

4. Audiotechnik und Tonbearbeitung

4.1 Grundlagen der Audiotechnik



4.2 Analoge Audiotechnik

4.3 Mehrkanaltechnik

4.4 Digitale Audiotechnik

4.5 Digitale Rundfunktechnik **ONLINE**

4.6 CD und verwandte Speichertechnologien **ONLINE**

Literatur:

Th. Görne: Tontechnik, 3. Auflage, Hanser 2011

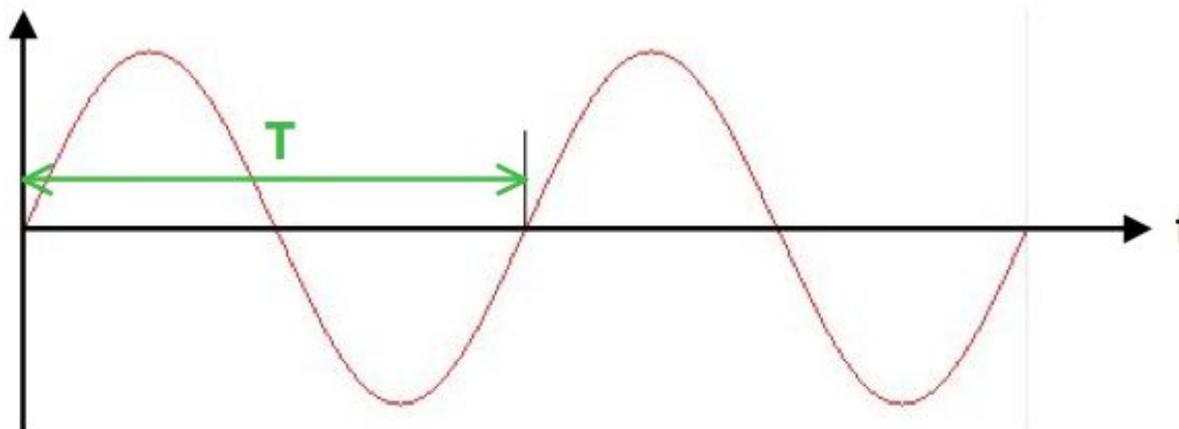
H. Raffaseder: Audiodesign, 2. Auflage, Hanser 2010

Ton & Frequenz (Wiederholung)

Akustischer Reiz entsteht durch (schnelle) Luftdruckschwankung

- unregelmäßig --> *Geräusch*
- periodisch: wird als *Klang* wahrgenommen

Periodendauer T in Sekunden, Frequenz f in Hz = $1/s$



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

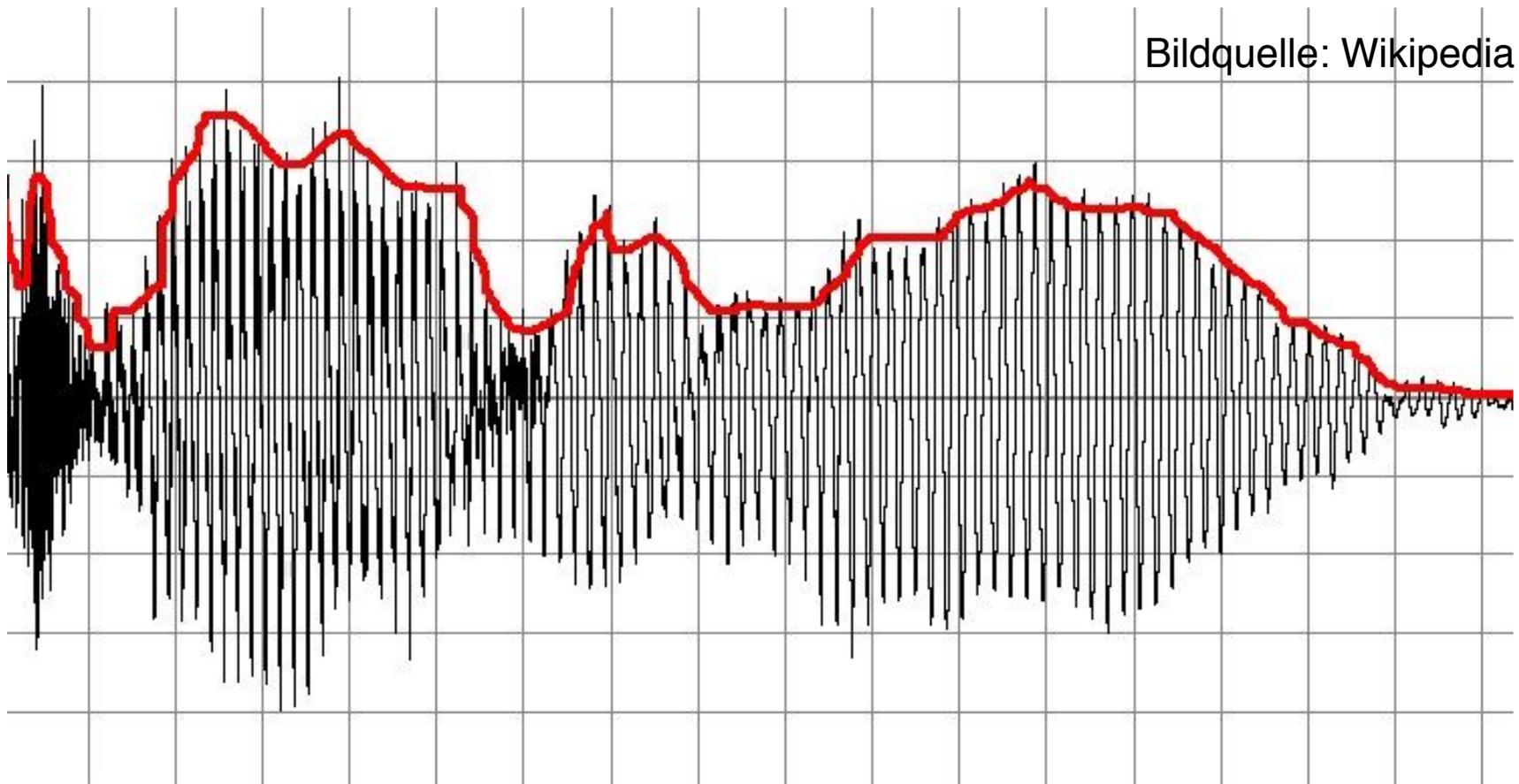
$$1 \text{ Hz} = 1/s$$

Sinus-Signal

- **Geräusch:**
 - nur Lautstärke wahrnehmbar
- **Klang:**
 - Harmonische Überlagerung von Sinusschwingungen
 - Tonhöhe: Grundfrequenz
 - Klangfarbe: Frequenzspektrum

Signal & Hüllkurve

Die *Hüllkurve* verbindet die Pegelspitzen eines Signals
in manchen Folien dieser Vorlesung sind nur Hüllkurven gezeigt!



4. Audiotechnik und Tonbearbeitung

4.1 Grundlagen der Audiotechnik

4.2 Analoge Audiotechnik 

4.3 Mehrkanaltechnik

4.4 Digitale Audiotechnik

4.5 Digitale Rundfunktechnik **ONLINE**

4.6 CD und verwandte Speichertechnologien **ONLINE**

Literatur:

Th. Görne: Tontechnik, 3. Auflage, Hanser 2011

H. Raffaseder: Audiodesign, 2. Auflage, Hanser 2010

Frühe Grammophone



Zylinder-Phonograph
Edison 1899 (Bild: Wikipedia)

Grammophon von E. Berliner, 1887 (Modell)
(Phonomuseum St.Georgen/Schwarzwald)



Geschichte der analogen Audiotechnik

1877, T.A. Edison: Phonograph

1885, Emil Berliner: Schallplatten (aus Gummi und Schellack)

1898, Waldemar Poulsen: Magnetische Aufzeichnung (auf Draht)

Um 1900: „Systemkampf“ zwischen (Edison-)Walze und Schallplatte

Ca. 1920: Rundfunk, elektrische Wiedergabe (Kopfhörer, Lautsprecher)

1927: Langspielplatten mit elektrischer Technik (von Edison)

1935: Magnetontechnik

1948, Ampex: Tonbandmaschinen für Rundfunkstudios

1950: Standard-Schallplatten mit 16, 33 1/3, 45 und 78 rpm

1961: Transistortechnik in der Unterhaltungselektronik

1963, Philips: Compact Cassette Tape Cartridge

1971, Dolby: Rauschunterdrückungsverfahren

1979, Sony: Walkman

Ton als analoges elektrisches Signal

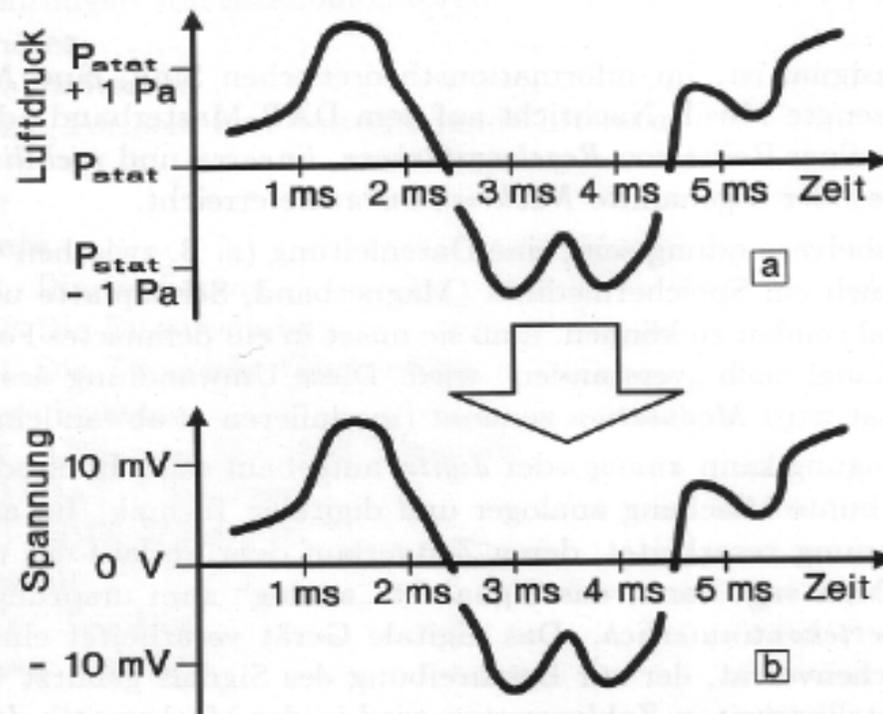
Audiotechnik:

Signal meist gleichbedeutend mit Spannungsveränderung

Grundfunktion eines Mikrofons:

Umsetzung von Luftdruckschwankungen in Spannungsschwankungen

Ausgangssignal eines Mikrofons ist eine *Wechselspannung*



Impedanz

- *Impedanz (Wechselstromwiderstand):*
Widerstand elektronischer Schaltungen ist *frequenzabhängig*
Komponenten:
 - kapazitiv:*
Kondensatoren (Auf- und Entladung)
Höherer Widerstand bei niedrigen Frequenzen
 - induktiv:*
Spulen (Induktion von Magnetfeldern)
Höherer Widerstand bei hohen Frequenzen
 - ohmsch:*
Frequenzunabhängiger Widerstand
- *Nennimpedanz:*
Wechselstromwiderstand bei fester Frequenz (z.B. 1 kHz)
- *Impedanzanpassung:*
Ausgangsimpedanz im zulässigen Bereich der Eingangsimpedanz
Eingangsimpedanz Verstärker/Mischpult: Typisch 2 k Ω
Eingangsimpedanz eines Lautsprechers: Typisch 4 Ω

Pegel

Bezugspegel: Basisgröße für Messung in dB (deziBel)

0 dBm = 1 mW an 600 Ohm, entspricht 0.775 V (Herkunft: Telefontechnik)

0 dBu = 0.775 V (*unloaded*, wegen Spannungsanpassung niedrige Last)

Arbeitspegel: „Sicherer“ Pegel deutlich unterhalb des Maximalpegels

4 dBu = 1.228 V (internationaler Studiopegel)

6 dBu = 1.55 V (europäischer Studiopegel)

(Consumergeräte: 0,316 V)

Headroom = Maximalpegel – Arbeitspegel

Typischer Maximalpegel 21 dBu

Typischer Headroom 15 dBu

**Erinnerung an
Digitale-Medien-
Vorlesung**

$$\log(2) = 0.301029996$$

Amplitudenpegel (effektive Amplitudenwerte):

$$L_P = 10 \cdot \log\left(\frac{V_A^2}{V_E^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_A}{V_E}\right)$$

Verdopplung: $L_{P'} = 20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot V_A}{V_E}\right) = 20 \cdot \log(2) + L_P = 6 + L_P$

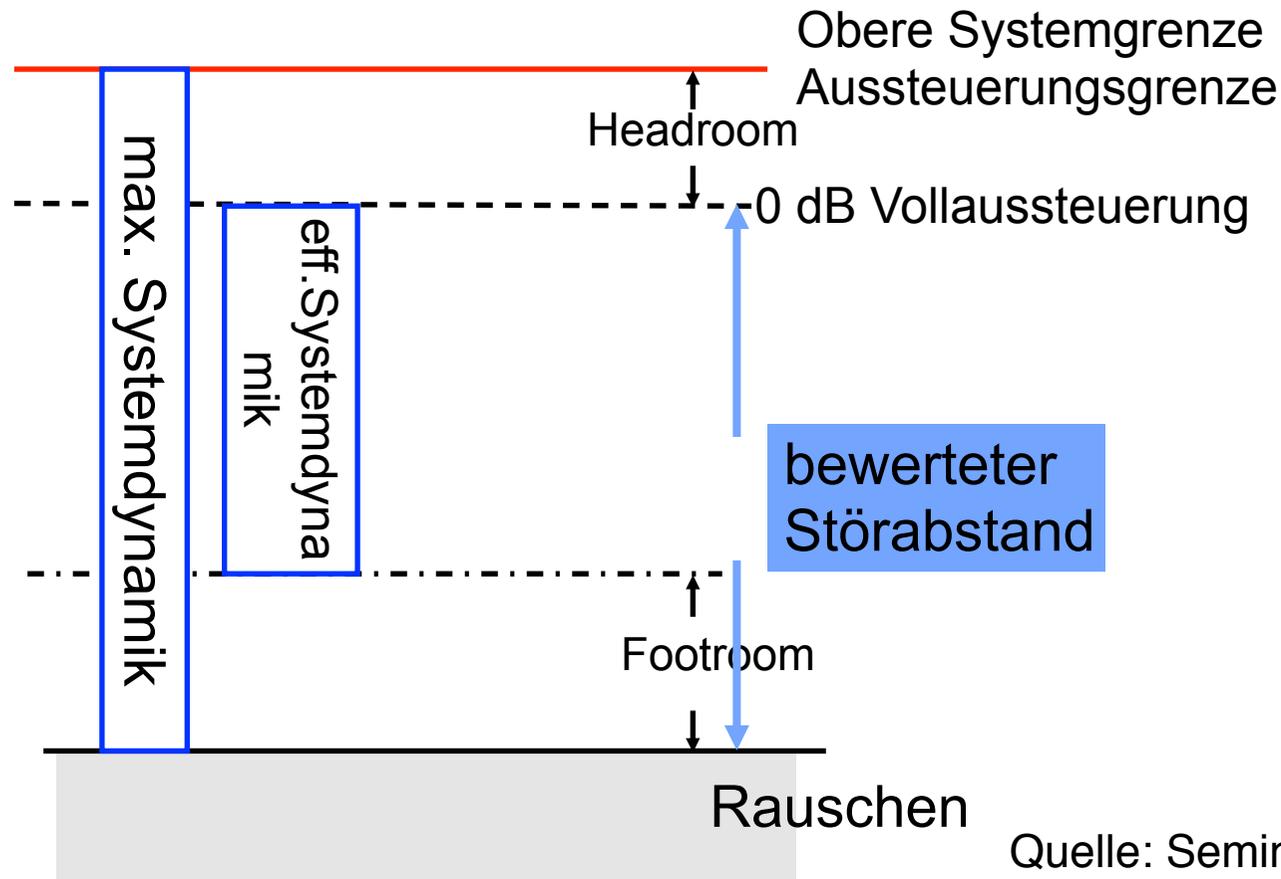
Pegel und Aussteuerung

Risiken bei Audioaufnahmen:

