

# A3. Digitale Tonverarbeitung

A3.1 Grundlagen der Audiotechnik

A3.2 Analoge Audiotechnik

A3.3 Digitale Audiotechnik



Literatur:

M. Warstat, Th. Görne: Studiotechnik, 5. Auflage,  
Elektor-Verlag 2002

H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

# Ein frühes Grammophon



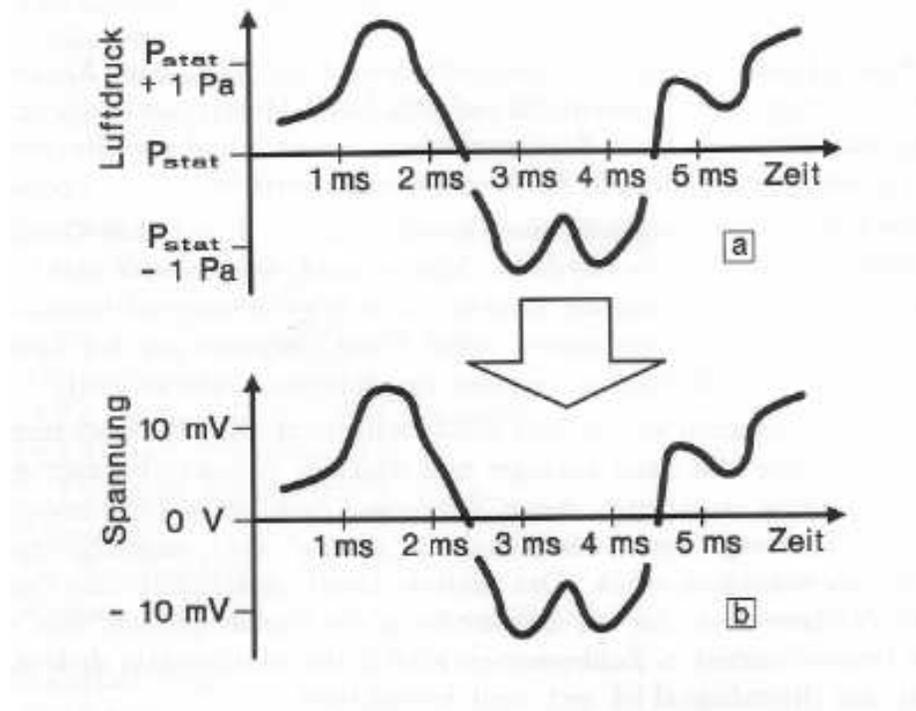
- Grammophon von E. Berliner, 1887 (Modell)  
(Phonomuseum St.Georgen/Schwarzwald)

# 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 Wiedergabegeräte (Kopfhörer und Lautsprecher) dominieren
- 1927: Langspielplatten mit elektrischer Technik (von Edison)
- 1935: Magnettontechnik
- 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 Signal

- Audiotechnik:
  - Signal meist gleichbedeutend mit Spannungsveränderung
- Grundfunktion eines Mikrofons:
  - Umsetzung von Luftdruckschwankungen in Spannungsschwankungen
  - Ausgangssignal eines Mikrofons ist eine *Wechselspannung*



# Allgemeine elektrotechnische Grundbegriffe

- *Strom (I)*:
  - gerichtete Bewegung von Elektronen in einem Leiter
  - gemessen in Ampere (A)
- *Spannung (U)*:
  - Kraft, die Elektronen in Bewegung setzt
  - gemessen in Volt (V)
- *elektrische Leistung (P)*:
  - Produkt aus Strom und Spannung
  - gemessen in Watt (W),  $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$
  - *Leistungsaufnahme – Leistungsabgabe = Verlustleistung (Wärmeabgabe)*
- *Widerstand (R)*:
  - Quotient aus Spannung und Strom
  - gemessen in Ohm ( $\Omega$ ),  $1 \Omega = 1 \text{ V} / 1 \text{ A}$
- *Kapazität (C)*:
  - Vermögen eines Kondensators, elektrische Energie (Ladung) zu speichern
  - gemessen in Farad (F),  $1 \text{ F} = 1 \text{ A} \cdot \text{s} / 1 \text{ V}$
- *Induktivität (L)*:
  - Vermögen einer Spule, magnetische Energie zu speichern
  - gemessen in Henry (H),  $1 \text{ H} = \text{V} \cdot \text{s} / 1 \text{ A}$

# Impedanz

- *Impedanz (Wechselstromwiderstand):*
  - Widerstand komplexer elektronischer Geräte ist immer frequenzabhängig
  - Komponenten:
    - » kapazitiv: Höherer Widerstand bei niedrigen Frequenzen
    - » induktiv: Höherer Widerstand bei hohen Frequenzen
    - » ohmsch: Frequenzunabhängiger Widerstand
  - *Nennimpedanz:* Wechselstromwiderstand bei fester Frequenz (z.B. 1 kHz)
  - Eingangs-, Ausgangsimpedanz
  - *Lastimpedanz (Abschlussimpedanz):* Zulässiger Impedanzbereich, in dem angeschlossene Geräte liegen dürfen
    - » Beispiel: Eingangsimpedanz eines Lautsprechers ist Lastimpedanz für den Verstärker
    - » darf bestimmten Wert (meist 4  $\Omega$ ) nicht unterschreiten

# 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
- 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**

*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:

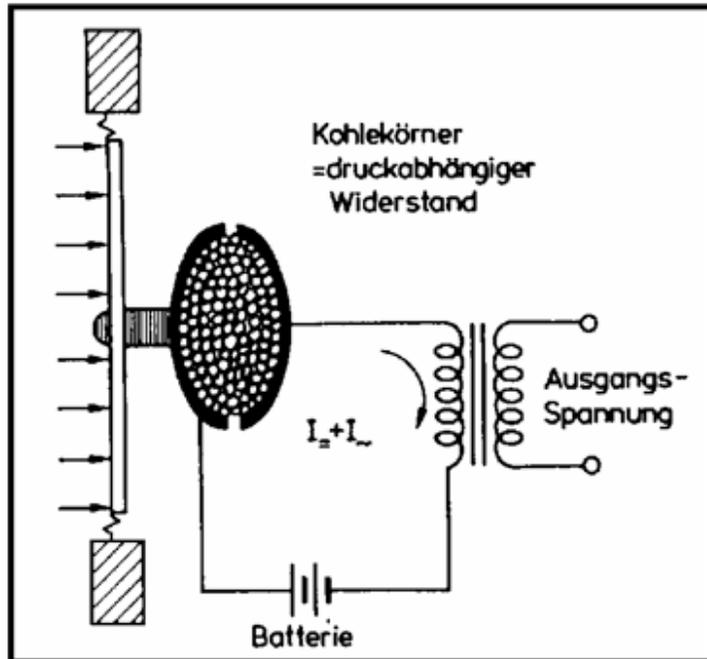
$$L_{P'} = 20 \cdot \log\left(\frac{2 \cdot V_A}{V_E}\right) = 20 \cdot \log(2) + L_P = 6 + L_P$$



