastung**, wenn die Abtastrate kleiner als $2 * f_{\max}$ ist?

Schon bei $f_s = 2 * f_{\max}$ ist das Signal nicht sicher rekonstruierbar:

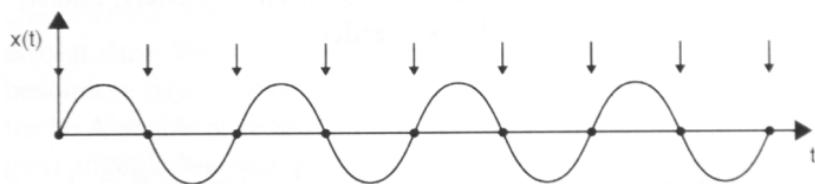


Abb. 11/10. Abtastunsicherheit bei $f_s = 2 f_{\max}$.

Sobald das Shannontheorem nicht mehr eingehalten wird, entstehen Mehrdeutigkeiten bei der Rekonstruktion. Es werden tiefere Frequenzen wiedergegeben, die im Originalsignal nicht vorhanden sind.

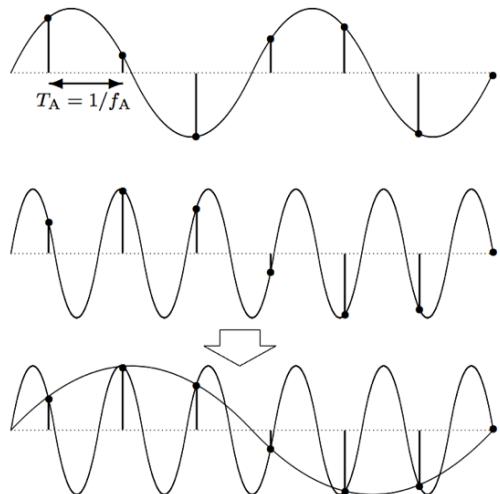


Abb. 5-3: Oben: korrekte Abtastung mit mehr als zwei Stützstellen pro Schwingungsperiode des Signals. Mitte und unten: bei der höheren Signalfrequenz reicht die Abtastrate nicht mehr aus (Unterabtastung); die Stützstellen werden fehlinterpretiert als tieffrequentes Signal (Aliasing)

Das Entstehen von falschen, da fehlinterpretierten Frequenzen nennt man **Aliasing**.
Optisches Äquivalent: Rückwärtsdrehende Räder im Film.

Beispielfilm

Um das Aliasing sicher zu verhindern, wird **vor** der Abtastung ein **Highcut / Tiefpassfilter** als Torwächter eingefügt, das alle Audiofrequenzen höher als die halbe Samplerate ausschließt.

Typische Sampleraten:

CD: 44,1 kHz

Professionelle Digitaltechnik (Studio/Ü-Wagen): 48kHz

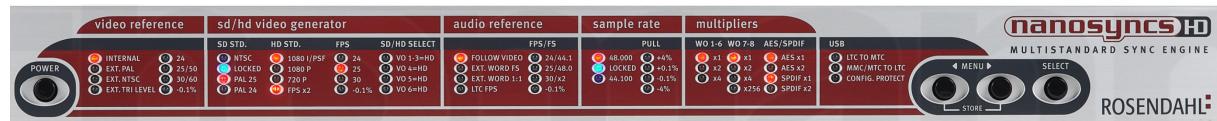
Aktuell auch Verwendung höherer (2 und 4-facher) Abtastraten: 96kHz, 192 kHz

Durch Verdoppelung der Abtastrate und damit der Nyquistfrequenz ist ein einfacherer Aufbau des Rekonstruktionsfilters möglich, da eine geringere Flankensteilheit notwendig.

Clock:

Die Samplefrequenz wird von einem zentralen Taktgeber generiert, der digitalen Clock.

Alle Geräte, die in einem digitalen Verbund arbeiten, müssen mit der gleichen Clock getaktet werden. Meist ist ein Gerät der Clockmaster, oder es gibt einen zentralen Taktgeber, der alle Geräte taktet und damit synchronisiert: Master und Slave.