- *Übersteuerung* = Verzerrung
- *Untersteuerung* = zu geringer *Rauschabstand*



Peakmeter



Aussteuerungsanzeige zeigt üblicherweise in “dBVU” an, d.h. 0 dBVU = Arbeitspegel (= z.B. 6 dBu)

Arbeitsbereich abhängig von Gerätetechnologie (z.B. -40 dB VU bei analogem Bandgerät)

Quelle: Seminar E-Technik Uni Erlangen

Grundprinzipien der Schallwandlung

Generell alle Prinzipien für beide Richtungen
(d.h. Schall -> Spannung und Spannung -> Schall) anwendbar

Elektrostatisch:

Veränderliche Kapazität eines Kondensators
Membran bildet eine der Kondensatorplatten

Elektrodynamisch:

Induktionsprinzip
Entweder Membrane leitfähig und im Magnetfeld bewegt
Oder Spule an Membrane befestigt (in konstantem Magnetfeld)

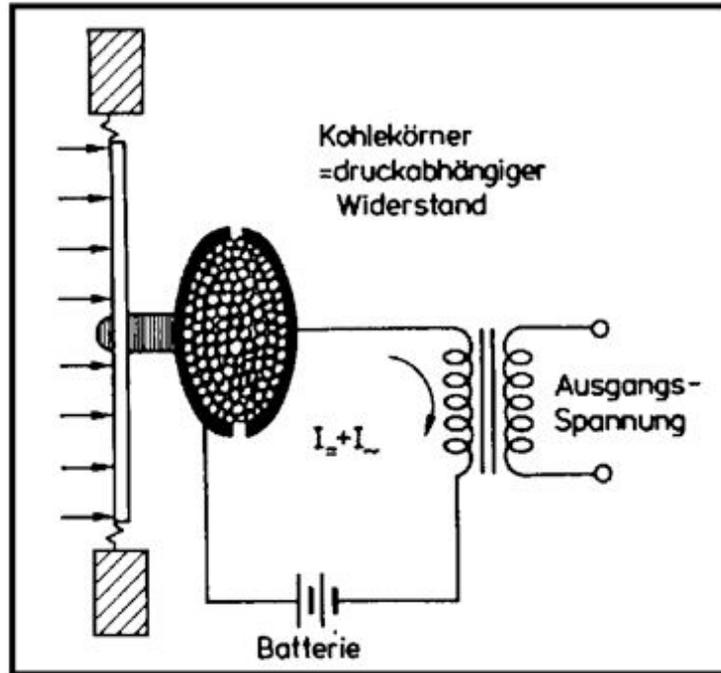
Piezoelektrisch:

Materialien (kristallin, keramisch), bei denen durch Verformung
Spannung erzeugt wird
Effekt temperaturabhängig

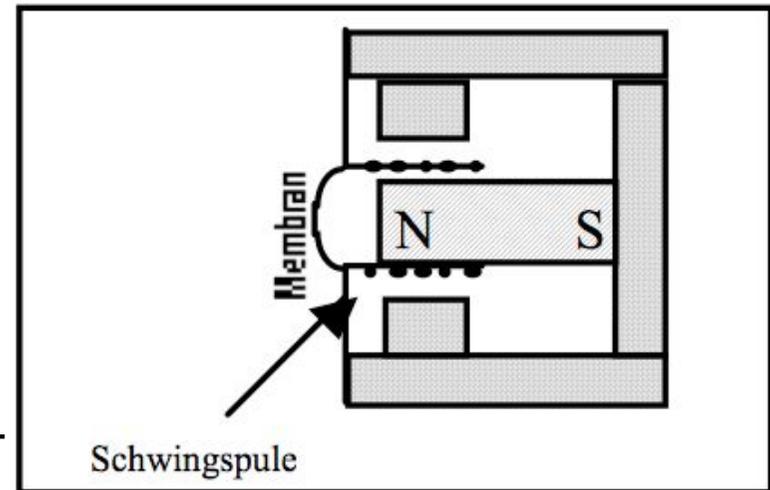
Potentiometrisch:

z.B. Kohlewandler: Membran drückt auf mit Kohlestaub gefüllte Dose
Widerstand verändert sich mit Druck

Mikrofontypen (Beispiele) (1)



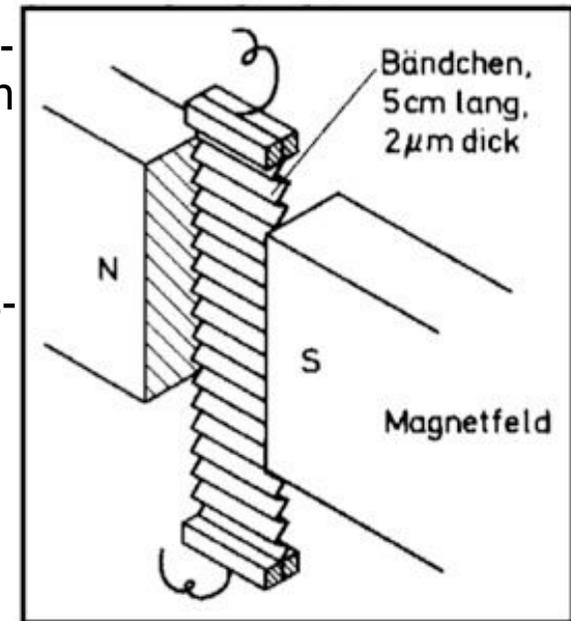
Kohlemikrofon
 (preisgünstig, nicht im Studio- oder HiFi-Bereich; typische Anwendung: ältere Telefonmikrofone)



Tauchspulen-Mikrofon

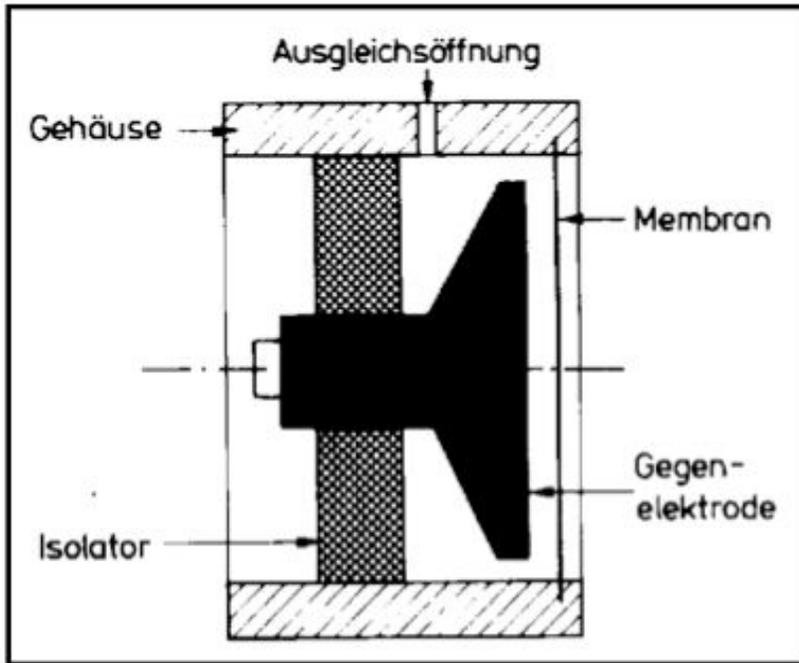
Bändchen-Mikrofon

elektrodynamische Mikrofone
 (robust, gutes Preisleistungsverhältnis; oft auf bestimmte Frequenzbereiche spezialisiert)

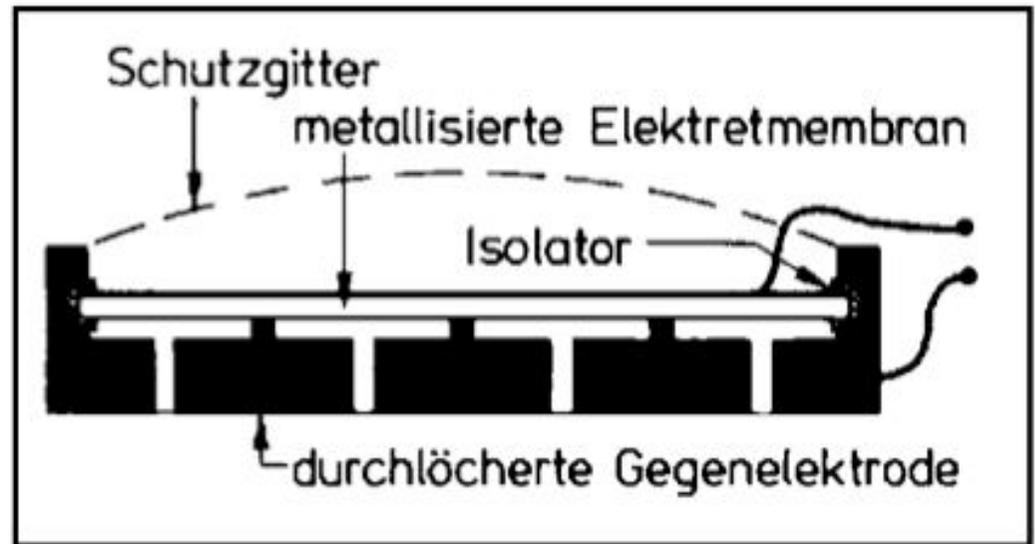


Quelle: Jürg Jecklin, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

Mikrofontypen (Beispiele) (2)



Kondensator-Schalldruckempfänger (hervorragend in Frequenzgang und Empfindlichkeit, teuer, benötigt Vorspannung als "Phantomeinspeisung")



Elektret-Kondensatormikrofon mit vorpolarisierter Folie (Elektret) (klein, wesentlich schlechtere Qualität, unterliegt Alterung, preisgünstiger, keine Vorspannung)

Quelle: Jürg Jecklin, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

Weitere Mikrofontyp Unterscheidungen

Freifeldmikrofon:

Auf Stativ oder in der Hand

Grenzflächenmikrofon: (siehe Abbildung)

Direkt an Wänden, Tischen, Böden

Vermeidet Interferenzen mit Reflexionen

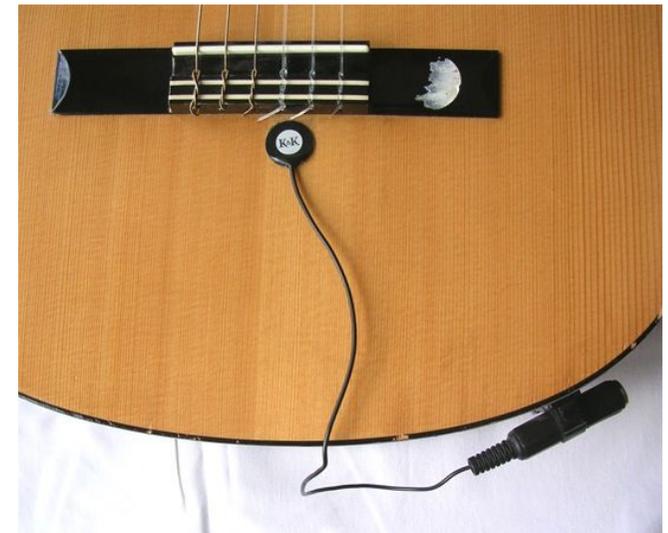
meist Kondensator- oder Elektretmikrofone

Tonabnehmer für Körperschall

(Manchmal “Pick-Up-Mikrofon” genannt)

zur Befestigung am Instrument (z.B. Gitarre)

nimmt nur Instrumententöne auf

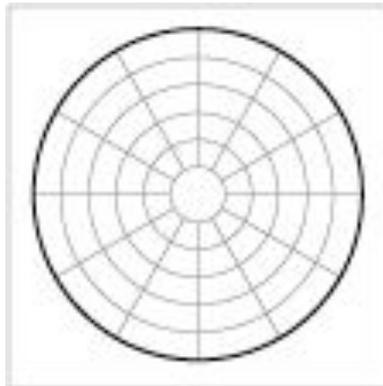


Bildquelle: Wikipedia

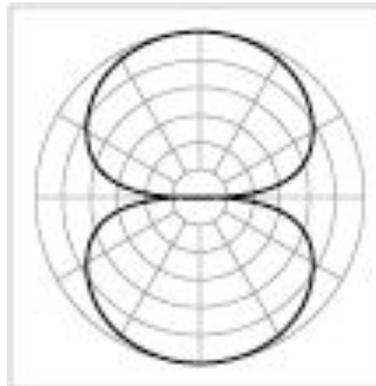
Richtcharakteristiken (1)

Polardiagramm:

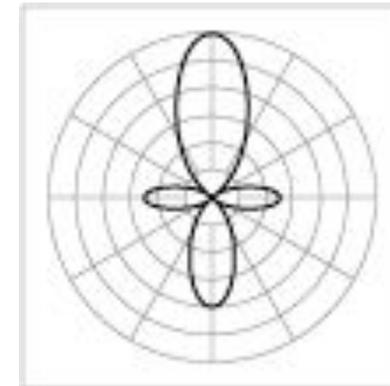
Darstellung der Empfindlichkeit für Schall aus verschiedenen Richtungen



Kugel
(Omnidirektional)



Acht
(Bidirektional)



Keule
(Direktional)

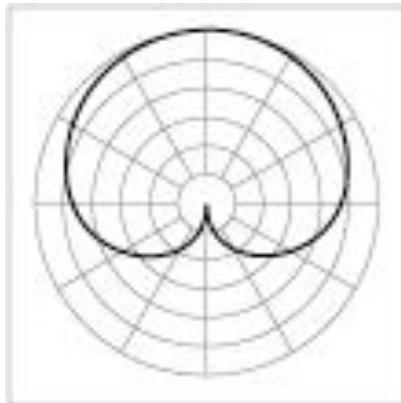
Richtmikrofon: Empfindlich v.a. in einer Richtung
(Keulencharakteristik + Bauform)

Bildquelle: Wikipedia

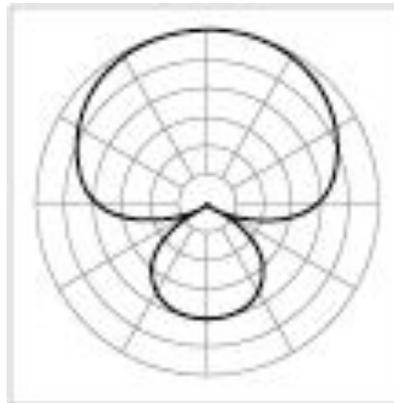
Richtcharakteristiken (2)

Polardiagramm:

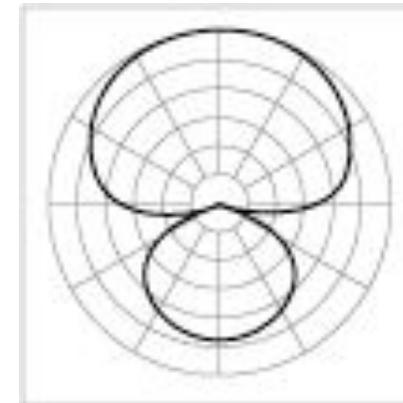
Darstellung der Empfindlichkeit für Schall aus verschiedenen Richtungen



Niere
(*Cardioid*,
unidirektional)



Superniere
(*Supercardioid*)



Hypernieren
(*Hypercardioid*)

Bildquelle: Wikipedia

16

Wofür welches Mikrofon?