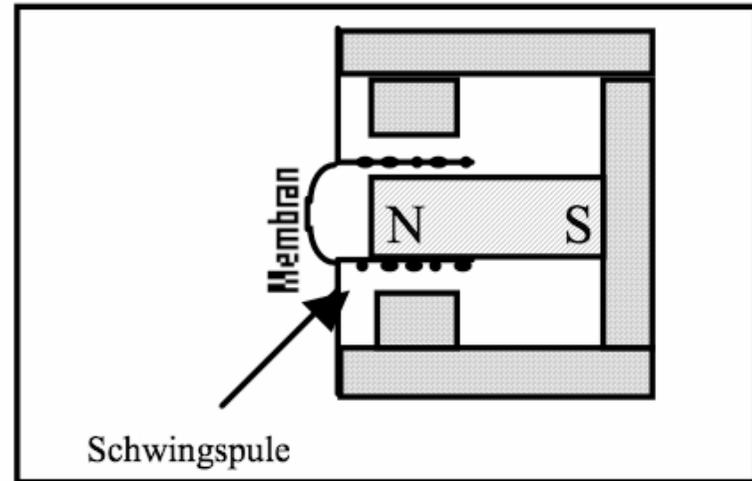
# Grundprinzipien der Schallwandlung

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



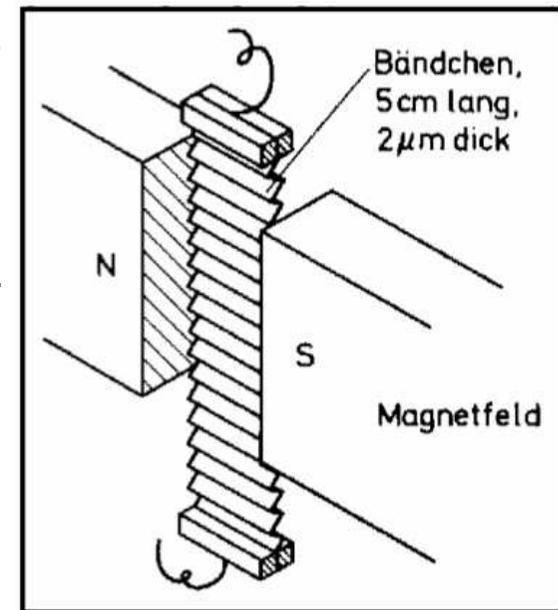
Kohlemikrofon  
(preisgünstig, nicht im Studio- oder HiFi-Bereich; typische Anwendung: ältere Telefonmikrofone)



Tauchspulen-Mikrofon

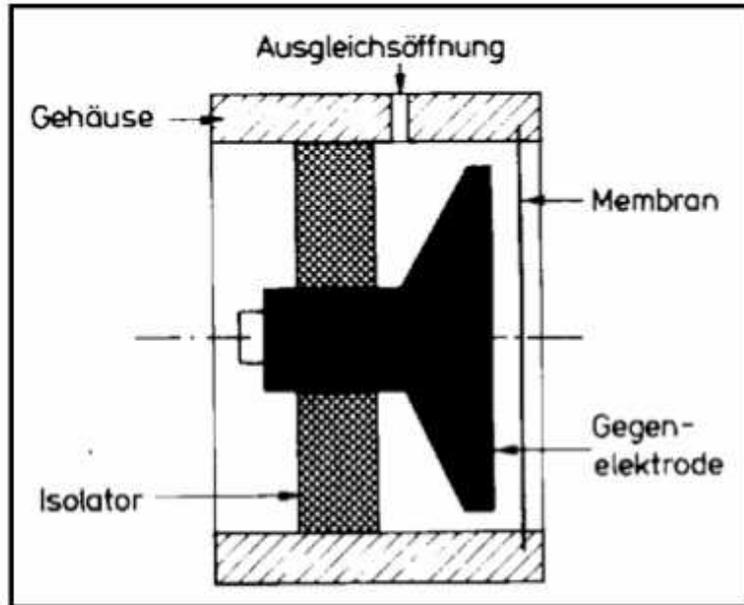
Bändchen-Mikrofon

elektrodynamische Mikrofone  
(robust, gutes Preis-leistungsverhältnis; oft auf bestimmte Frequenzbereiche spezialisiert)

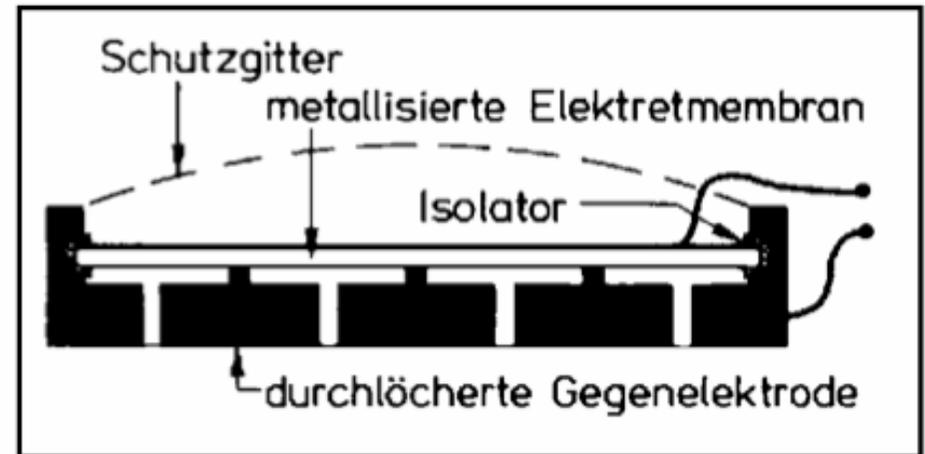


Quelle: Jürg Jecklin, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

# 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)

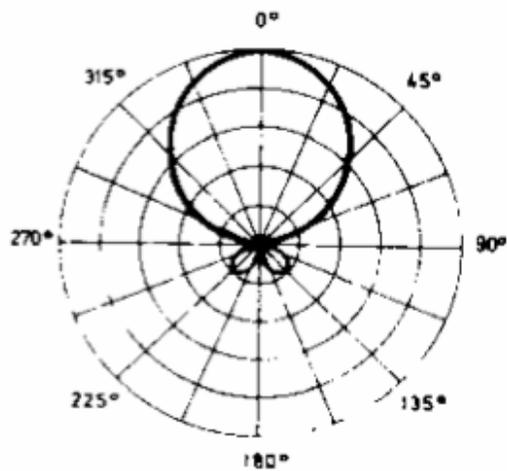
Quelle: Jürg Jecklin, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

# Weitere Mikrofontyp Unterscheidungen

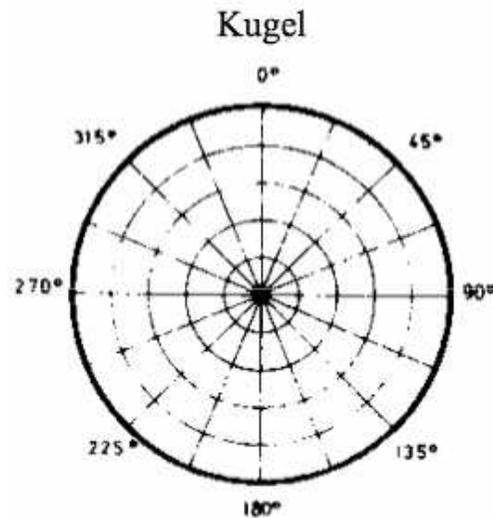
- Freifeld- vs. Grenzflächen-Mikrofon
  - Freifeldmikrofon:
    - » Auf Stativ oder in der Hand
  - Grenzflächenmikrofon:
    - » Direkt an Wänden, Tischen, Böden
    - » Vermeidet Interferenzen mit Reflexionen
    - » meist Elektretmikrofone
- Körperschallmikrofone, Pick-Up-Mikrofone
  - zur Befestigung am Instrument (z.B. Gitarre)
  - nimmt nur Instrumententöne auf, nicht die Umgebungsgeräusche