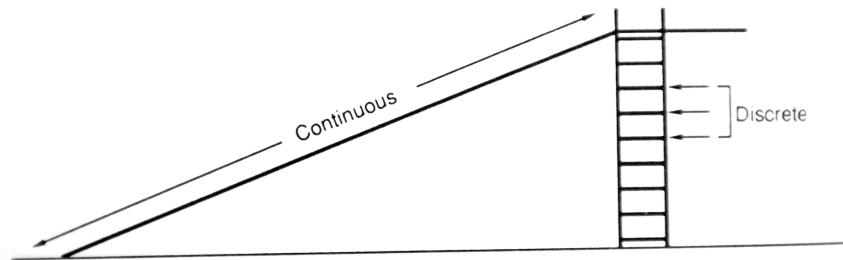
Bei auseinanderlaufenden Clocks kommt es zu digitalen Störgeräuschen, typisch kurzen Knacksern.

Beim Abspielen mit der falschen Samplefrequenz wird das Signal in einer falschen Tonhöhe wiedergegeben.

Ende Stunde 11

Quantisierung:

Bislang war die Amplitude/Lautstärke der analogen Samples unendlich fein aufgelöst. In der digitalen Ebene stehen aber nur eine begrenzte Anzahl von Pegel-Abstufungen zur Verfügung, weil die Datenmenge begrenzt werden muss:



An analog parameter is continuous whereas a quantized parameter is restricted to certain values. Here the sloping side of a ramp can be used to obtain any height whereas a ladder only allows discrete heights.

Nach der Abtastung wird die Amplitude jedes Samples quantisiert, also die Lautstärke gemessen und diese in das vorhandene Stufenraster eingepasst.

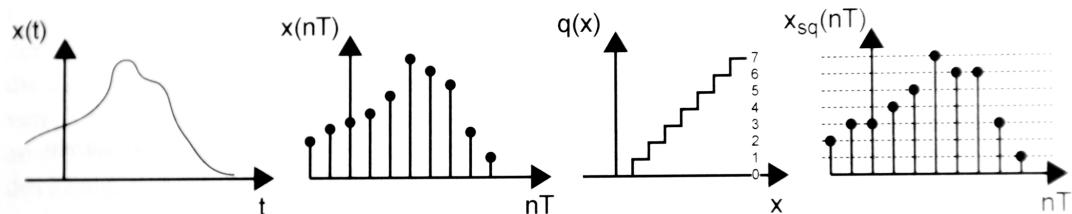


Abb. 11/13. Generierung eines zeit- und wertdiskreten Signals.

Die Anzahl der Werte/Stufen wird definiert durch die Anzahl der bits, also der Datenmenge, die zur **Codierung** zur Verfügung stehen.

Es gibt jedoch nur ganze Werte. Wenn die Amplitude eine Stufe nicht genau trifft, wird die nächstgelegene Stufe/Wert genommen.

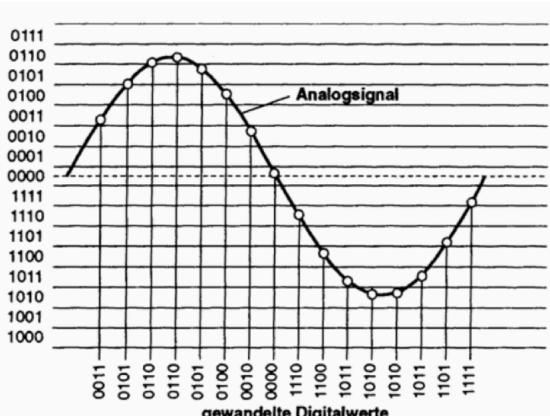
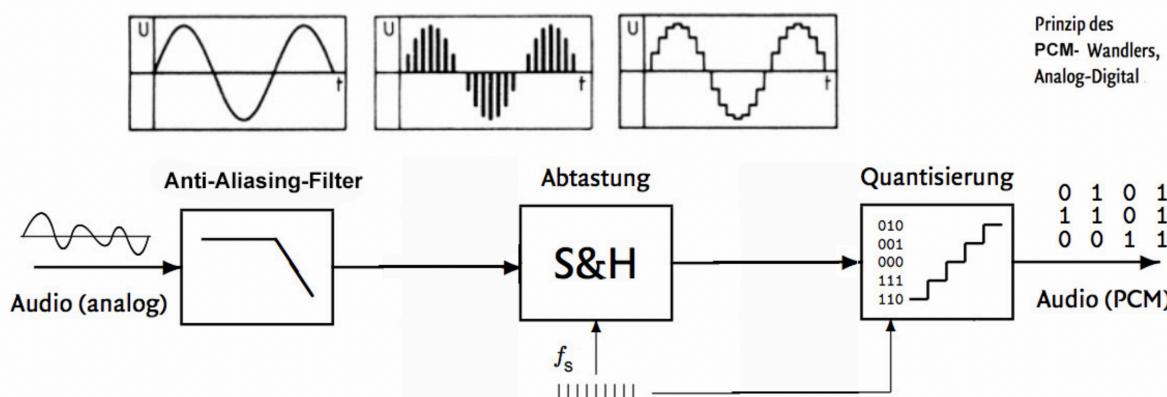