Kugelcharakteristik: “Rundum-Mikrofone”

- Einfangen von Atmosphäre

- Nimmt auch Umgebungsgeräusche mit auf

- Eingebaute Kameramikrofone haben oft Kugelcharakteristik

Nieren-, Supernieren-, Keulencharakteristik

- Gezieltes Aufnehmen einer Quelle

- Kann Störgeräusche ausblenden

- Sprecher, Dialog, Interview

Charakteristik bei hochwertigen Mikrofonen oft umschaltbar

Mikrofonierung

Auswahl von

Mikrofontyp

Richtcharakteristik

Platzierung zur Schallquelle

Raummikrofone vs. Einzelmikrofone (oft beides)



Problemfelder:

Nahbesprechungseffekt (Anhebung tiefer Frequenzen)

Interferenz zwischen Direktschall und Reflexionen

Wind- und Popp-Geräusche —> Poppschutz

Trittschall

Aussteuerung (Distanzen berücksichtigen)

Sprecher nahe am Mikrofon, kein Poppschutz

Sprecher unter Mikrofon, mit Poppschutz

Lautsprecher

Meistverbreitete Lautsprecherbauweise:
elektrodynamisches Prinzip

Bauformen:

Konuslautsprecher

konzentrische Schwingungen
vor allem für tiefe Frequenzen

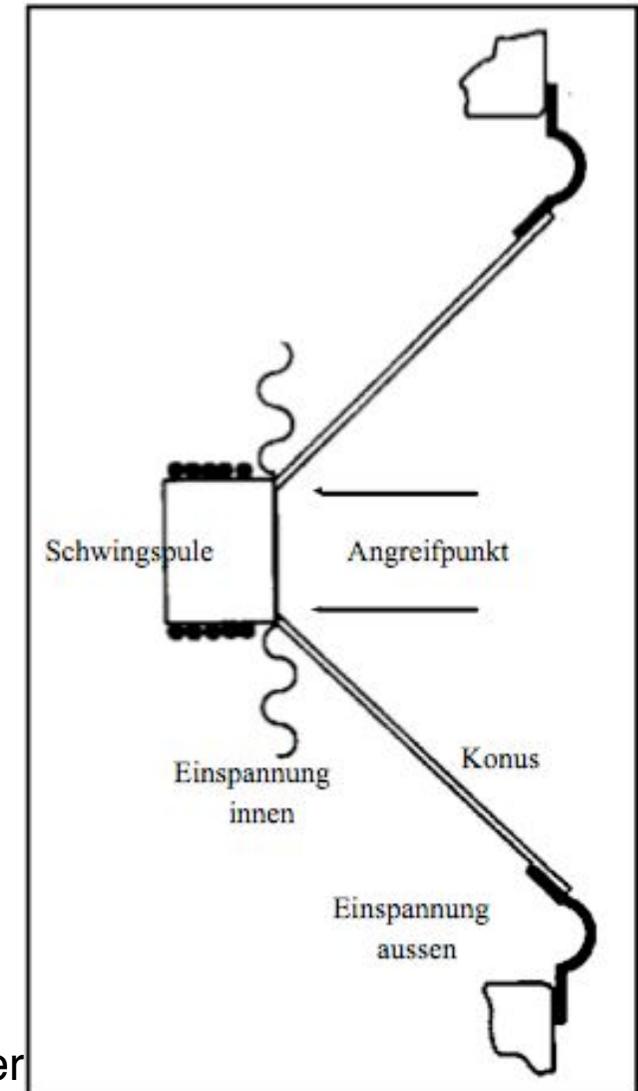
Kalottenlautsprecher

kolbenförmige Schwingung
vor allem für hohe Frequenzen

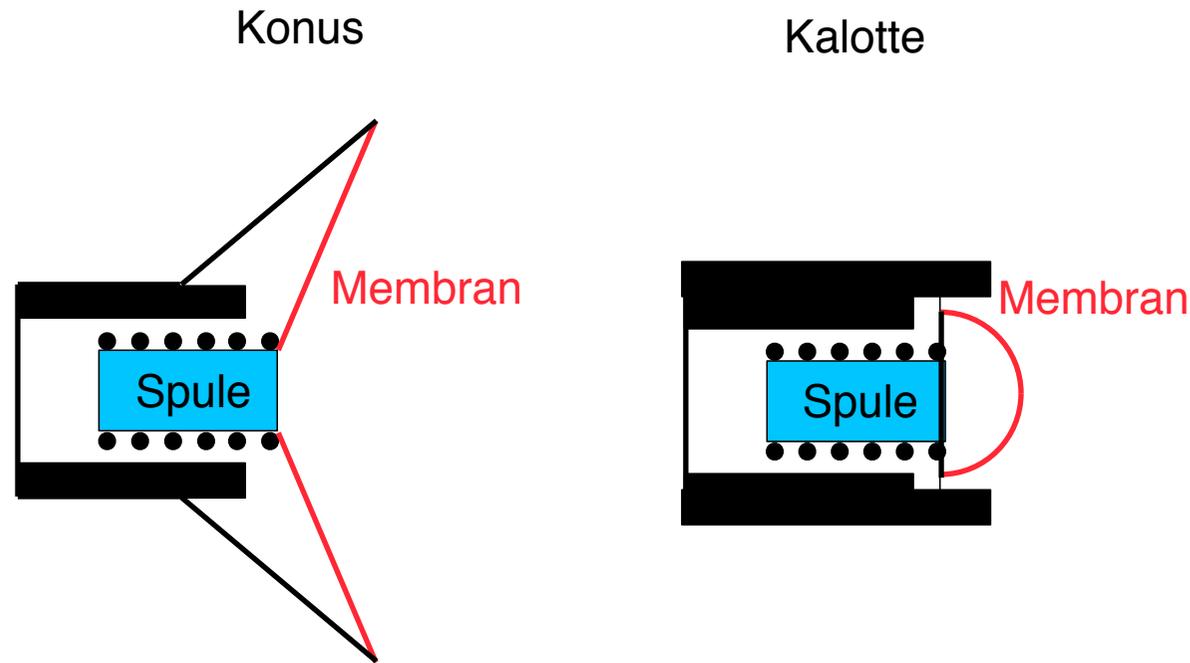
Druckkammerlautsprecher

Trichter als akustischer Verstärker ("Horn")
Stark gebündelte Richtcharakteristik

Konuslautsprecher



Konus- und Kalottenlautsprecher



Lautsprecherbox:

mehrere verschiedenen Einzellautsprechern mit "Frequenzweiche"
z.B. Hochtöner, Mitteltöner, Tieftöner

Box vermeidet "akustischen Kurzschluss" (sofortigen Druckausgleich)

(Bass-)Reflexbox

Einbau in Gehäuse:

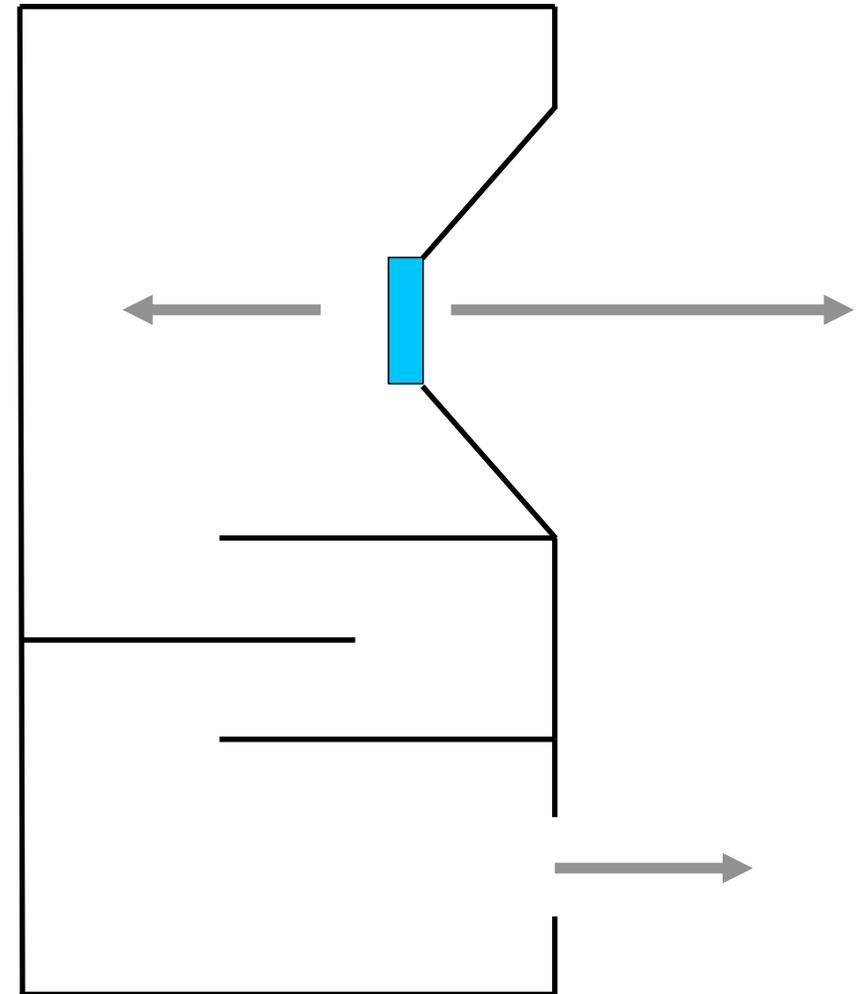
Verlust von ca. 50% der Schallenergie

Reflex-Lautsprecher:

rückwärtige Schallkompression

umgelenkt nach vorne

(besserer Wirkungsgrad)



Anschlussstechnik: Leitungen

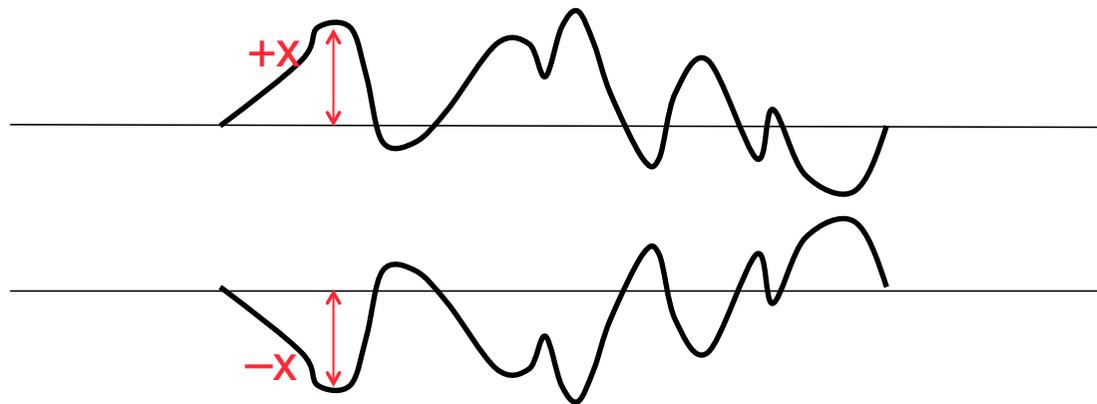
Leitungen grundsätzlich abgeschirmt
unsymmetrisch (*unbalanced*):

- » Eine signalführende Leitung
- » Abschirmung = Erdung = Nullpotential für Signal
- » geeignet für kurze Leitungslängen

symmetrisch (*balanced*):

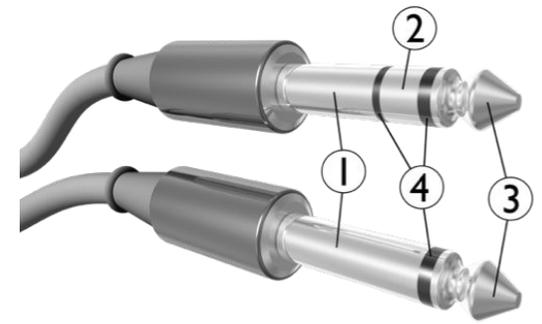
- » Zwei signalführende Leitungen, erdfreie Signalführung
- » Signal auf der zweiten Leitung um 180° phasenverschoben
- » Evtl. Störeinkopplungen heben sich durch Interferenz auf

In der Studio- und Bühnentechnik *nur symmetrische* Leitungen
d.h. dreipolige Stecker



Anschlussstechnik: Steckernormen

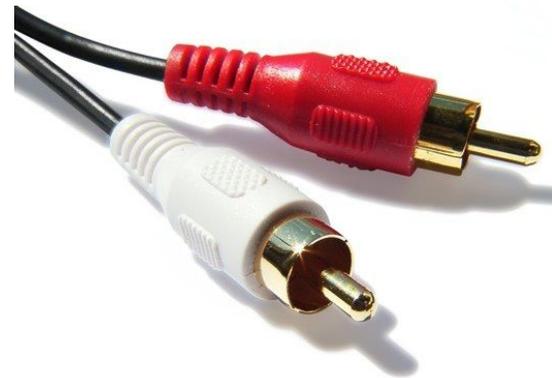
Klinkenstecker, zweipolig (6,3 mm)
symmetrische Beschaltung (dann nur Mono-Signal!)
unsymmetrische Beschaltung (dann Stereo)



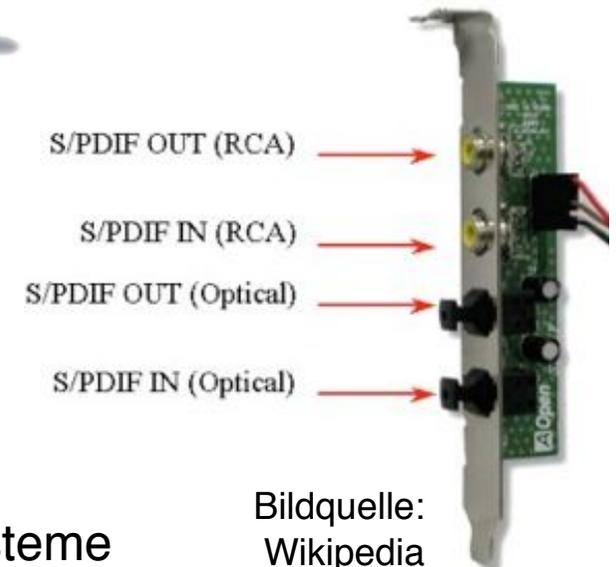
XLR-Stecker
symmetrische Beschaltung
vor allem für (Kondensator-)Mikrofone verbreitet
unsymmetrische Beschaltung
digitale Variante: AES/EBU



Cinch-Stecker (RCA)
nur unsymmetrische Beschaltung
selten im professionellen Einsatz



S/PDIF
Sony/Philips Digital Interface
Digitalschnittstelle, entweder Cinch-kompatible Verbinder
(elektrisch) oder optische Schnittstelle
Einsatz für digitale Signalweitergabe
(z.B. CD-Spieler zu D/A-Wandler) und für Raumklangsysteme