# Richtcharakteristiken

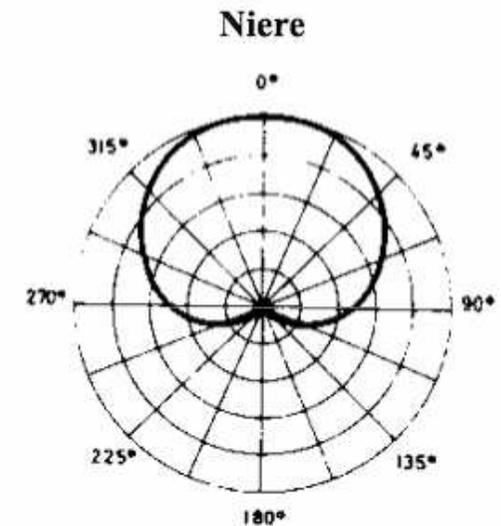
Darstellung der Empfindlichkeit für Schall aus verschiedenen Richtungen  
Z.B. Nierencharakteristik für Richtmikrofone



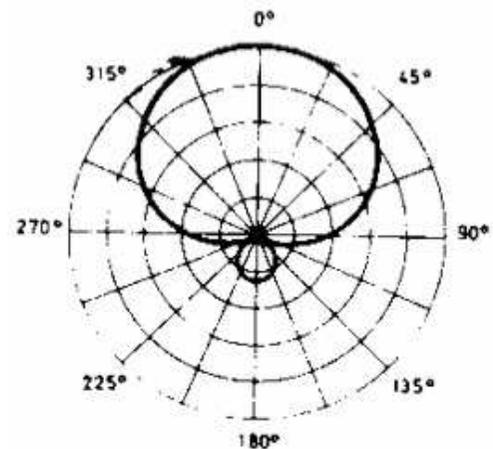
Keule



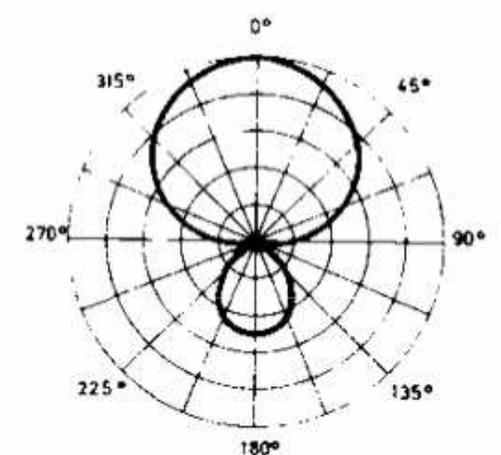
Kugel



Niere



Superniere



Hyperniere

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

# Wofür welches Mikrofon?

- Kugelcharakteristik: “Rundum-Mikrofone”
  - Einfangen von Atmosphäre
  - Nimmt auch Geräusche des Aufnehmenden mit auf
    - » Laufgeräusche von Motoren, Geräusche beim Gehen etc.
  - Eingebaute Kameramikrofone haben oft Kugelcharakteristik
- Nieren-, Supernieren-, Keulencharakteristik
  - Gezieltes Aufnehmen einer Quelle
  - Kann Störgeräusche ausblenden
  - Sprecher, Dialog, Interview
- Charakteristik bei hochwertigen Mikrofonen oft umschaltbar

# Stereo-Mikrofonverfahren

- Stereoempfinden durch:
  - Intensitätsunterschiede
  - Laufzeit- und Phasenunterschiede
- Zwei Mikrofone nehmen dasselbe Signal auf
- Intensitätsstereofonie:
  - z.B. XY-Anordnung: Zwei Mikrofone mit Nierencharakteristik um 90° oder 120° gegeneinander verdreht
  - Hohe "Präsenz"
- Laufzeitstereofonie:
  - z.B. AB-Anordnung: Zwei Mikrofone mit Kugelcharakteristik in ca. 50 cm Abstand
  - Hohe "Räumlichkeit"
- Äquivalenzstereofonie:
  - Naturgetreue Nachbildung des menschlichen Hörens
  - z.B. mittels Kunstkopf (Kopfnachbildung mit Mikrofon-"Ohren")
  - z.B. mittels Ohrmikrofonen ("Originalkopf")