Abbildung 8: Codierung

Technische Umsetzung der Quantisierung: Die abgetastete analoge Signalspannung wird durch eine **Sample+Hold** Schaltung kurz festgehalten, damit der nachgeschaltete Quantisierer Zeit hat, die Amplitude zu messen und digital zu codieren.

Pulse Code Modulationssystem PCM schematisch / Analog-Digital-Wandler:



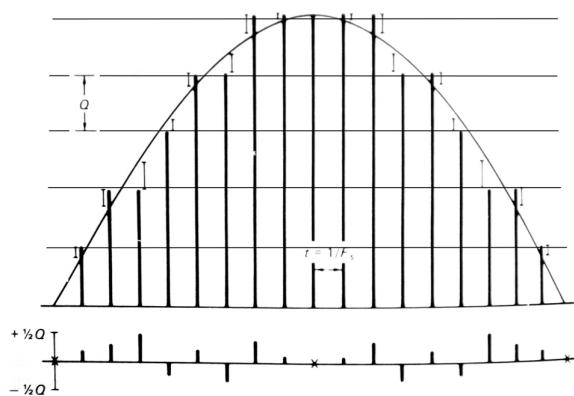
Kurze Wiederholung: Binärzahlen (2 Werte), Dezimalzahlen (10 Werte),

Binary	Decimal
0000	0
0001	1
0010	2
0011	3
0100	4
0101	5
0110	6
0111	7
1000	8
1001	9
1010	10
1011	11
1100	12
1101	13
1110	14
1111	15

Dezimalziffern	Wertigkeit				E
	8	4	2	1	
0					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

Quantisierungsfehler:

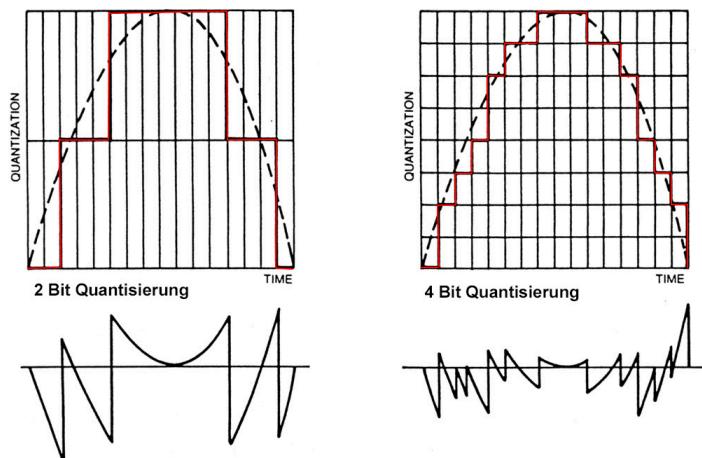
Anders als beim reinen Abtasten/Sampeln (PAM), bei dem das Originalsignal verlustfrei rekonstruiert werden kann, wird beim Quantisieren ein nicht korrigierbarer Fehler in das System eingebbracht:



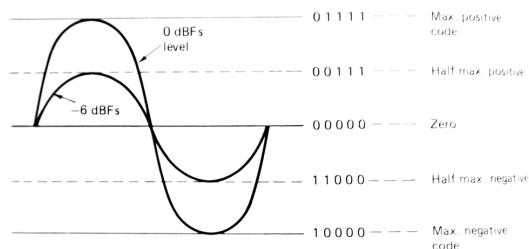
Da das Fehlersignal abhängig vom Eingangssignal ist, wird es nicht nur als gleichmässiges Rauschen, sondern als störendes Frequenzgemisch wahrgenommen: Granularrauschen, Flanger-Effekt.