Bildquelle:
Wikipedia

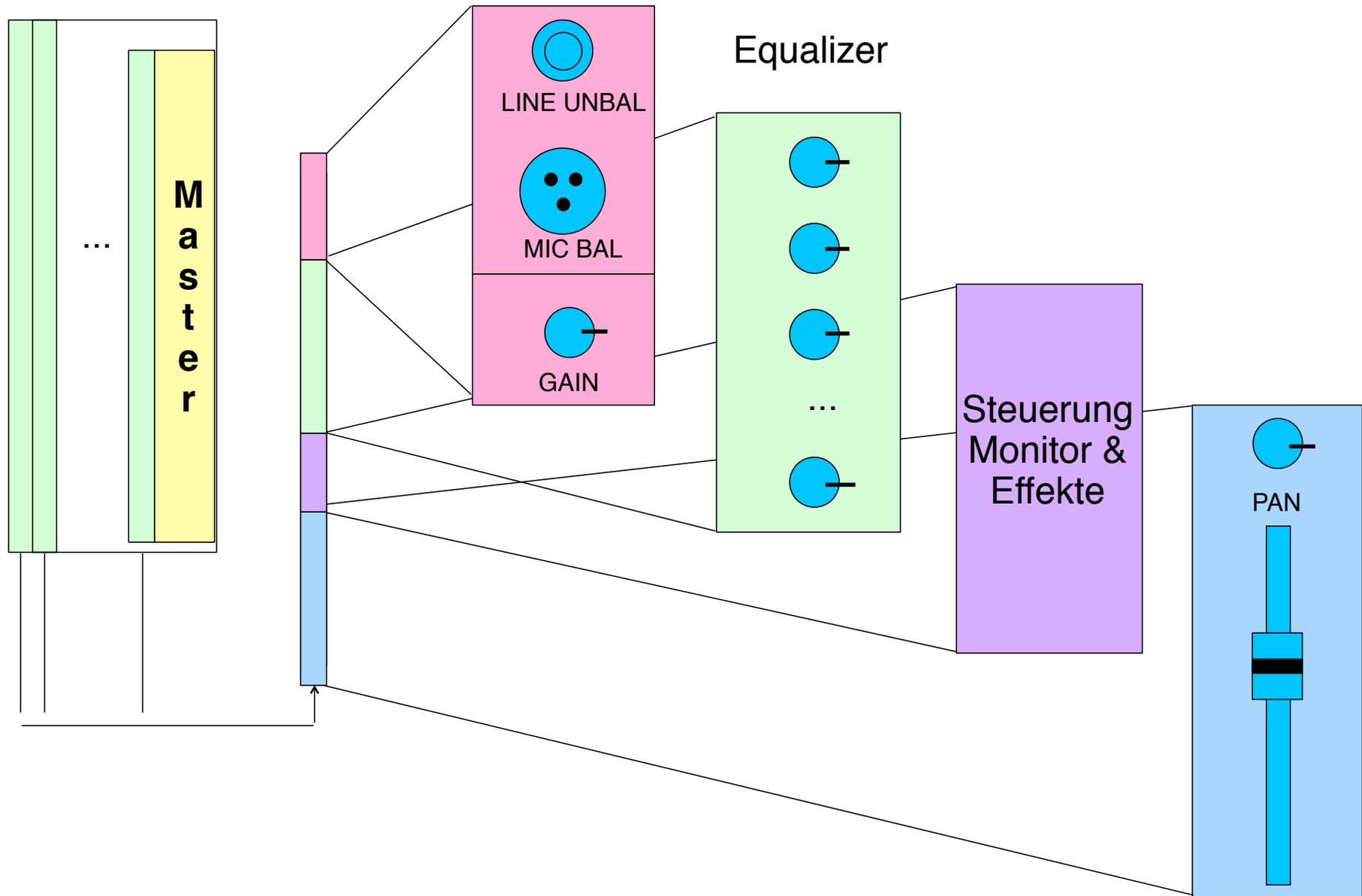
Audio-Mischpulte



Tonregieanlage: Herzstück eines Tonstudios
Pegelanpassung
Klangbearbeitung
Signalverteilung



Bedienungselemente eines Mischpults (Prinzip)



Frequenzfilter

Frequenzfilter:

Schaltungen oder Algorithmen mit von der Frequenz abhängigem Übertragungsverhalten

Klassische Analogtechnik:

Filter aus Elektronik-Bauelementen (Widerstände, Kondensatoren, Spulen)

Digitaltechnik:

Filter als digitaler Signalverarbeitungsbaustein (digitale Hardware)
Software-Filter

Einfache Standard-Filterformen:

Hochpass, Tiefpass
Bandpass, Bandsperre

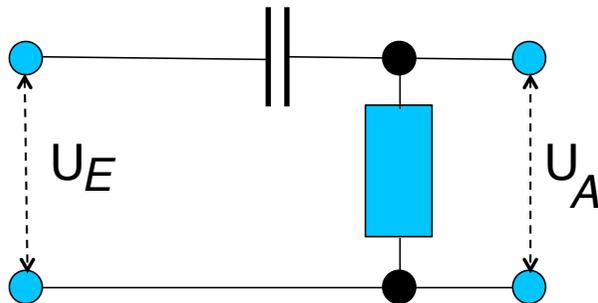
Komplexe Spezialfilter:

In aufwändigen Effektgeräten in Hardware realisiert
Relativ einfach in Software zu realisieren

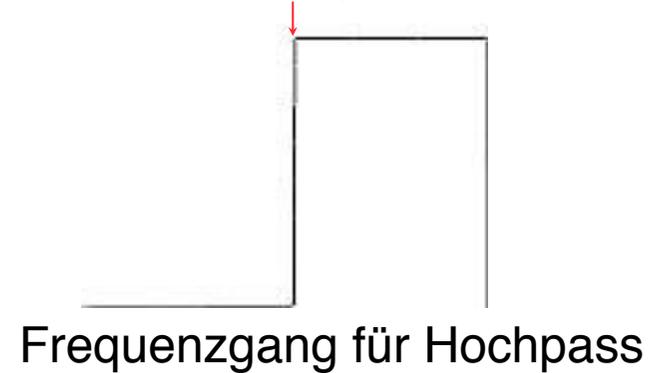
Hochpass

Hochpass: lässt hohe Frequenzen durch, blockiert niedrige Frequenzen

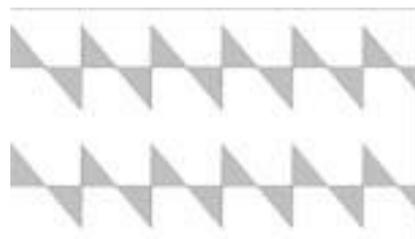
Elektrotechnische Realisierung
"RC-Hochpass erster Ordnung"



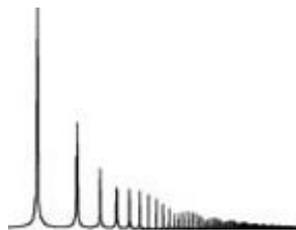
Grenzfrequenz



Eingangssignal:
Sägezahnschwingung



Signalverlauf

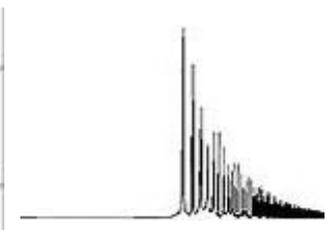


Spektrum

Resultat nach Hochpass:



Signalverlauf



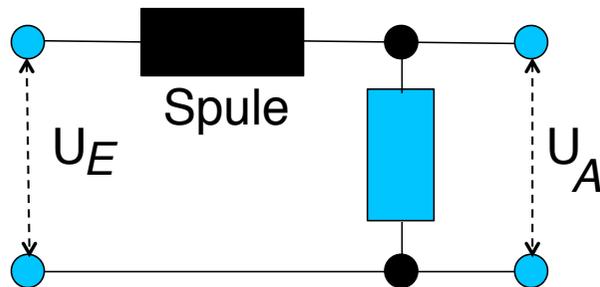
Spektrum

Tiefpass

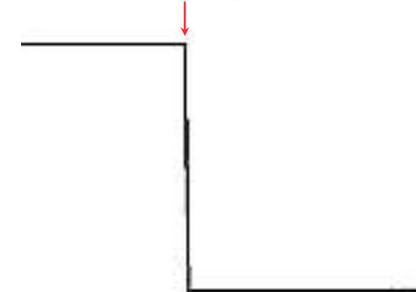
Tiefpass: lässt tiefe Frequenzen durch, blockiert hohe Frequenzen

Elektrotechnische Realisierung

"RL-Tiefpass erster Ordnung"



Grenzfrequenz

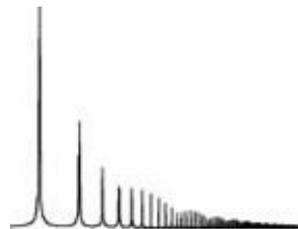


Frequenzgang für Tiefpass

Eingangssignal:
Sägezahnschwingung

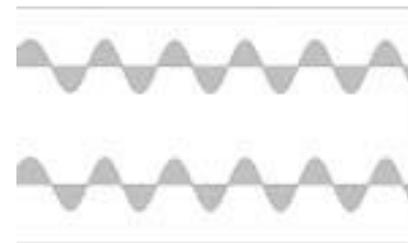


Signalverlauf



Spektrum

Resultat nach Tiefpass:



Signalverlauf

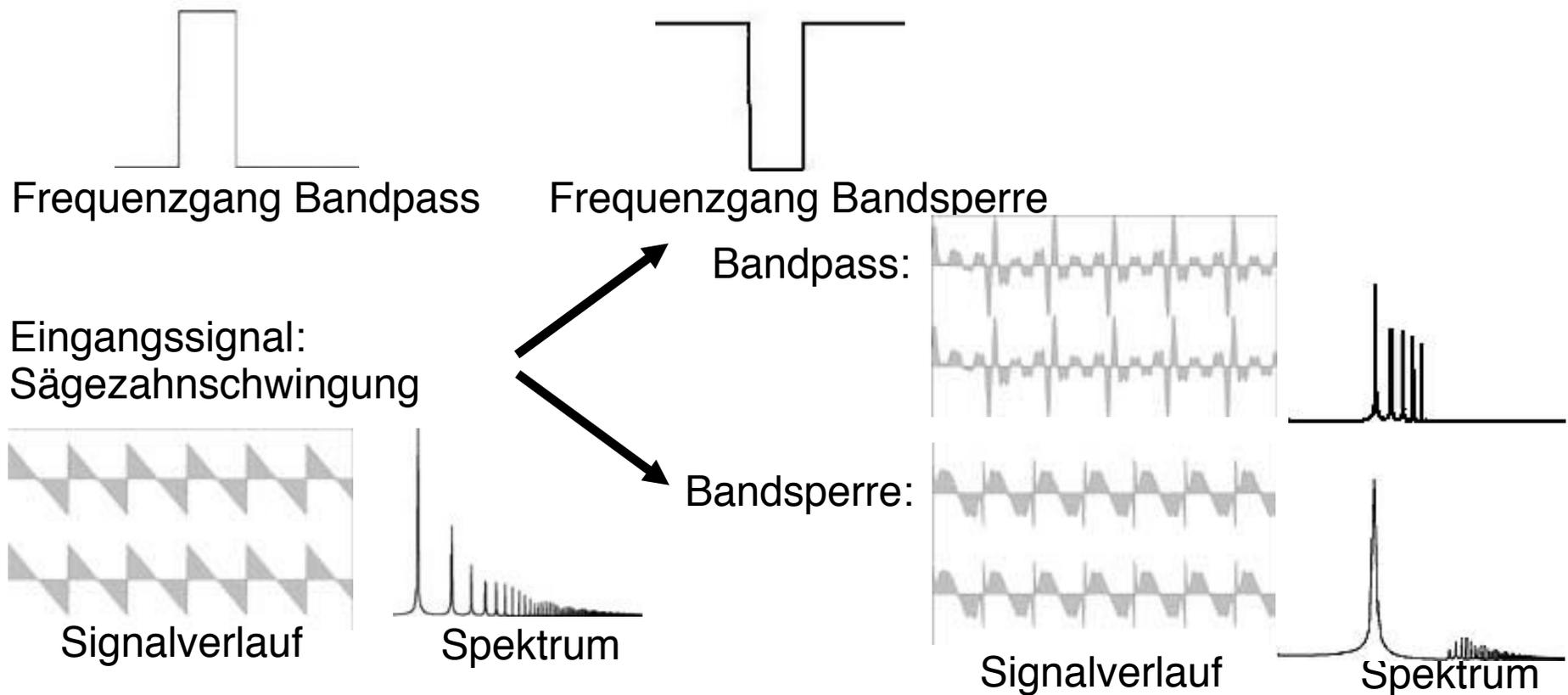


Spektrum

Bandpass, Bandsperre

Bandpass: lässt Frequenzen in bestimmtem Intervall durch, blockiert andere Frequenzen

Bandsperre: blockiert Frequenzen in bestimmtem Intervall durch, lässt andere Frequenzen durch



Equalizer

Ursprung:

Ausgleichen von Frequenzgang-Unterschieden zwischen verschiedenen Mikrofonen (Linearisierung)

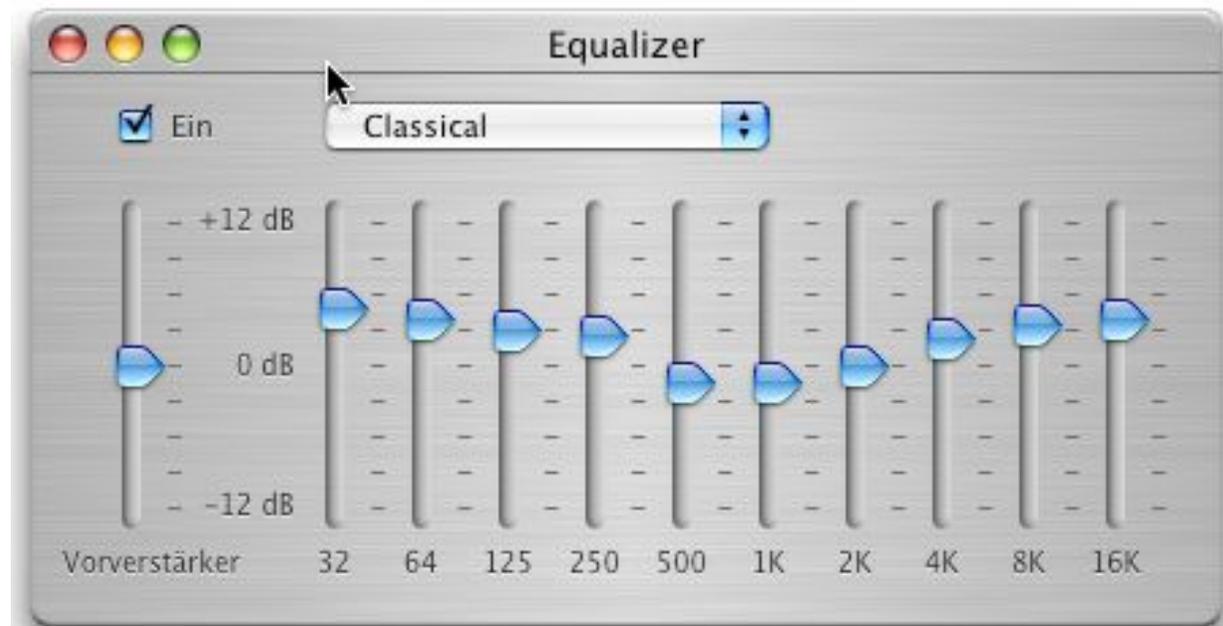
Heutzutage:

Generelles Instrument zur frequenzselektiven Klangveränderung

Ausdruck von Künstler und Produzent optimieren

Musikstil optimal umsetzen (Klassik, Pop, Rock, ...)