# 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 Poppchutz



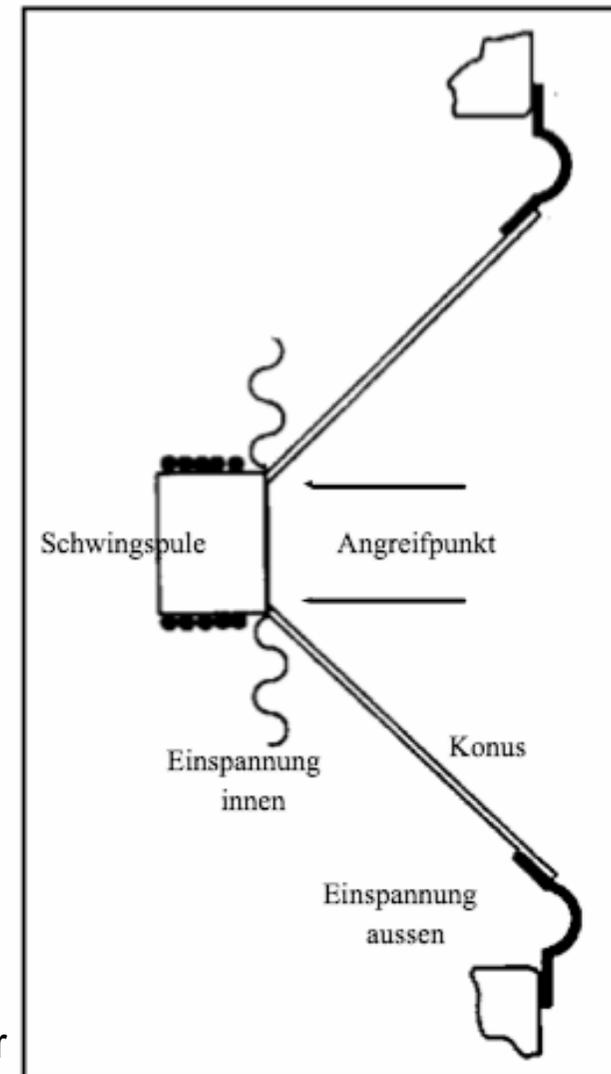
Sprecher unter Mikrofon, mit Poppchutz



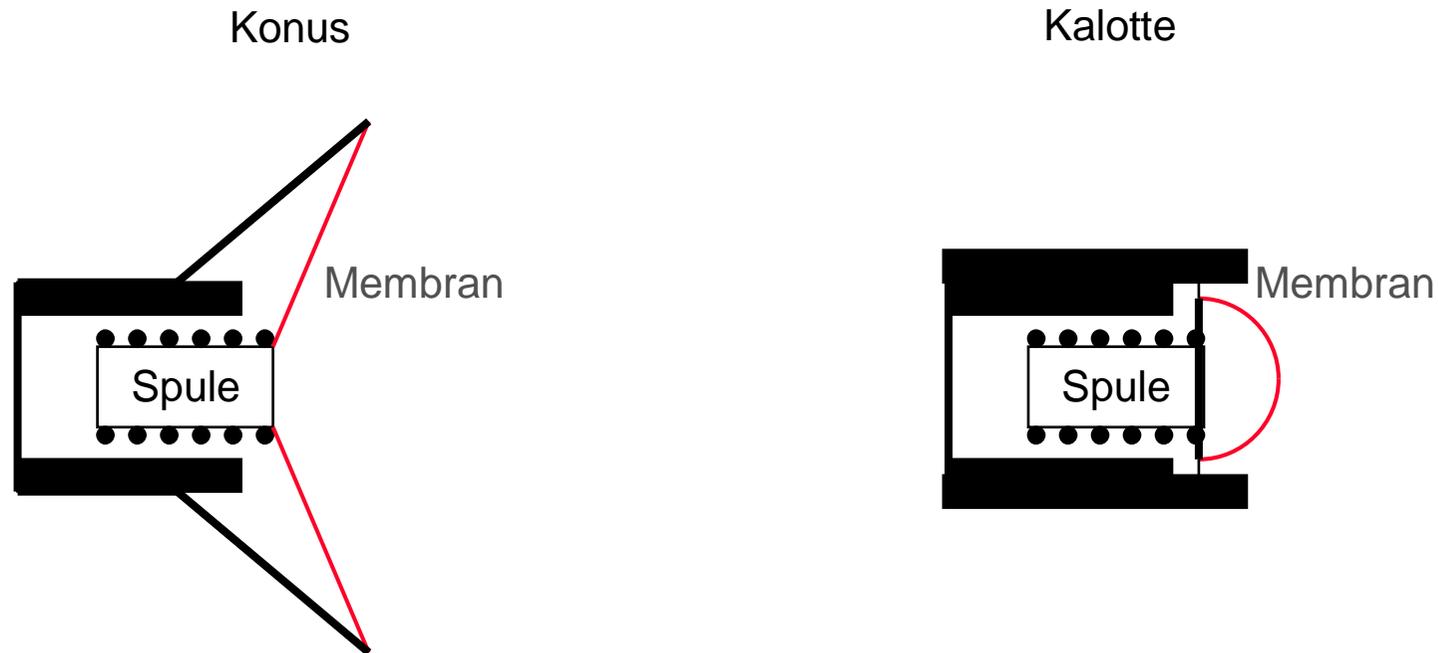
# Lautsprecher

- 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

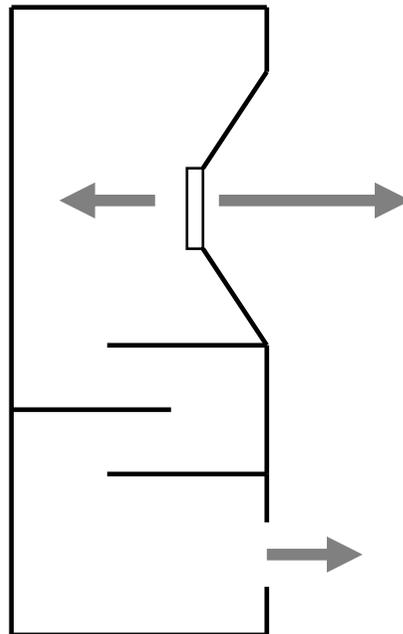


Typischerweise bestehen Lautsprecherboxen aus mehreren verschiedenen Einzellautsprechern mit einer "Frequenzweiche"  
z.B. Hochtöner, Mitteltöner, Tieftöner

Lautsprecher werden in Boxen eingebaut, um "akustischen Kurzschluss" (sofortigen Druckausgleich) zu vermeiden

# Bass-Reflexbox

- Durch Einbau in Gehäuse geht ca. 50% der Schallenergie verloren
- Bei Bass-Lautsprechern lenkt man die rückwärtige Schallkompression nach vorne um, um den Wirkungsgrad zu verbessern.



# A3. Digitale Tonverarbeitung

A3.1 Akustische Grundlagen der Audiotechnik

A3.2 Analoge Audiotechnik



A3.3 Digitale Audiotechnik

Literatur:

M. Warstat, Th. Görne: Studioteknik, 5. Auflage,  
Elektor-Verlag 2002

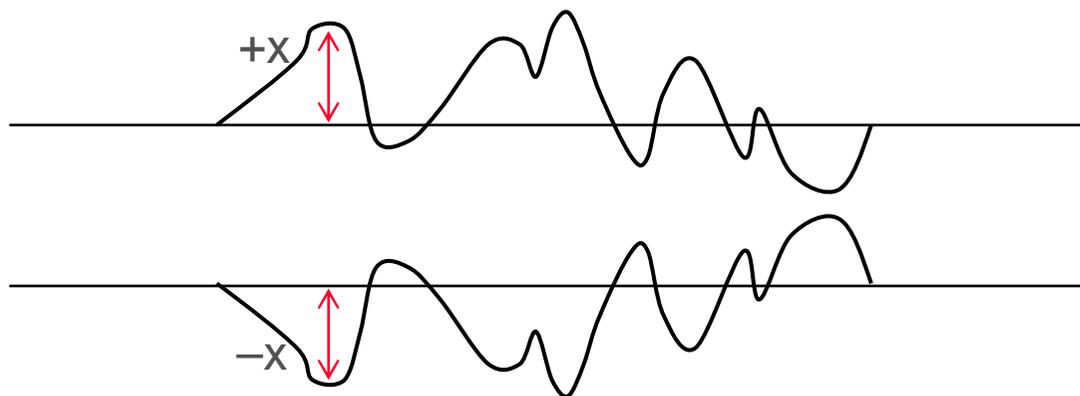
H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

# Interferenz und Schwebung

- *Interferenz*: Überlagerung von Schallwellen exakt gleicher Frequenz
  - konstruktive Interferenz (*in phase*):
    - » Übereinstimmung der Phasenlage
    - » Addition der Amplituden
  - destruktive Interferenz (*out of phase*):
    - » Gegenphasige Lage ( $180^\circ$  verschoben)
    - » Subtraktion der Amplituden – Auslöschung
- *Schwebung*: Überlagerung von Wellen annähernd gleicher Frequenz
  - konstruktive und destruktive Interferenz wechseln sich ab
  - Amplitudenverlauf beschreibt neues Signal mit Frequenz = Differenz der überlagerten Frequenzen

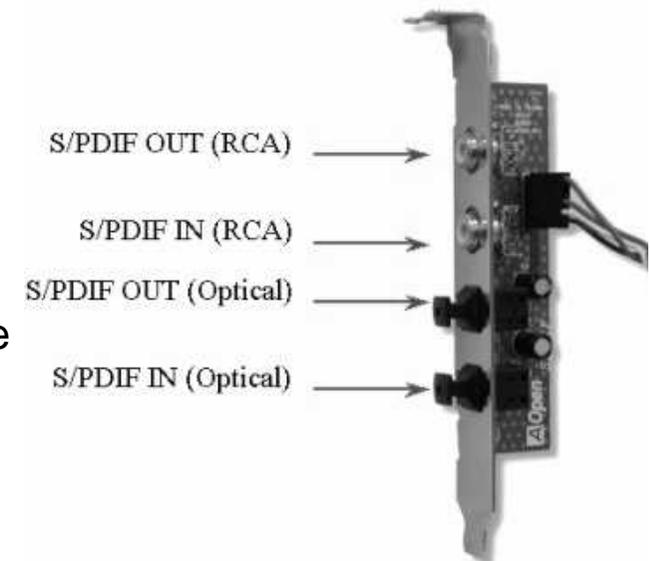
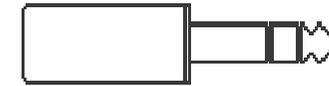
# Anschlussstechnik: Leitungen

- 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



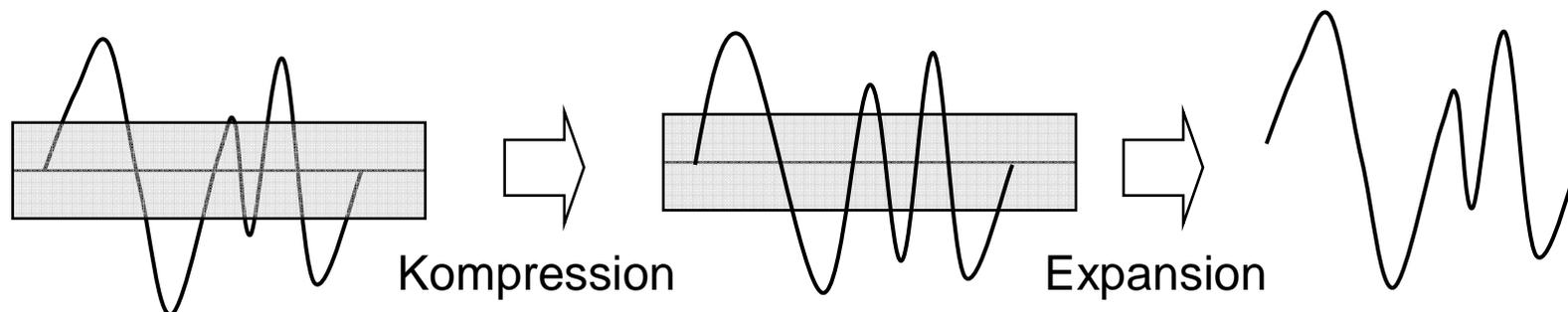
# Anschlussstechnik: Steckernormen

- 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, verwendet entweder Cinch-kompatible Verbinder (elektrisch) oder optische Schnittstelle
  - Einsatz z.B. bei Dolby Pro-Logic (Dolby Surround, 4 Kanäle) oder „5.1“ Systemen (6-Kanalverfahren)