Drei Möglichkeiten, um den Quantisierungsfehler klein zu halten:

Möglichkeit A: Bitrate hoch: 16 bit->24 bit.



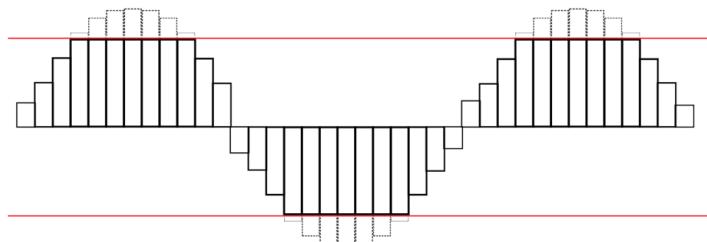
Möglichkeit B: Signal optimal aussteuern, um das Quantisierungsfenster voll auszunutzen, die maximal mögliche Bitanzahl zu benutzen -> möglichst fein aufzulösen.



0 dBFS is defined as the level of the largest sinusoid which will fit into the quantizing range without clipping.

Maximal mögliche Aussteuerung: 0 dBFS = 0dB Full Scale, 1 bit entspricht 6dB Dynamik

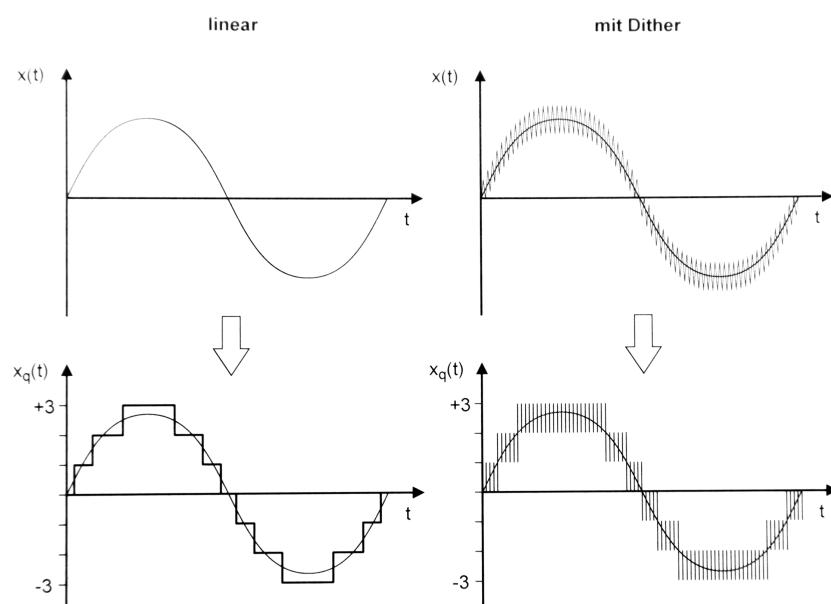
Aber: Keine Übersteuerung -> Signal wird abgeschnitten: **Clipping!** Erzeugt sehr unschöne Verzerrungen.



Quelle: commons.wikipedia.org

Möglichkeit C: Dithering:

Hinzufügen eines zufälligen Rauschsignals mit einer Amplitude von genau einem Quantisierungsschritt, **vor** der Quantisierung.



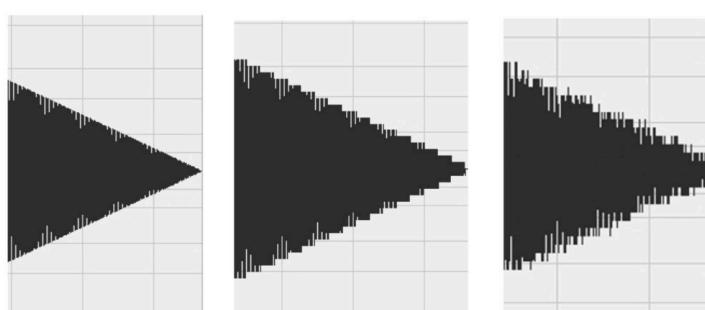
Quelle: Dickreiter, Handbuch der Tonstudientechnik

Da das Dithersignal zufällige Amplitudenwerte aufweist, springt das resultierende Digitalsignal zwischen den benachbarten Quantisierungsstufen hin und her:

-Je näher das zu wandelnde Audiosignal einer Quantisierungsstufe kommt, desto öfter wird genau dieser Wert erreicht.