Häufiger “Missbrauch”:
Höhen und Tiefen anheben
um Klang subjektiv
wirkungsvoller zu machen
(“Badewannenkurve”)



Grafischer Equalizer

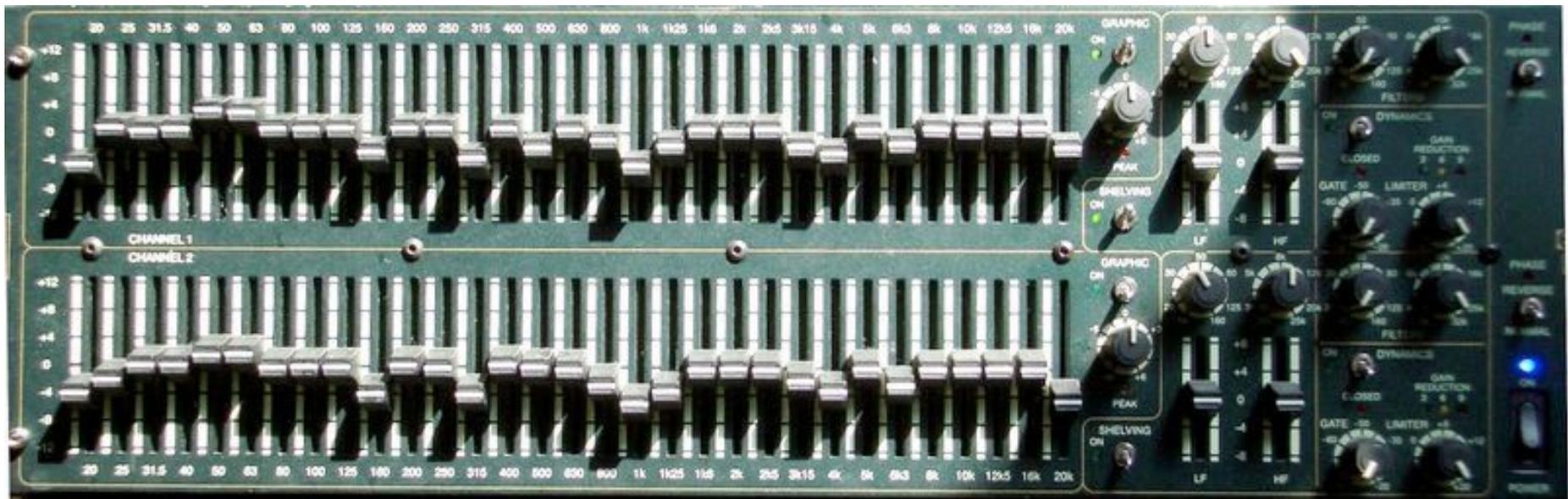
Grafischer Equalizer:

- Frequenzbänder fester Bandbreite

- Individuelle Pegelregelung je Frequenzband

- Bei professionellen Geräten 26 bis 33 Frequenzbänder je 1/3 Oktave

Einfache optische Kontrolle der Einstellung



Parametrischer Equalizer

Parametrischer Equalizer:

Reihe von Frequenzfiltern, jeweils einstellbar:

Mittelfrequenz

Bandbreite

Verstärkung bzw. Dämpfung

Filtergüte Q:

Bandbreite relativ zur Mittenfrequenz

Großes Q: enges Band

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$



Loudness Wars

Psychoakustische Tatsache:

Spontan wird lautere Audio-Darbietung als „besser“ empfunden
Eindruck ändert sich bei längerem Hören!

Hohe „Lautstärke“ bedeutet geringen Dynamikumfang
(geringe Pegelunterschiede)

Digital vs. Analog:

Digitales Audio (CD) tendenziell „leiser“

Hochwertiges digitales Audio noch leiser

wegen Ausnutzung des verfügbaren Dynamikbereichs

Tendenz:

Digitale Audio-Aufnahmen zu hoch ausgesteuert
mit zu starker Kompression

„Loudness Wars“: Welche Aufnahme klingt besonders „stark“?

Rolling Stone (Dec. 2007): „The death of high fidelity“

Weniger Dynamik, mehr Kompression

Geringe Dynamik (Kompression)
sinnvoll in manchen Fällen:

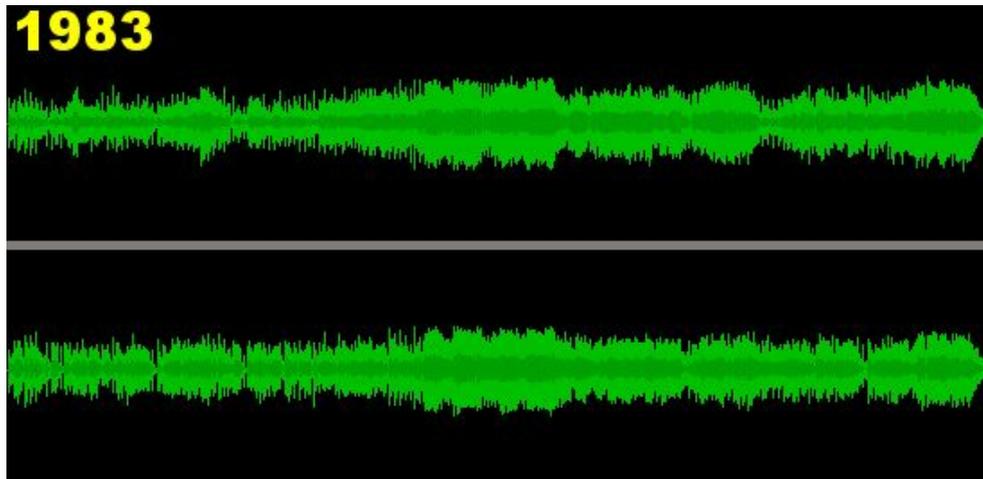
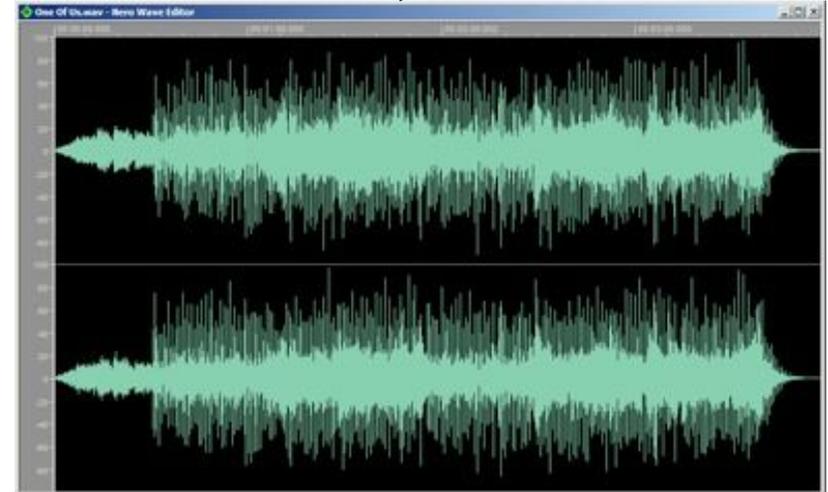
Hintergrundgeräusche bei Wiedergabe
(z.B. Autoradio)

Schlechte Wiedergabegeräte

Aber: Informations- und Qualitätsverlust

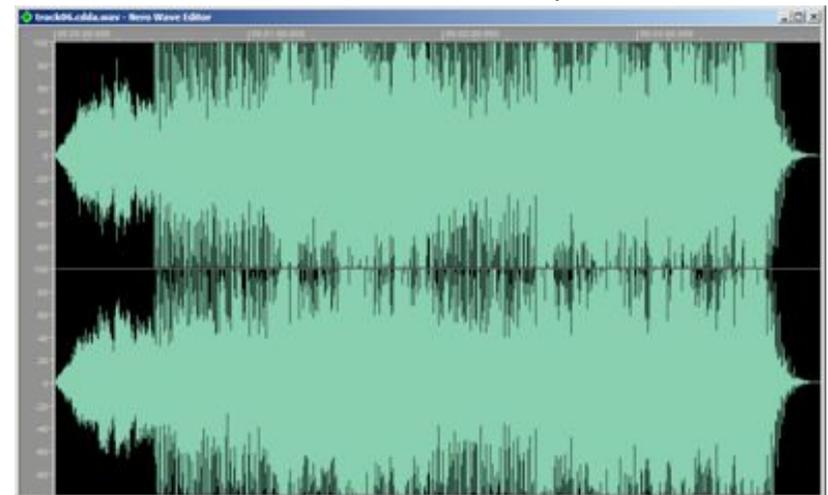
Pop-Musik meist hoch komprimiert

Abba: One of Us, 1981



The Beatles: Something
(Wikipedia: Loudness War)

Abba: One of Us, 2005 (Re-Mastered)



Musik mit hoher und niedriger Dynamik

Dynamikumfang = Unterschied zwischen lauten und leisen Anteilen

Beispiele:

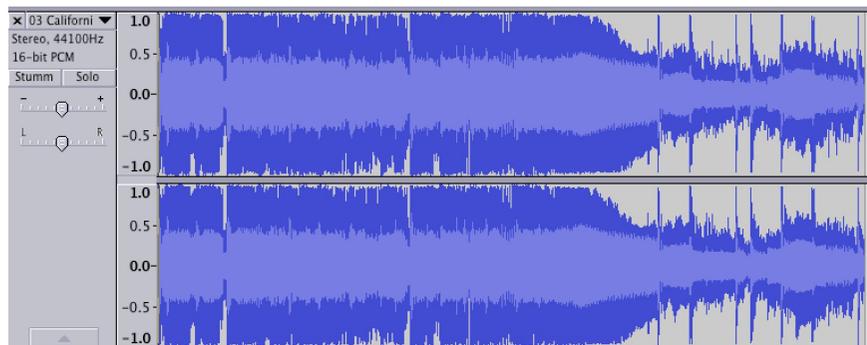
Guns'n'Roses, Appetite for Destruction, 1987: 15 dB Dynamikumfang

Oasis, (What's the Story) Morning Glory, 1995: 8 dB Dynamikumfang

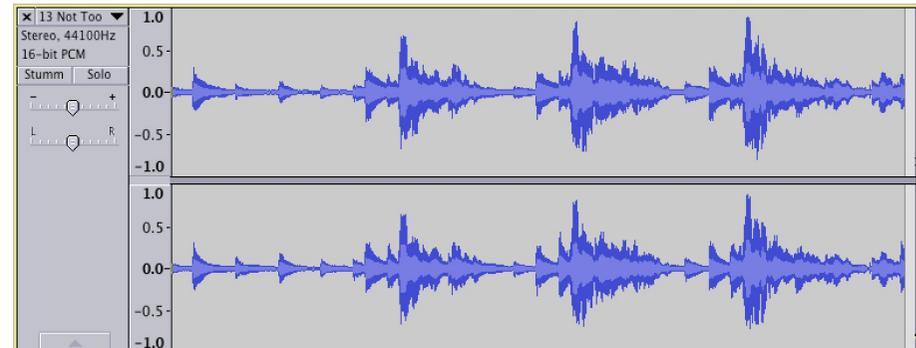
Iggy Pop, Raw Power, remastered 1997: 4 dB Dynamikumfang

Arctic Monkeys, 2008 („dynamikfrei“)

Quelle: Süddeutsche Zeitung v. 18.01.08, „Was nicht knallt, hat keine Chance“



Red Hot Chili Peppers: Californication



Norah Jones: Not Too Late

4. Audiotechnik und Tonbearbeitung

4.1 Grundlagen der Audiotechnik

4.2 Analoge Audiotechnik

4.3 Mehrkanaltechnik 

4.4 Digitale Audiotechnik

4.5 Digitale Rundfunktechnik **ONLINE**

4.6 CD und verwandte Speichertechnologien **ONLINE**

Literatur:

Th. Görne: Tontechnik, 3. Auflage, Hanser 2011

Stereofonie

Geschichte:

Alan Dower Blumlein, England: Patent 1931

Verbreitet seit den 50er Jahren

Anfangs oft Links/Rechts-Quellen statt Ortung von Phantomschallquellen
("Beatles-Stereo")

Laufzeitstereofonie:

Differenzen in der Laufzeit der beiden Kanäle wahrgenommen

Intensitätsstereofonie:

Differenzen im Pegel der beiden Kanäle wahrgenommen

Äquivalenzstereofonie:

Kombination der beiden Verfahren

Links/Rechts- (LR-) und Mitten/Seiten- (MS-) Stereofonie

LR überträgt Information für linken und rechten Lautsprecher auf 2 Kanälen

MS überträgt Mono-Mittensignal und Seiteninformation in getrennten Kanälen

Links = Mitte + Seite, Rechts = Mitte – Seite (*Matrizierung* mit Faktor $1/\sqrt{2}$)

Raumklang (*Surround Sound*) (1)

Dolby Pro-Logic (Dolby Surround):

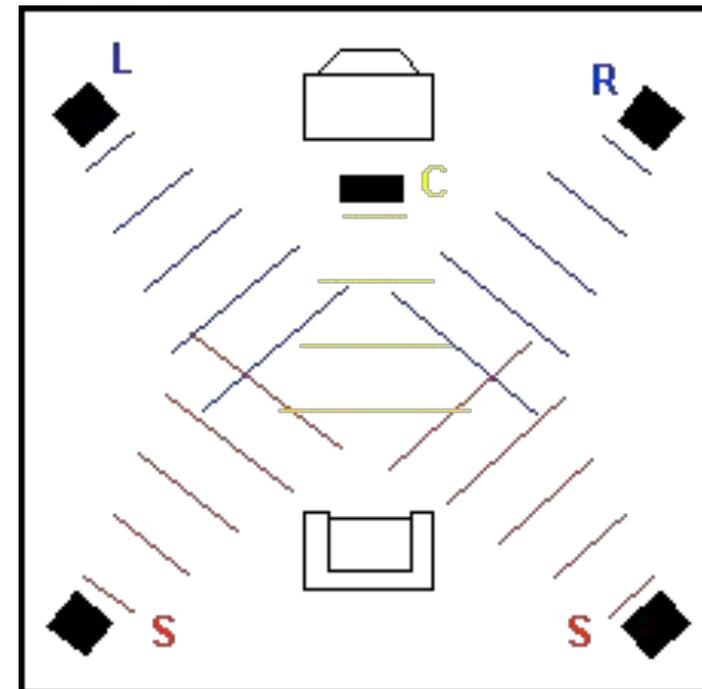
4 Kanäle, in den 2 Stereokanälen enkodiert (Matrizierung)

Bei Wiedergabe 5 Boxen:

Zwei Frontlautsprecher

Zwei Surround-Boxen (dasselbe Mono-Signal)

Center-Lautsprecher



Raumklang (2)

6-Kanalverfahren ("5.1")

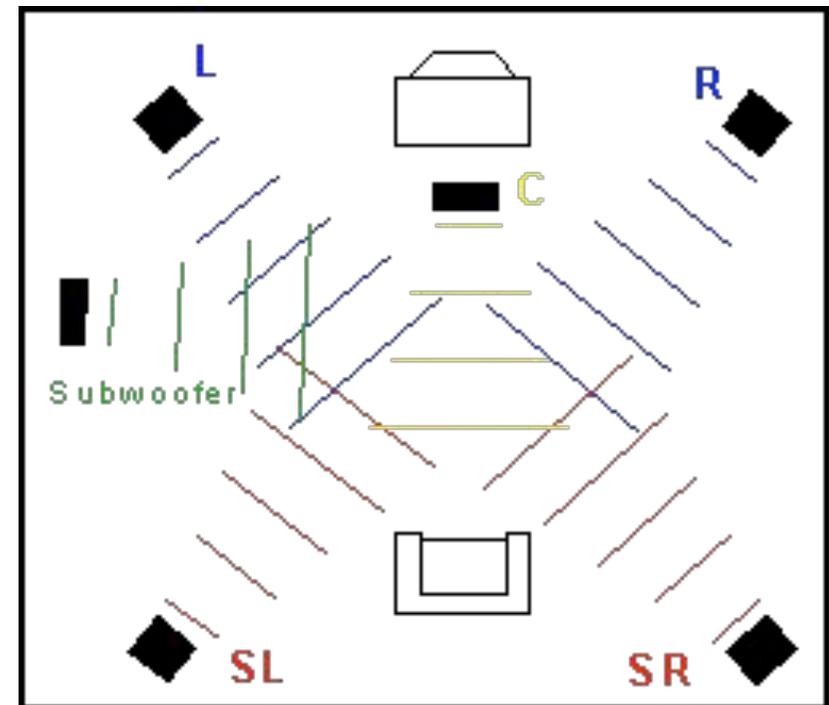
Frontboxen (links und rechts)