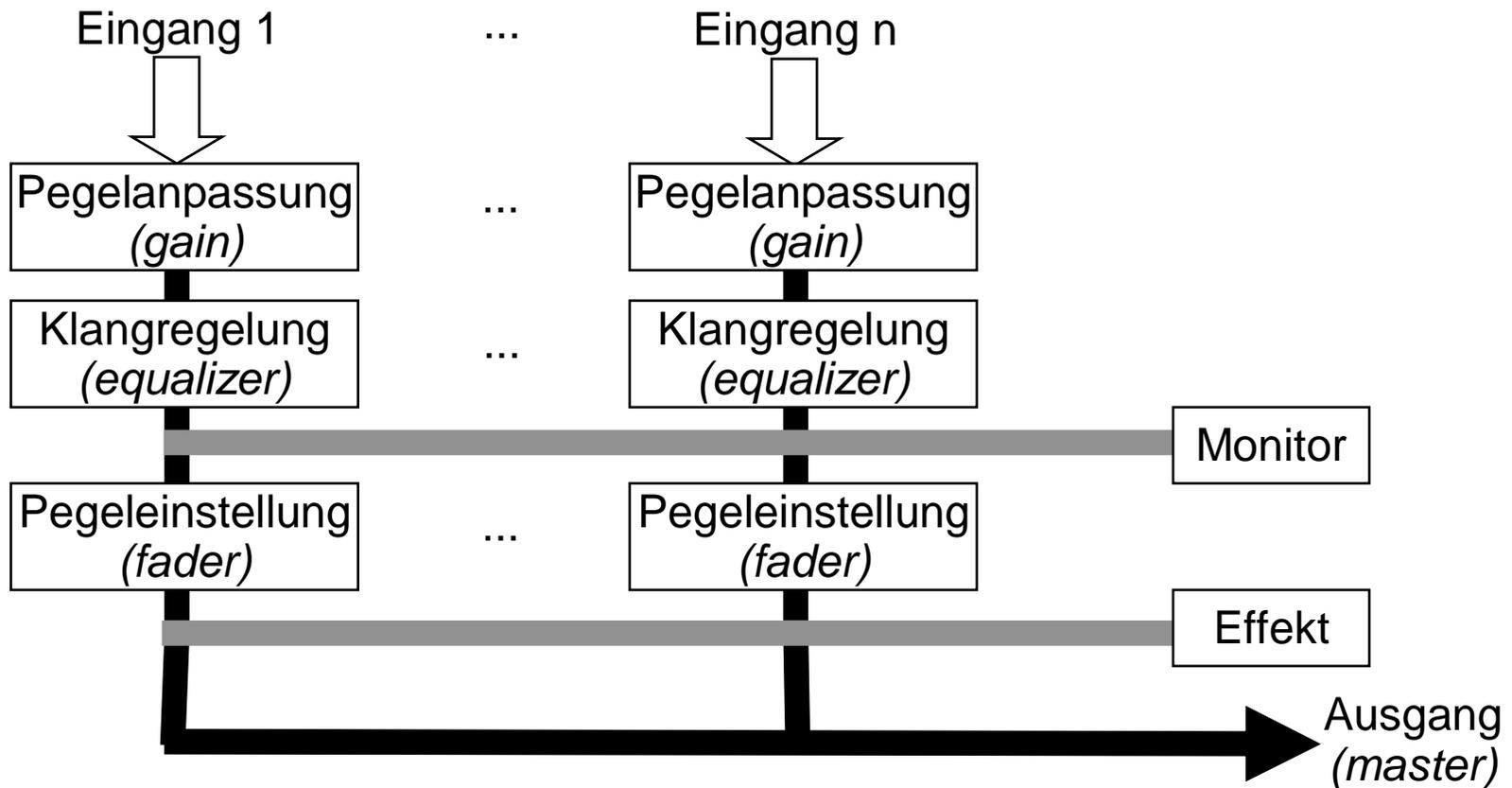
# Kompander

- Typische Komponente für Analogtechnik
- Analoge Komponenten führen zu störendem Rauschen
  - vor allem "Eigenrauschen" bei Magnetbandaufzeichnung
  - Bei Tonbandaufnahmen mit grosser "Dynamik" (d.h. großem Unterschied zwischen höchstem und niedrigstem Signalpegel) stört das Bandrauschen die leisen Passagen
- Abhilfe: Kompressor – Expander (= Kompander)
  - Signal wird auf kleineren Dynamikumfang "komprimiert" (leise Passagen angehoben, laute abgesenkt) und später wieder "expandiert"
    - » Kompressor und Expander auch als separate Klangeffekte, sh. später
  - Bekannte Produktstandards: Dolby A/B/C/SR, dbx