-Ein Signal, das in der Mitte zwischen 2 Quantisierungsstufen liegt, wird genauso oft mit dem oberen wie dem unteren Wert abgetastet.

Das heisst: Der Mittelwert dieser Werte entspricht dann genauer der tatsächlichen Signalgrösse, als es die vorhandenen Quantisierungsstufen darstellen können.



Quelle: Wikipedia

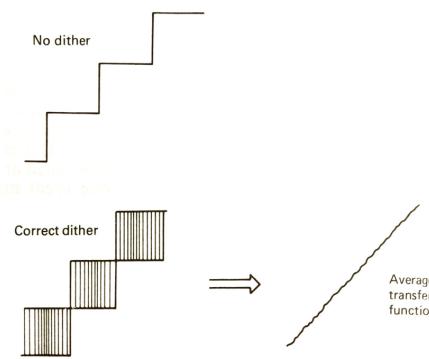
1. Bild: Sinuswelle im Fadeout bei 16 Bit

2. Bild: Sinuswelle im Fadeout bei 8 Bit

3. Bild: Sinuswelle im Fadeout bei 8 Bit mit TPDF-Dither

Wenn man vom geditherten Digitalsignal den **Durchschnitt** nimmt (**averaged transfer function** mit Hilfe eines Tiefpasses/Highcuts), wird die Auflösung feiner, als es die Quantisierungstufen selbst ermöglichen würden.

Nachteil: Das Quantisierungsrauschen ist hörbar. Da dieses Rauschen aber zufällig erzeugt wird, wirkt es nicht störend, im Gegensatz zum Quantisierungsfehler, der abhängig vom Eingangssignal tonale Anteile hat.



Quelle: Watkinson, The art of digital audience

Anwendung von Dithering:

- Immer bei A/D Wandlung vor der Quantisierung
 - Requantisierung bei Wortbreitenreduzierung (24->16 bit)
 - Bei digitaler Filterung zur Verringerung des Rundungsrauschen

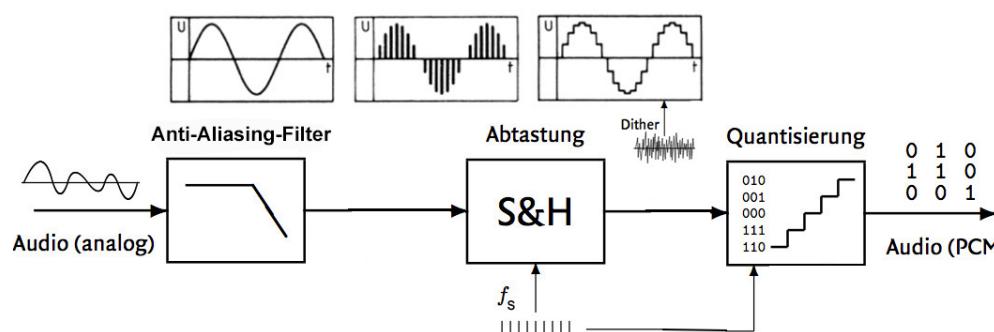
Typische Quantisierungsraten/-wortbreiten/ Bitraten:

CD: 16 bit, entsprechend einer Dynamik von ca. 96dB, Faustformel 6dB pro bit

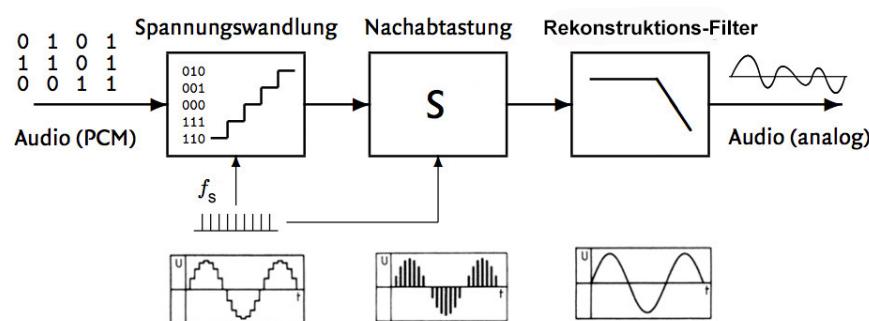
Studio / Ü-Wagen 24 bit, ca. 144 dB

DAW / Pultinterne Rechenraten: 32 bit und höher (floating point)