2 Surround-Boxen hinter dem Zuhörer, (separat angesteuert)

Center-Speaker

Subwoofer

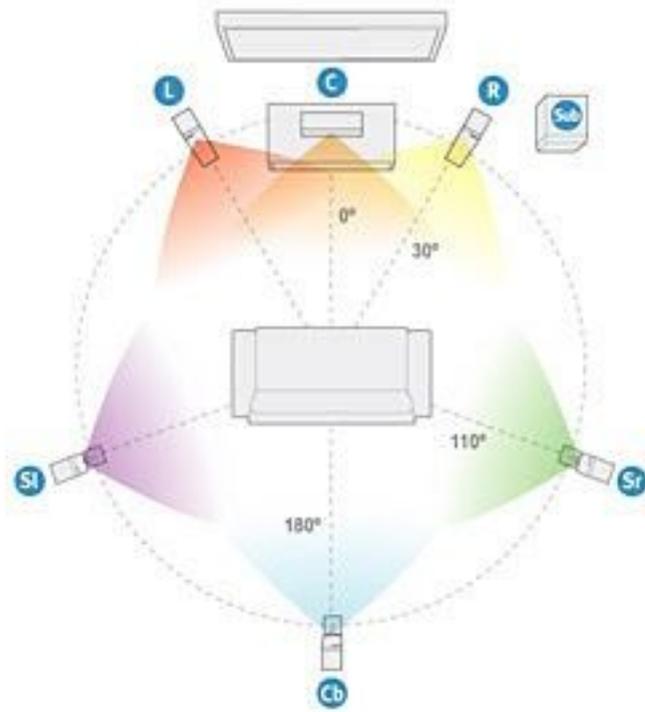
Standort des Subwoofers beliebig



Siehe auch: <http://www.dolby.com/consumer/technology/>

Raumklang (3)

7- und 8-Kanal-Systeme:

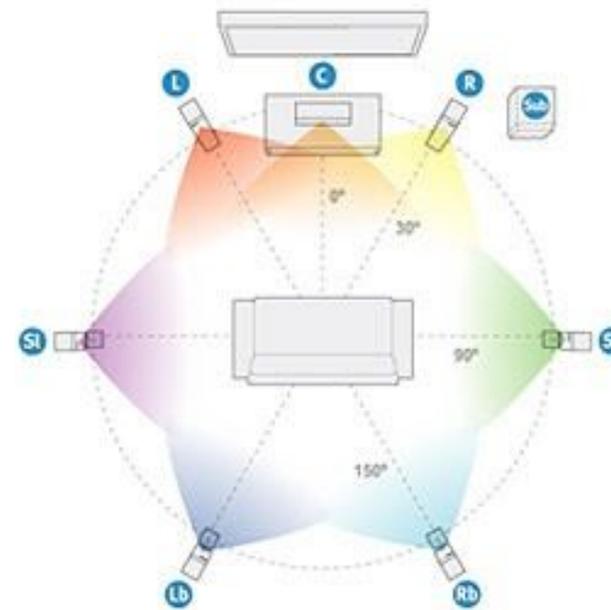


6.1

Schlüssel

- L** Links
- C** Center
- R** Rechts
- S** Subwoofer
- Sl** Surround Links
- Sr** Surround Rechts
- Cb** Center Hinten

7.1



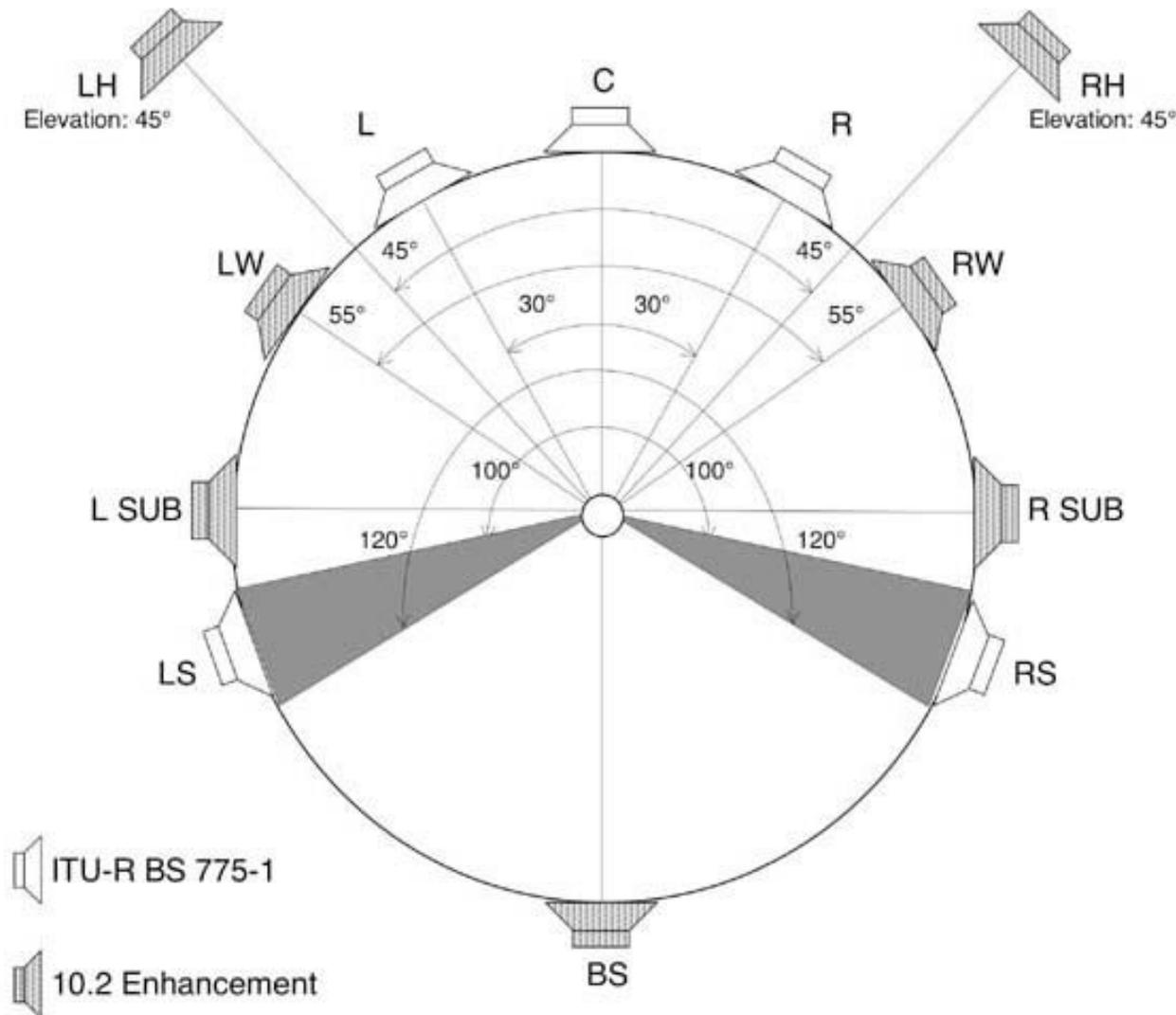
Schlüssel

- L** Links
- C** Center
- R** Rechts
- S** Subwoofer
- Sl** Surround Links
- Sr** Surround Rechts
- Lb** Links Hinten
- Rb** Rechts Hinten

Weiterentwicklung von Surround Sound

Tomlinson Holman, University of Southern California, 2007:

10.2 und 12.2



Erhöhte Lautsprecher
(LH, RH)
Zwei Subwoofer
(L SUB, R SUB)

Bei 12.2:
Zwei "Diffuse Surround"
Kanäle (an den
Wänden reflektiert)

Wellenfeldsynthese (WFS)

Entwickelt Ende der 1980er Jahre, TU Delft, Berkhout

Huygens'sches Prinzip:

Zerlegung beliebiger Wellenformen in Elementarwellen

Kleine Schallstrahler
(über 100) im Raum
generieren großes
Klangfeld

Riesige "Sweet Spots"
(Orte korrekter Ortung)
Akustische Holografie
("Holografie")



Bild: TU Berlin

Produkte verfügbar: Firma IOSONO (Erfurt),
Installation z.B. bei Bavaria Film ("4D-Kino"), 432 Schallstrahler

Stereo-Mikrofonverfahren

Zwei Mikrofone nehmen dasselbe Signal auf

Intensitätsstereofonie:

z.B. XY-Anordnung von Mikrofonen mit Nierencharakteristik

Hohe "Präsenz", Richtwirkung

Gut für bewegte Quellen

Laufzeitstereofonie:

z.B. AB-Anordnung von Mikrofonen mit Kugelcharakteristik

min. 17, meist 50 cm Abstand

Hohe "Räumlichkeit", Abstand wirkt als "Zoom"

Äquivalenzstereofonie:

Naturgetreue Nachbildung des menschlichen Hörens

z.B. mittels Kunstkopf oder Ohrmikrofonen

oder Äquivalenzmikrofonieverfahren

z.B. ORTF und NOS

Bilder: <http://www.mediaculture-online.de/>

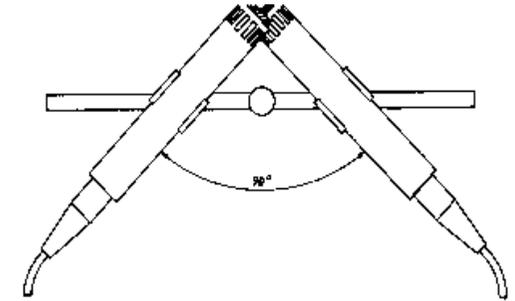
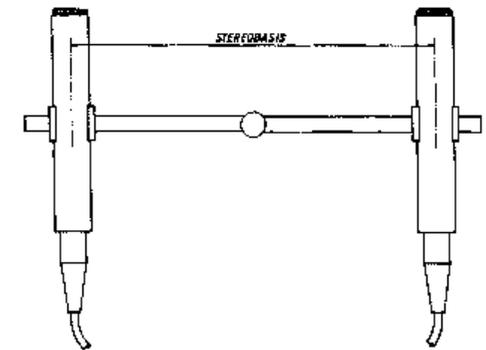
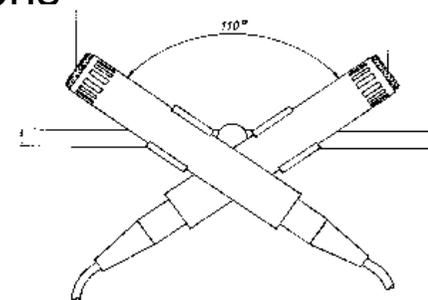


Abb. 16: Eine XY-Stereoaufnahme kann auch mit zwei einzelnen Nierenmikrofonen aufgebaut werden, die man auf eine Schiene montiert.

XY ("*coincident pair*")



AB ("*spaced pair*")

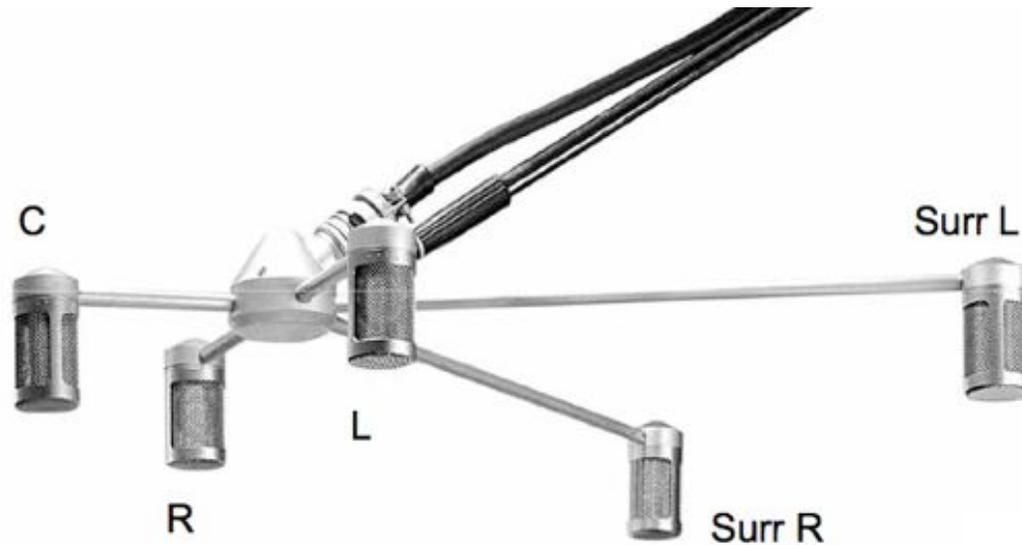


ORTF=

Office de Radiodiffusion Télévision Française



Spezielle Surround-Mikrofone (Beispiele)



Adjustable Surround Microphone

Surround-Kugelflächen-Mikro



Doppel-MS



IRT-Kreuz

4. Audiotechnik und Tonbearbeitung

4.1 Grundlagen der Audiotechnik

4.2 Analoge Audiotechnik

4.3 Mehrkanaltechnik

4.4 Digitale Audiotechnik 

4.5 Digitale Rundfunktechnik **ONLINE**

4.6 CD und verwandte Speichertechnologien **ONLINE**

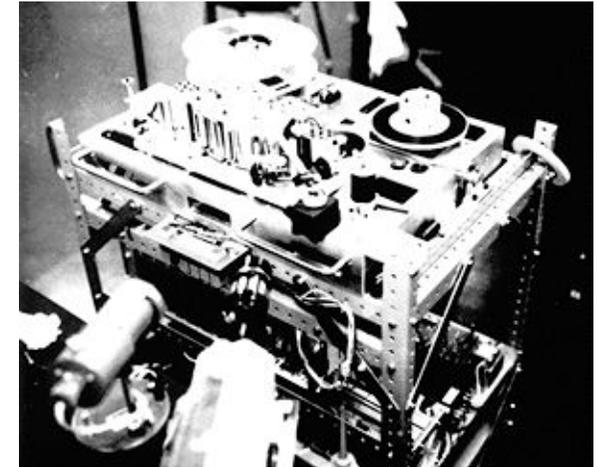
Literatur:

Th. Görne: Tontechnik, 3. Auflage, Hanser 2011

H. Raffaseder: Audiodesign, 2. Auflage, Hanser 2010

Geschichte der digitalen Audiotechnik

- 1926: Erstes Patent für PCM-Abtastung
(P.M. Rainey, Western Electric)
- 1962: PCM-Übertragungssystem
(Bell Telephone)
- 1974, Sony: PCM-Audio digital auf Magnetband
- ab 1975: Digitale Masterbänder in Tonstudios
- 1979, Philips: Erste digitale Audiodisc
- 1981, Philips/Sony: Compact Disc (CD)
- 1988 Verkaufszahlen von CDs über denen von LPs
- 1981: Standardisierung von MIDI (Synthesizer)
- 1990: DAT-Recorder (Digital Audio Tape)
- 1990: CD-R
- 1992: Philips DCC und Sony MiniDisc (MD)
- 1999, Sony/Philips: Super Audio CD (SACD)
und Direct Stream Digital
- 1999: DVD-Audio
- 2000+: Direct-to-disc Recording etabliert sich