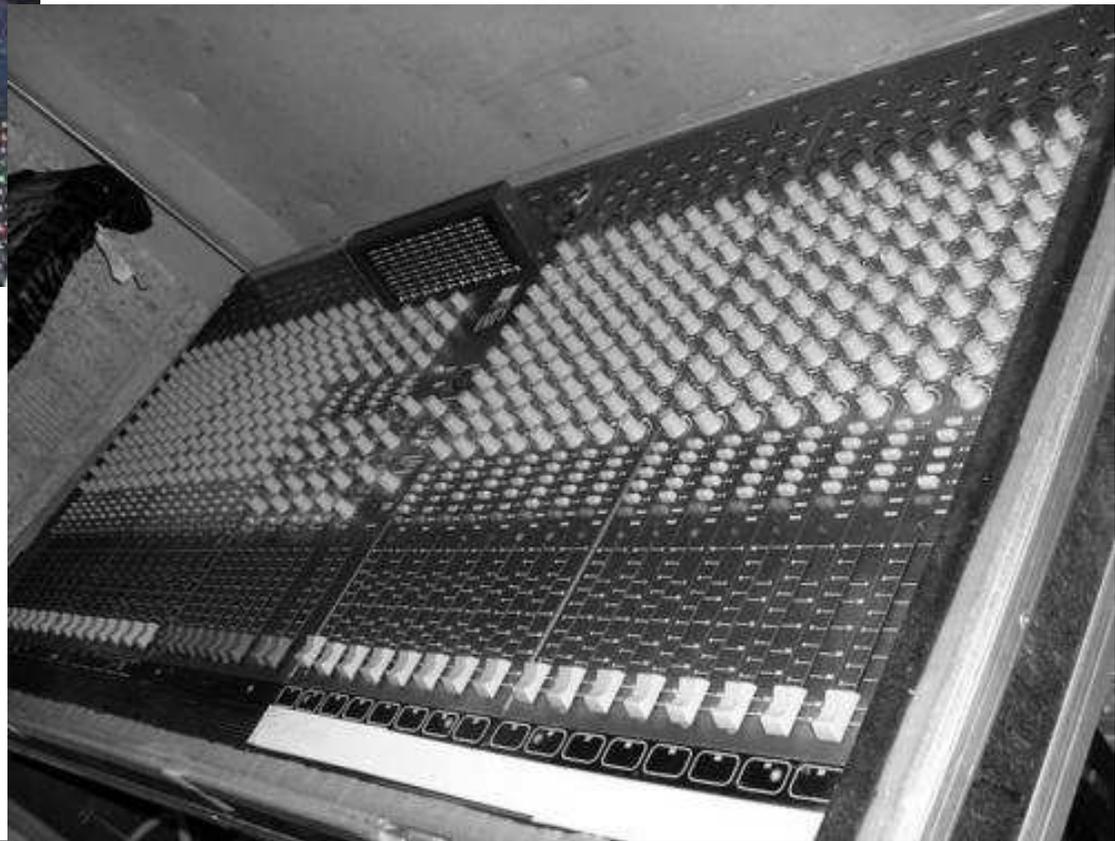


# Mischpult

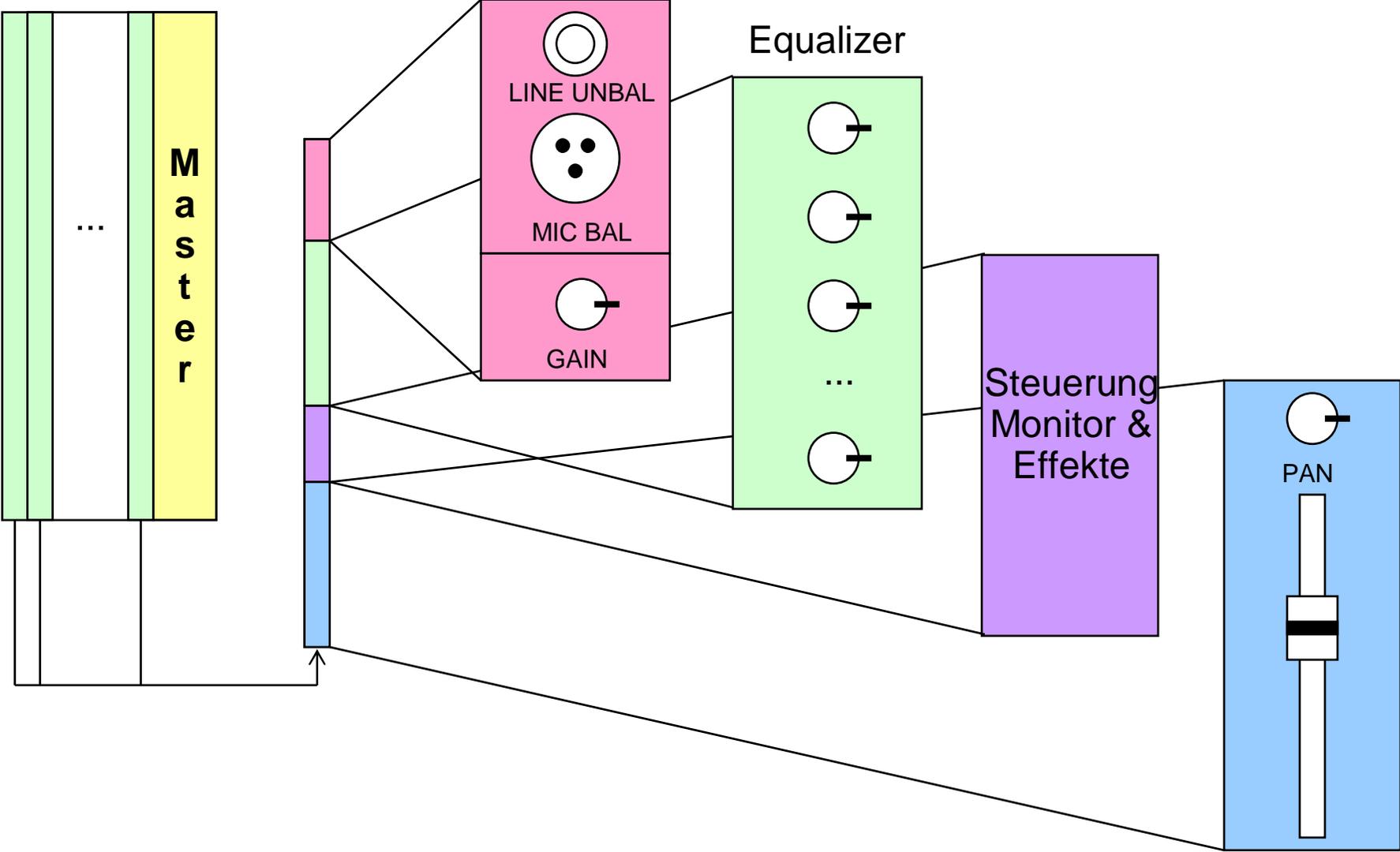
- Tonregieanlage: Herzstück eines Tonstudios
  - Pegelanpassung
  - Klangbearbeitung
  - Signalverteilung