PCM Schema mit Dithering, A/D und D/A Wandlung:



Prinzip des
PCM Wandlers
Analog-Digital und
Digital-Analog



Vorteile der Digitaltechnik: Kopien sind verlustfrei möglich.
 Fehler des Signals beim Übertragen / Kopieren können durch den Einsatz von **fehlerkorrigierenden Codes** (z.B. parity check) **rekonstruiert** werden. Dies im Gegensatz zur analogen Aufzeichnung, bei der beim Kopieren eine Verschlechterung des Signales eintritt.

Probleme: Jitter: Abtastfrequenz = Digitaler Takt = Wordclock ist nicht gleichmäßig:

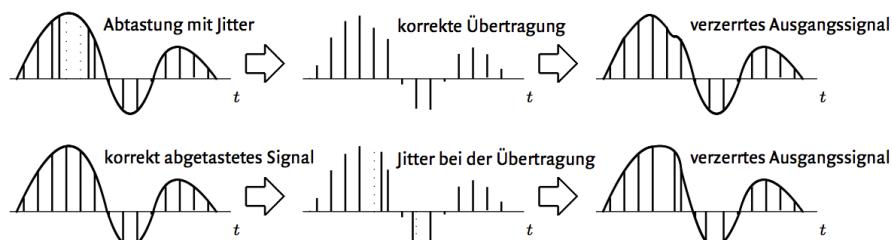


Abb. 7-14: Wirkung von Jitter bei der A/D-Wandlung und bei der digitalen Übertragung auf das rekonstruierte Signal

Datenreduktion:

Psychoakustisch basierte Datenreduktionsverfahren entfernen für Hörer irrelevante Informationen. Dadurch Reduzierung der Datenrate möglich. mp3 Fraunhofer Institut

Maskierung/Verdeckung:

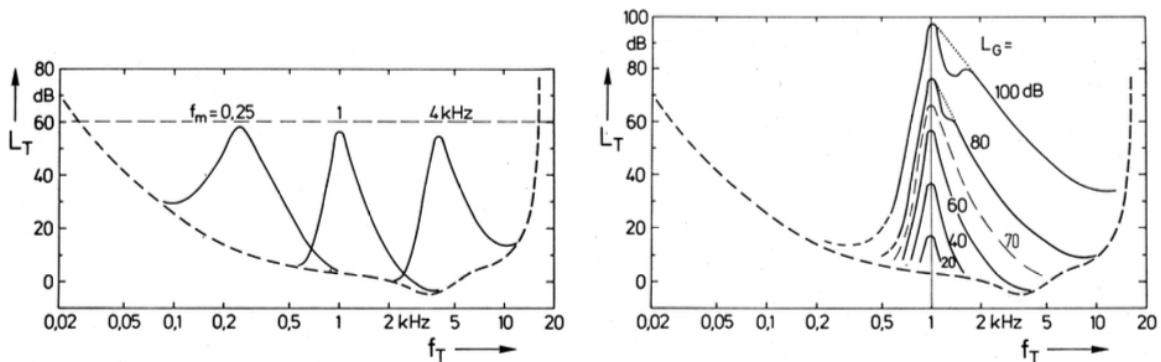
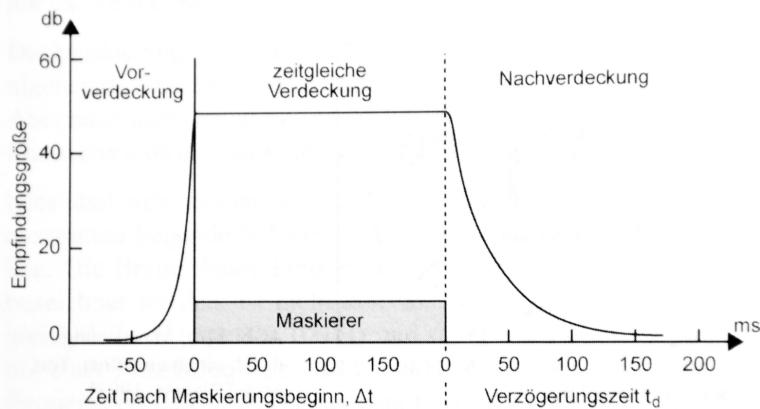