Sony digital tape recorder 1974



DAT Tape (1990–2005)

Analog-/Digital-Wandlung

Abtastung

Diskretisierung (Abtastrate)

Quantisierung (Wortlänge)

Abtastraten:

32 kHz (Broadcast, Semi Professional)

44.1 kHz für CDs, Mastering und Aufzeichnung mit Videogeräten
der 625/50 Norm

44.056 kHz für Aufzeichnung mit Videogeräten der 525/59.94 Norm

48 kHz professionelle Studionorm für Recorder mit feststehenden Köpfen

96 kHz High End Mastering, DVD Audio

2.8224 MHz „Direct Stream Digital“ (z.B. für SACD = Super-Audio CD)

Wortlängen:

16 Bit (Audio-CD)

24 Bit (Mastering)

Interne Wortlängen von Bussystemen und Effektgeräten oft höher

Digitale Pegel

Maximaler digitaler Audiopegel: 0 dBFS (dB Full Scale)

Maximal möglicher Wert in der gewählten Quantisierung

Prinzipiell unabhängig vom Spannungswert nach Analog-Konversion

Alle real auftretenden Pegelwerte sind negativ

1 Bit Wortlänge = Verdopplung des Dynamik-Wertebereichs = 6 dB

8 Bit Wortlänge = 48 dB (z.B. 00000000 = -48 dBFS)

16 Bit Wortlänge = 96 dB

24 Bit Wortlänge = 144 dB

Digitaler Headroom: Differenz zwischen Arbeitspegel und 0 dBFS

Mindestens -9 dBFS, oft höherer Abstand vorgeschlagen (z.B. -20 dBFS)

„Intersample Peaks“, optimaler Arbeitsbereich für analoge Verstärker

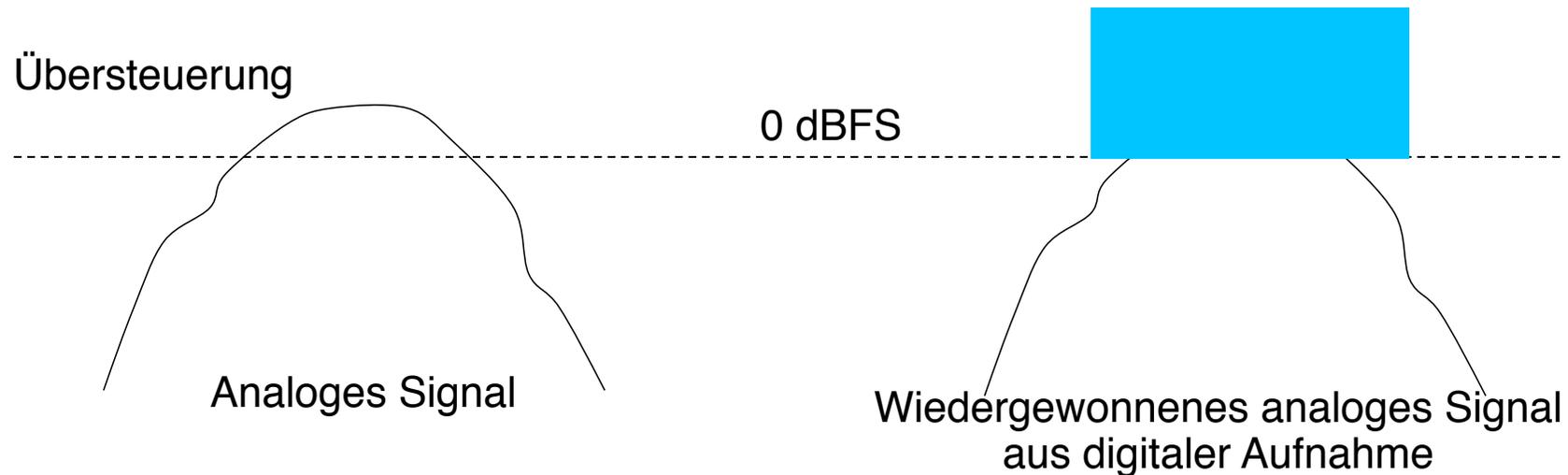
D/A-Wandlerpegel 6 dBu entspricht digitalem Arbeitspegel

Rauschen in der digitalen Bearbeitung:

A/D-Wandler: Rauschen bei ca. -104 dBFS

Digitale Mixer: Rauschen bei ca. -120 dBFS

Digitales „OVER“?



Übersteuerung bei der Aufnahme:
Signalanteile gehen verloren („Clipping“)

„OVER“-Anzeige nur bei Aufnahme, nicht bei Wiedergabe!

Digitales Clipping

Akustisch wesentlich unangenehmer als bei analoger Übersteuerung

Rechteck-artige Schwingungen

OVER-Anzeige bei digitalen Peakmetern:

Folge von mehreren aufeinander folgenden 0 dBFS-Werten (z.B. 3)

Verzerrungen bei der Digitalisierung

Quantisierungsfehler:

Differenz zwischen "echter" Amplitude und nächstgelegener Quantisierungsstufe

Kann als additives Rauschen aufgefasst werden (*Quantisierungsrauschen*)

Abhilfe: z.B. *Oversampling*

Granularrauschen:

Z.B. einzelner Ton in extrem stiller Umgebung, wird zu Rechtecksignal

Hochfrequente Obertöne hörbar als Klirrgeräusche

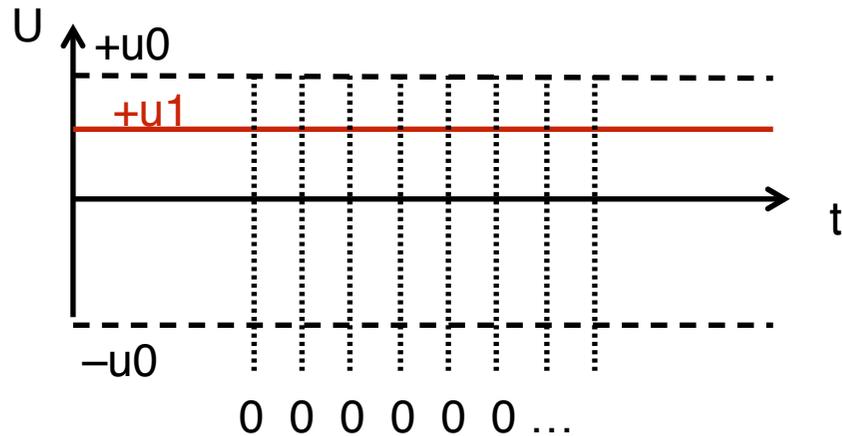
Abhilfe: *Dithering*

Rundungsfehler:

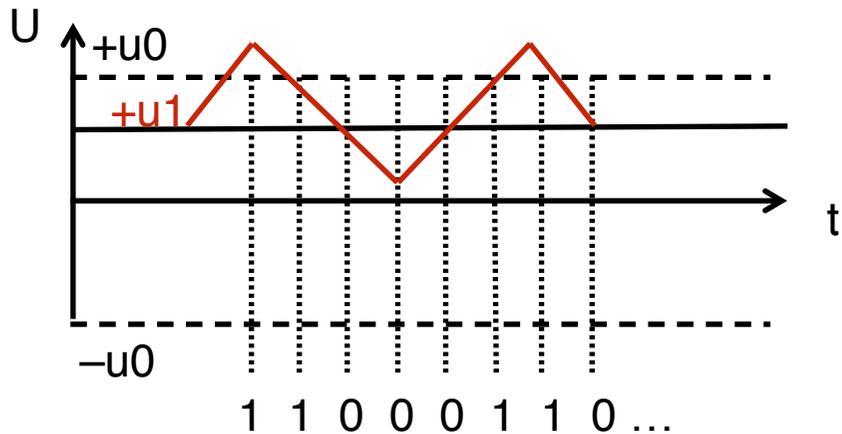
Rechnen mit Audio-Daten, z.B. bei Divisionen

Abhilfe: Wortlängenmanagement

Audio-Dithering



Annahme: Quantisierungsschwelle bei u_0
(LSB, Least Significant Bit)
Konstante Spannung u_1 unterhalb u_0 (z.B. $u_0/2$)
Sampling liefert Null-Werte



Weißes Rauschen (Zufallsignal) beigemischt
mit niedriger Amplitude ($u_0/2$)
Sampling liefert zufällige Wertereihe 0 und 1
*Durchschnitt (bei nachfolgender Glättung)
entspricht u_1 !*

Hinzufügen von Rauschen steigert Auflösung der Digitalisierung
Geringere Quantisierungsverzerrungen für extrem niedrige Pegel

Oversampling bei der A/D-Wandlung

Oversampling:

Vervielfachung der Abtastrate (im Vergleich zur Nyquist-Rate)

Meist um Zweierpotenz (2-fach, 4-fach, 8-fach)

Bei Digitalisierung (A/D-Wandlung) und Reproduktion (D/A-Wandlung)

Oversampling bei der A/D-Wandlung:

Beispiel: CD-Audio (Bandbreite bis 22,05 kHz)

Nyquist-(Mindest-)Rate 44,1 kHz

4-fach Oversampling: Abtastung mit 176,4 kHz

Tiefpassfilterung (Anti-Aliasing Filter) digital realisierbar

Dezimation: Reduktion der Abtastrate (Weglassen von Samples)

Vorteile:

Digitales Signal basiert auf Analyse von mehr Information

Quantisierungsrauschen wird auf größeren Frequenzbereich verteilt

Soundkarten

Bestandteile:

- Digitaler Signal-Prozessor (DSP)
- Digital-Analog-Converter (DAC)
- Analog-Digital-Converter (ADC)
- Speicher (z.B. für Wellenformen, Puffer)

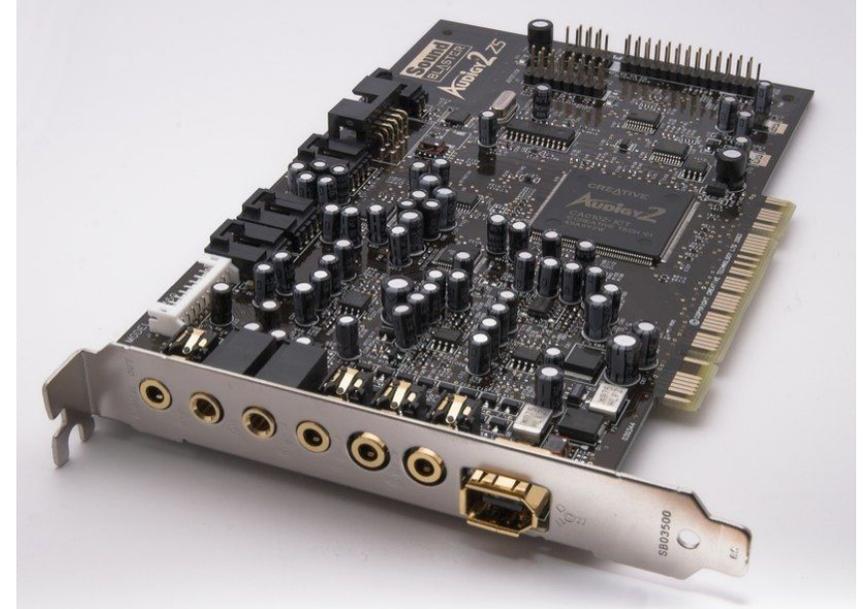
Anschlüsse:

- Analoge und digitale Audio-Ein-/Ausgänge
- MIDI-Ein-/Ausgänge
- Mikrofon-Eingänge (Vorverstärker)
- Raumklang-Ausgänge

Einfache Soundfunktionalität
meistens "on board"

Audio-Interface:

- Eigenes Gehäuse (Breakout-Box)



Soundblaster Audigy 2 ZS
(Wikipedia)



Thunderbolt-Audio Interface
Motu 828x (Bild Thomann)



Steinberg UR22
(Bild Thomann)

Digitales Mischpult



Digitales Mischpult
mit eigenem DSP (Digital Sound Processor)



Steuergerät für Software
(z.B. Cubase, Logic)
angeschlossen über FireWire oder USB



Reine Softwarelösung,
Steuert u.U. Hardware (z.B. spezielle Soundkarten)

Bearbeitung der Amplitude (1)

Verstärken, Dämpfen, "Normalizing":

nachträgliche Anpassung des gesamten Signalpegels

Z.B. Einstellen auf Standard-Durchschnittspegel („Normalizing“)

Auch unerwünschte Effekte (z.B. Rauschen) mitverstärkt!

Normalizing:

Relativ zu welchem Standard?

Bsp.: Abmischen eines Albums

Normalizing des Gesamtalbums, nicht der Einzelsongs

Bearbeitung der Amplitude (2)

Bearbeiten der Hüllkurve: Ein- und Ausblenden (fading)

Typen von Fadern:

- linear

- logarithmisch

- exponentiell

- diverse Zwischenformen

Kompensation von "DC-Offset"

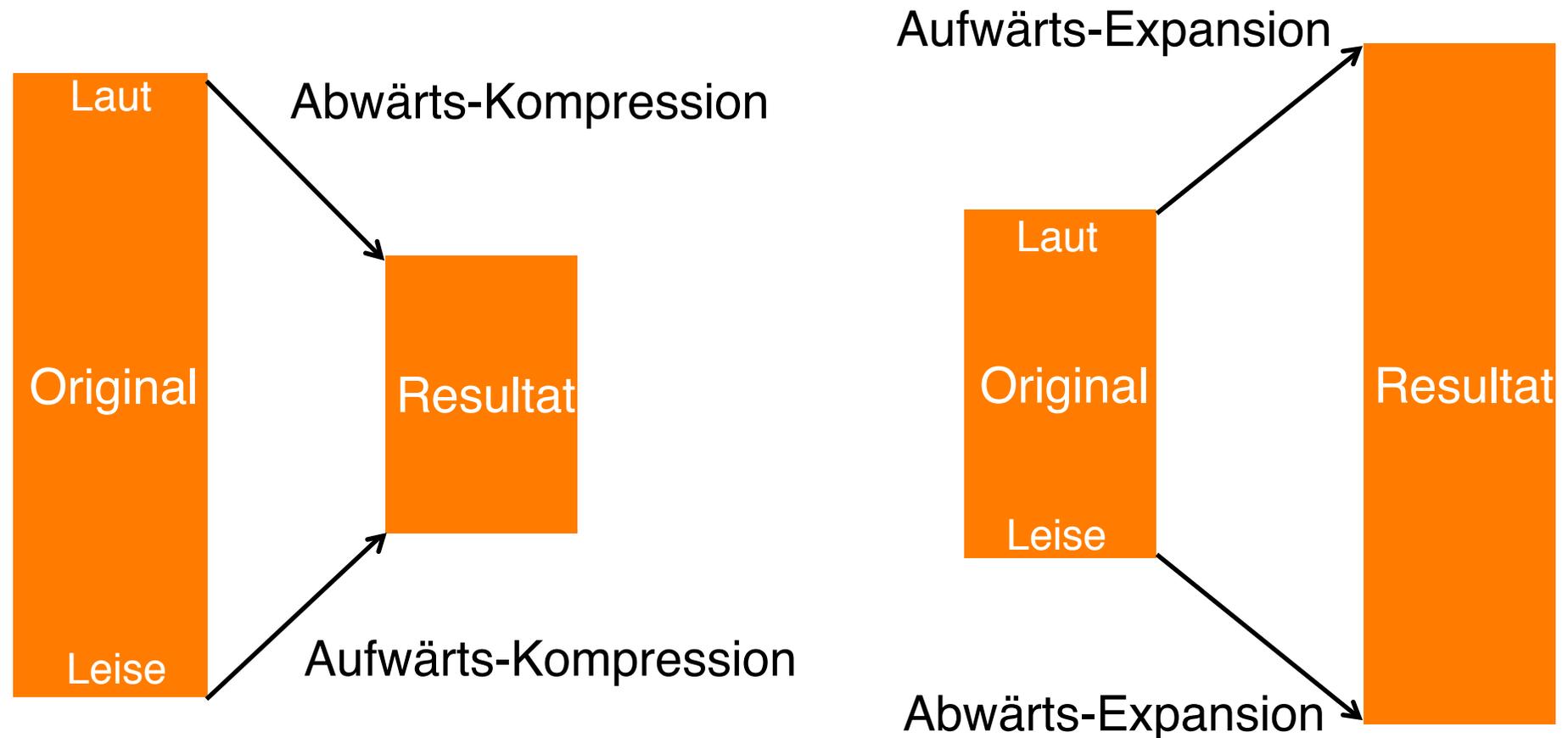
- Signal genau auf die gewünschte Null-Linie einstellen

Vorsicht beim Zusammenmischen verschiedener Signale:

- Gesamtpegel beachten!