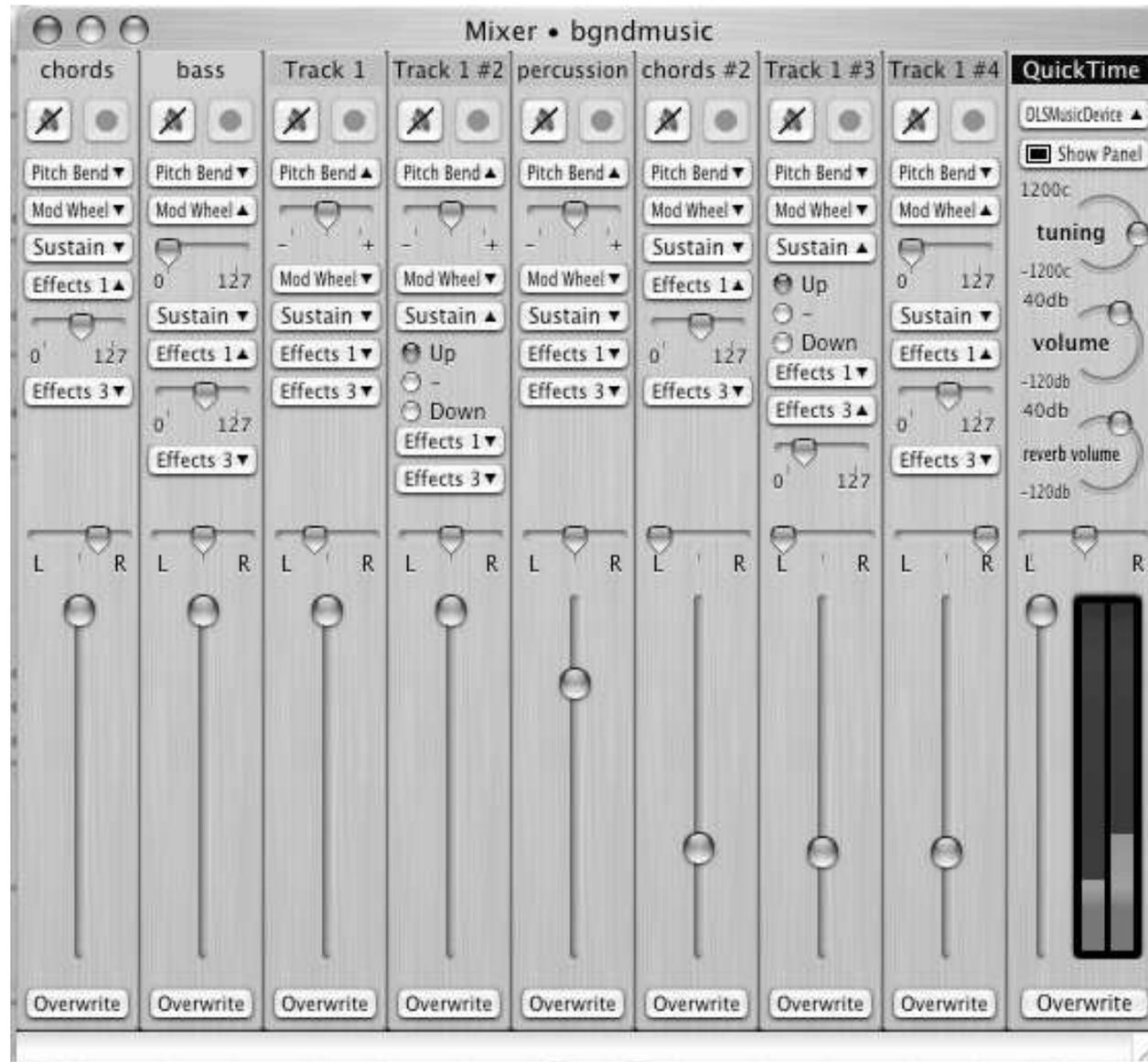
# Reale Audio-Mischpulte



# Bedienungselemente eines Mischpults (Prinzip)



# Ein virtuelles Mischpult



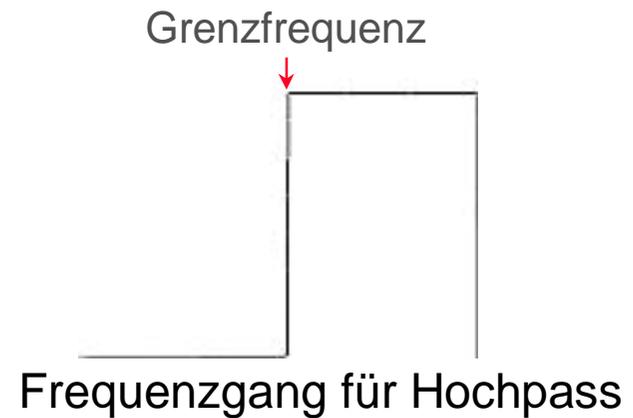
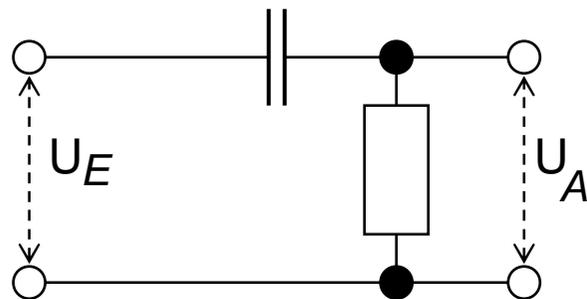
Software:  
Intuem 2.1.0

# Frequenzfilter

- Frequenzfilter sind Schaltungen oder Algorithmen, die ein von der Frequenz abhängiges Übertragungsverhalten von Eingang zu Ausgang aufweisen.
- 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

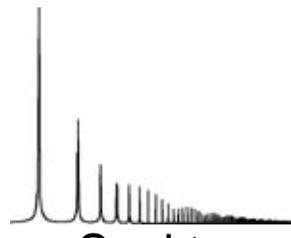
- Hochpass: lässt hohe Frequenzen durch, blockiert niedrige Frequenzen
- Elektrotechnische Realisierung
  - "RC-Hochpass erster Ordnung"



Eingangssignal:  
Sägezahnswingung



Signalverlauf

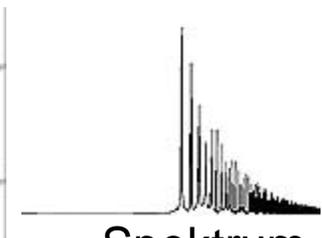


Spektrum

Resultat nach Hochpass:



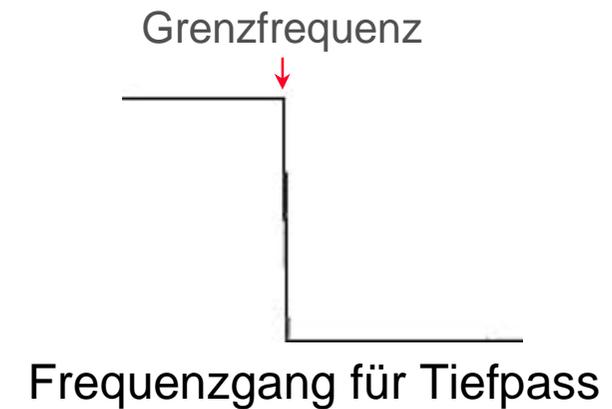
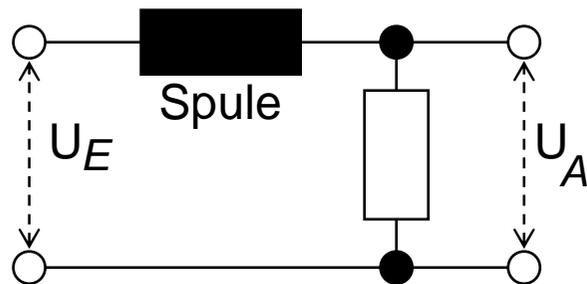
Signalverlauf



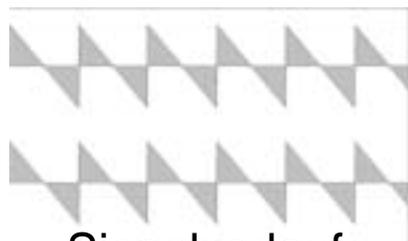
Spektrum

# Tiefpass

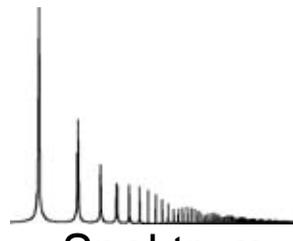
- Tiefpass: lässt tiefe Frequenzen durch, blockiert hohe Frequenzen
- Elektrotechnische Realisierung
  - "RL-Tiefpass erster Ordnung"



Eingangssignal:  
Sägezahnswingung



Signalverlauf

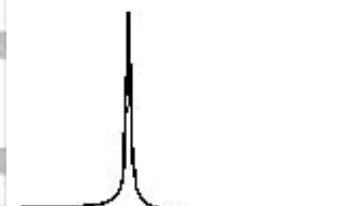


Spektrum

Resultat nach Tiefpass:



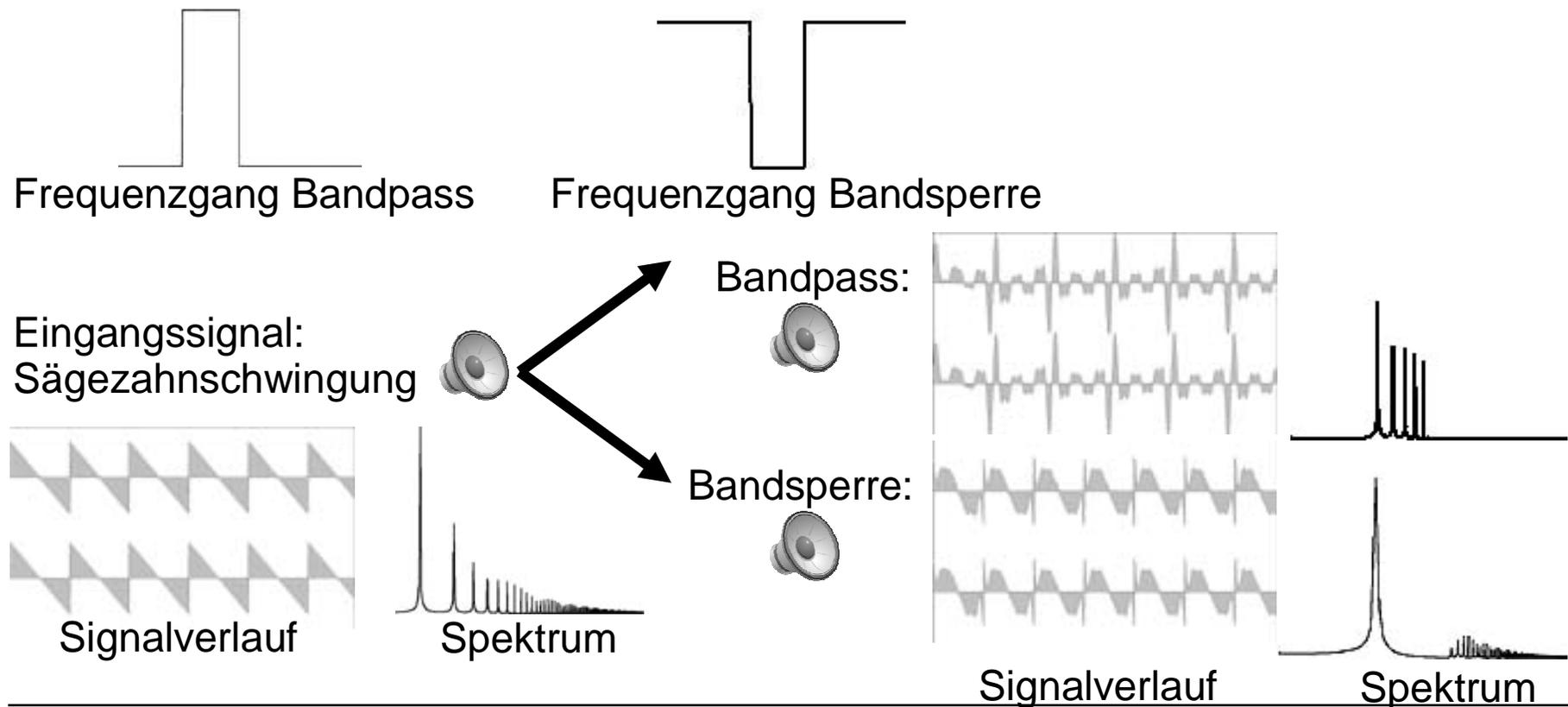
Signalverlauf



Spektrum

# Bandpass, Bandsperre

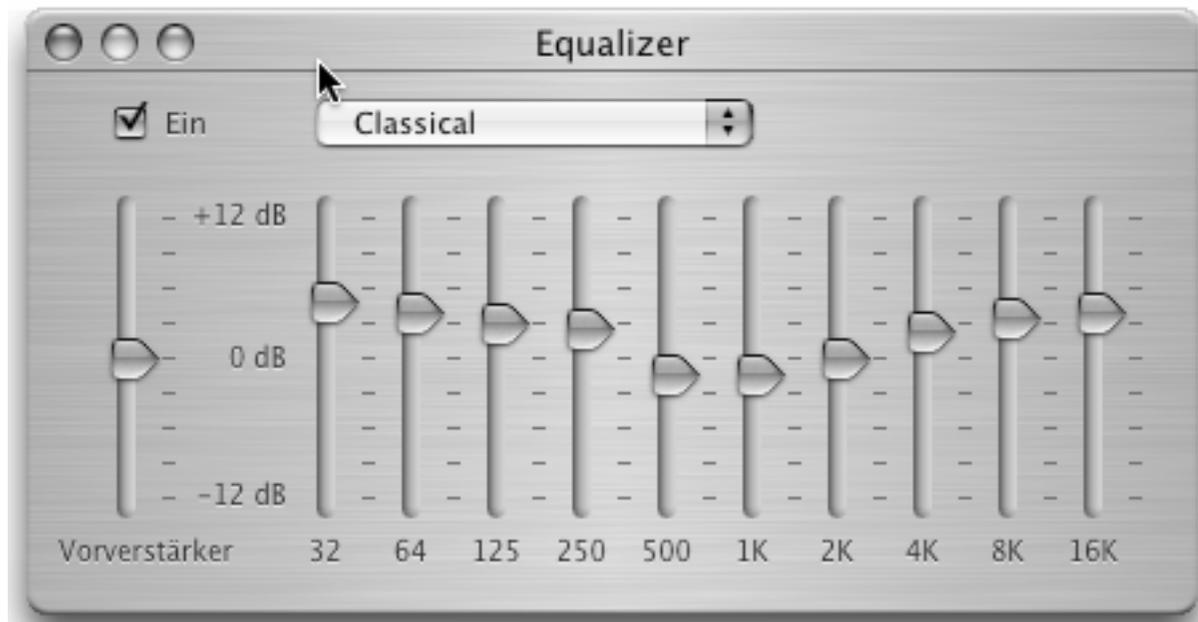
- Bandpass: lässt Frequenzen in bestimmtem Intervall durch, blockiert andere Frequenzen
- Bandsperre: blockiert Frequenzen in bestimmtem Intervall durch, lässt andere Frequenzen durch



# Equalizer

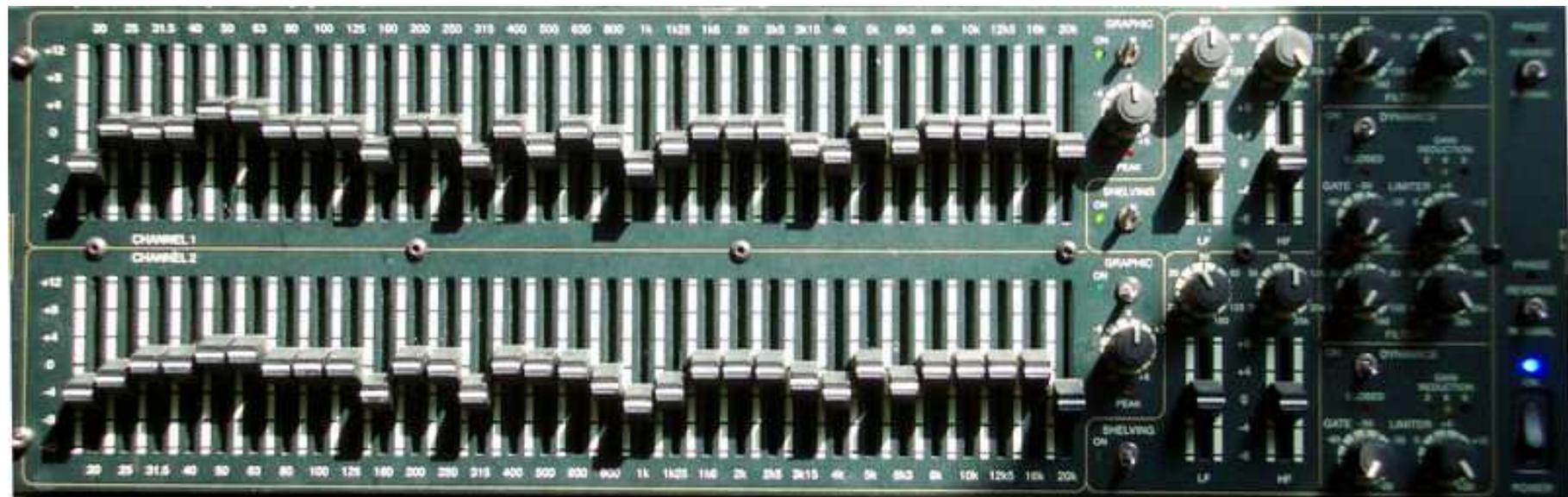
- Ursprung:
  - Ausgleichen von Frequenzgang-Unterschieden zwischen verschiedenen Mikrofonen (Linearisierung)
- Heutzutage:
  - Generelles Instrument zur frequenzselektiven Klangveränderung
  - Ausdruck von Künstler und Produzent optimieren
  - Musikstil optimal umsetzen (Klassik, Pop, Rock, ...)

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

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