Abb. 3-11: Spektrale Verdeckung durch Schmalbandrauschen; links: Mithörschwellen bei unterschiedlichen Maskerfrequenzen, rechts: Mithörschwellen bei unterschiedlichen Masker-Pegeln (aus: Zwicker 1982)

Es gibt nicht nur zeitgleiche Verdeckung/Maskierung, sondern auch Maskierungseffekte vor und nach dem Einsatz des Maskierers: **Vorverdeckung** und **Nachverdeckung**:



Was nicht gehört werden kann, wird entfernt -> Reduzierung der Information
 -> Reduzierung der Datenrate.

Was passiert, wenn das Signal nach der Datenreduktion bearbeitet wird?
 Vormals redundante Information fehlt und kann nicht wiederhergestellt werden
 -> „Löcher“ im Frequenzgang.

Datenreduktion darf deshalb nur für den Endverbraucher eingesetzt werden, niemals im professionellen Bereich!

Beim Datenreduzieren entstehen Artefakte: Vorechos, Aliasing, Zwitschern, Granularrauschen, fehlerhafte Höhenwiedergabe. Je stärker die Datenreduktion, je stärker die Artefakte.

Für Musik in mp3 minimal 192 kbit/s, besser 320 kbit/s. Sprache minimal 96kbit/s.

Gängige **PCM Digitalformate** (nicht datenreduziert) :

Computer-Datenformate: **.wav** (Windows) / Broadcast-wav (mit timestamp) / **.aif** (Mac) / **FLAC** (Free lossless Audio Codec)

AES/EBU (Audio Engineering Society/European Broadcast Union):
 XLR Norm, 2-kanalig, bis zu 96k, 24 bit

S/PDIF (Sony Philips Digital Interface): kompatibel zu AES/EBU, Chinch, kein Studionormpegel

MADI, AES 50, AES 67: Multikanal Datenformate auf Basis des AES/EBU Signals, meist 64 Kanäle, Übertragung über Coaxial Leitungen, Glasfaserleitungen, Cat 5 Leitungen.
 48/96 kHz, 24 bit.

Dante/AVB **Audio Video Bridging**: Bis zu 128Ch Audio, kann aber mittels Standard-Netzwerkgeräten übertragen werden, Matrix.

Datenreduktionsverfahren: MP3, AC-3, DTS, MPEG-2/4, MPEG-H

Standards werden von der Moving Pictures Expert Group (MPEG) definiert.

Einsatz überall dort, wo niedrige Datenraten gefragt sind:
 Musikaustausch über Internet, Streaming, Filmtonstandards wie Dolby Digital, DTS, Digitaler Satellitenrundfunk.

Datenraten/Anwendungen:

MP3: 64-384 kBit/s (Stereo). De facto Standard für Musikdatenreduktion

AC-3: 64-640kBit/s pro Kanal. Dolby Digital Mehrkanalfilmton

DTS: 176,4 kBit/s pro Kanal. Filmton DTS, Audiocodecs

MPEG-4: 64kBit/s-200kBit/s. Objektorientierte Codierung für Musik und Sprache

MPEG-H: Aktueller Standard für Mehrkanal-Filmton, objektbasiert

Quellenangaben:

Gerhard Bore:	Mikrophone, Arbeitsweise und Ausführungsbeispiele, Georg Neumann GmbH Berlin, 4.Auflage 1999
Dickreiter e.a.:	Handbuch der Tonstudientechnik, Bd.I+ II, 8. Aufl. München 2013
Görne, Thomas:	Tontechnik, Carl Hanser Fachbuch, München, 4. Auf. 2014
Henle, Hubert:	Das Tonstudio-Handbuch, Carstensen. München, 2001
Katz, Bob	Mastering Audio, GC Carstensen Verlag 2012
Watkinson, John:	The Art of Digital Audio, Focal Press, 2004
Webers, J.:	Handbuch der Tonstudientechnik: Analoges und digitales Audio Recording bei Fernsehen, Film und Rundfunk, Franzis, 2007