Varianten der Dynamik-Modifikation

Dynamik: Unterschied zwischen lauten und leisen Passagen
Höchster minus kleinster Amplitudenwert in einem Zeitfenster



Bearbeitung der Dynamik (1)

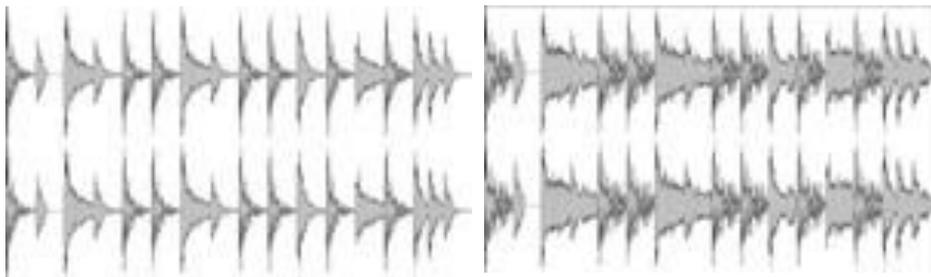
Kompressor:

Schwelle (*threshold*): Amplitudenwert, ab dem die Reduktion einsetzt

Faktor (*ratio*): Stärke der Reduktion

Einsatz (*attack*) und Ausklingen (*release*): Übergangszeiten

Beispiel:



unkomprimiert

komprimiert
Threshold -10dB
Ratio 10.0
Attack 10 ms
Release 100 ms

Expander:

Umkehrfunktion zum Kompressor

Limiter:

Schneidet oberhalb Schwellpegel ab

Gate:

Schneidet unterhalb Schwellpegel ab

Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs: Schnitt

Cut, Copy und Paste im Audio-Editor

- Möglichst in Pausen schneiden

- Immer im Nulldurchgang schneiden (sonst Knacken)

- Relativ problemlos:

 - Schnitte zu ähnlichem Signal

 - Schnitte von leisem zu lautem Signal

- Schwierig:

 - Schnitte innerhalb eines kontinuierlichen Signals

Überblenden:

- Bearbeiten der Hüllkurven und Zusammenmischen

- Kreuzblende (langsam) und Sturzblende (rasch)

Schleife (*loop*):

- Schnittregeln an der Nahtstelle beachten

Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs: Resampling

Andere Wiedergabegeschwindigkeit als Samplingrate
Ändert Zeitdauer und gleichzeitig alle Tonhöhen

Beispiel:

Original

Resampling * 0,7

Resampling * 1,4

Beispiel: Erzeugung neuer Töne

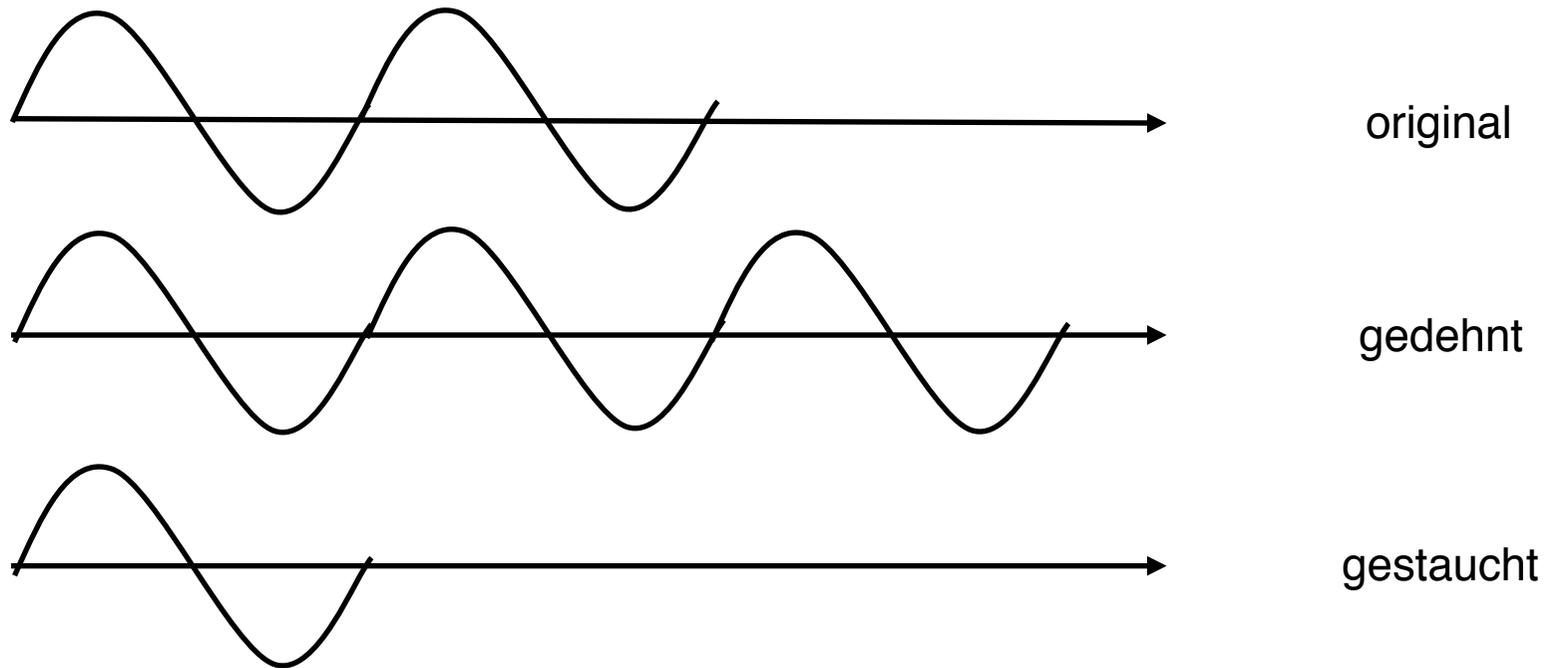
Kugel auf Teller

1/16 Resampling

1/64 Resampling

Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs: Timestretching

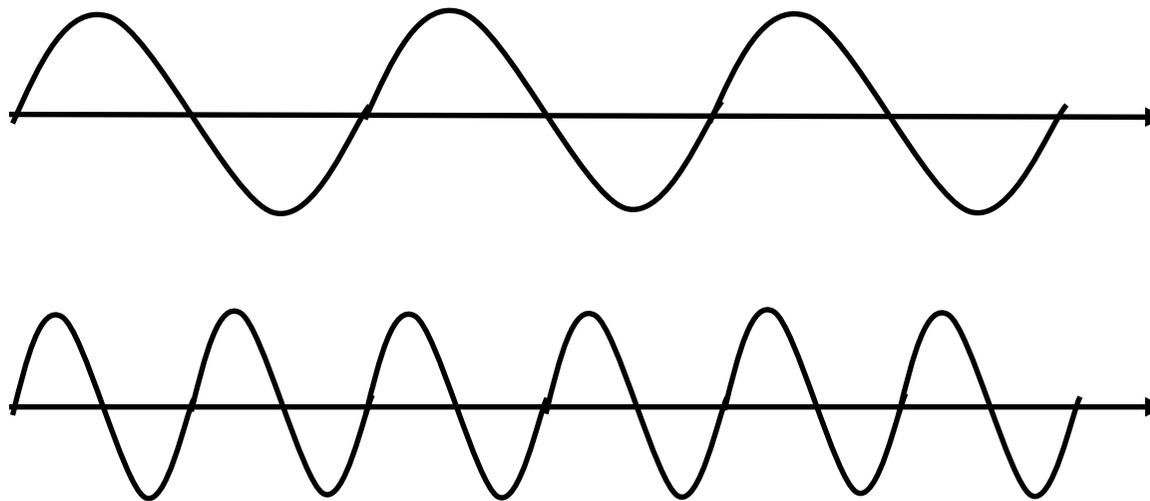
Zeitkorrektur ohne hörbare Tonhöhenveränderung
nur in begrenztem Umfang möglich
Idee: Wiederholung kleiner periodischer Abschnitte



Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs: Pitchshifting

Tonhöhenkorrektur bei gleicher Spieldauer

Zusammensetzbar aus Timestretching und Resampling



Original

tiefer

höher

Raumorientierte Bearbeitung: Echo und Hall

Echo:

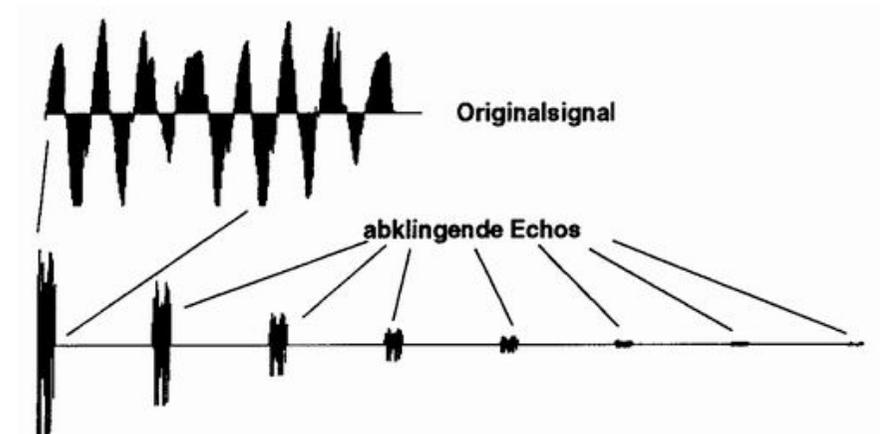
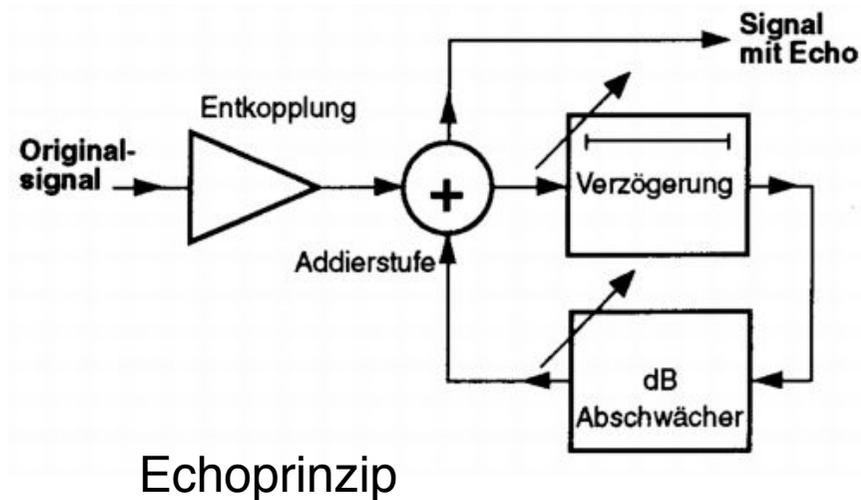
Signal *einmal* zurückgeführt

Parameter: Verzögerung, Abschwächung

Hall:

Signal *vielfach* (unendlich oft) zurückgeführt

Halleinstellungen können komplex sein



Schallausbreitung im geschlossenen Raum

Direktschall:

gerade Linie zwischen Quelle und Hörer
kürzester Weg

Erstreflexionen:

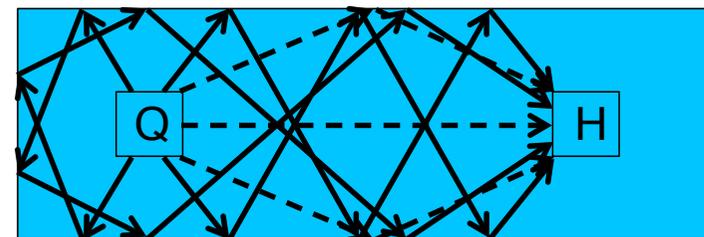
längerer Weg, längere Laufzeit
evtl. als unterschiedliches Signal wahrnehmbar (Echos)

Mehrfachreflexionen:

als einheitliches "Hall-" Signal wahrgenommen
klingt mit der Zeit ab



Erstreflexionen



Mehrfachreflexionen

Impulsantwort

Verhältnis von Direktschall, Erstreflexionen und Nachhall ermitteln:

Kurzer *Impuls* (Klatschen, Schuss)

Spektrum des reflektierten Signals: *Impulsantwort*

Mathematische Berechnung der Raumwirkung:

Faltung (convolution) des Eingangssignals mit Impulsantwort

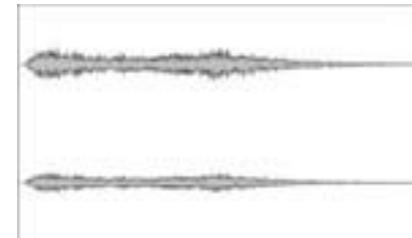
Beispiel:



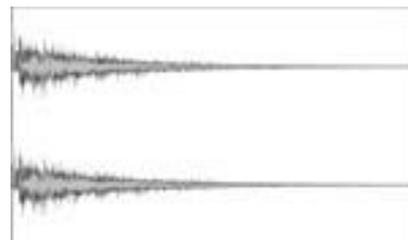
Originalton



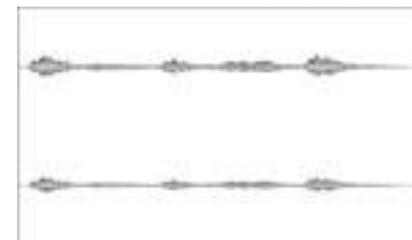
Impulsantwort Kathedrale



Faltungsergebnis



Impulsantwort Büroraum



Faltungsergebnis

Phasenorientierte Bearbeitung

Sehr kurze Verzögerungen (unter 30 ms)
werden als Phasenveränderungen wahrgenommen
beeinflussen den Gesamtklang

Chorus:

Sehr schnelle, minimal in der Höhe veränderte Signalarückführung
Lässt Klang voller erscheinen

Flanging (Beispiel):

Noch kleinere Verzögerungszeit (8 ms)
Tonhöhe konstant - Überlagerung mit Originalsignal
Feedback: Effektsignal wird an Eingang zurückgeführt
Verwendung z.B. bei Gitarrenklängen

Phasing:

ähnlich zu Flanging, aber ohne Feedback
synthetischer Klang

Restauration

Fehler auf alten Tonträgern:

Rauschfehler (Noise, Hiss)

Clickfehler (Clicks)

Knistern (Crackles)

Denoising:

"Fingerprint" (Spektrum) des Rauschens wird bestimmt
dann exakt diese Frequenzen ausgefiltert

Declicking:

Signallücke durch Interpolation (oder zweiten Stereokanal) ersetzen

Decrackling:

Wiederholtes Declicking, auch automatisch ausgeführt