

Medientechnik

Andreas Butz

Ludwig-Maximilians-Universität München

Sommersemester 2008

Vorlesungskonzept: Heinrich Hußmann

4. Digitale Tonverarbeitung

- 4.1 Grundlagen der Audiotechnik
- 4.2 Analoge Audiotechnik
- 4.3 Digitale Audiotechnik
- 4.4 Raumklang



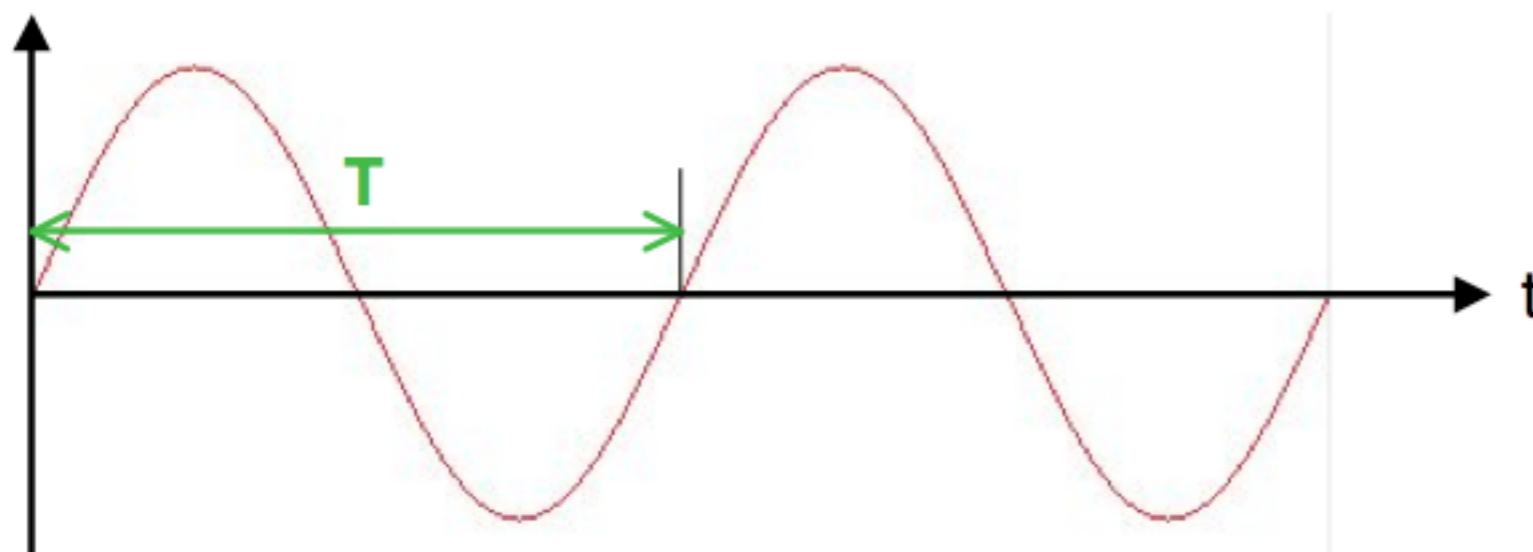
Literatur:

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

H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

Ton & Frequenz

- Akustischer Reiz entsteht durch (schnelle) Luftdruckschwankung
- unregelmäßig --> Geräusch
- periodisch: wird als Ton wahrgenommen
- Periodendauer T in Sekunden, Frequenz f in Hz = 1/s
- siehe auch Vorlesung Digitale Medien



Sinus-Signal

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

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

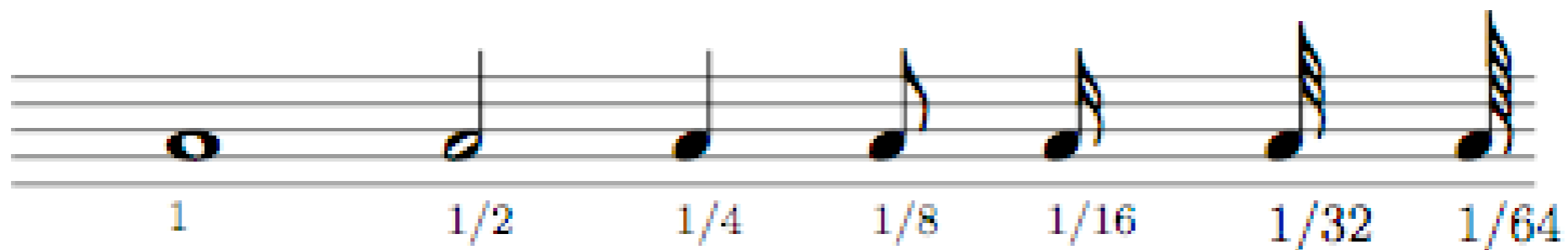
Zwölfstufiges Tonsystem



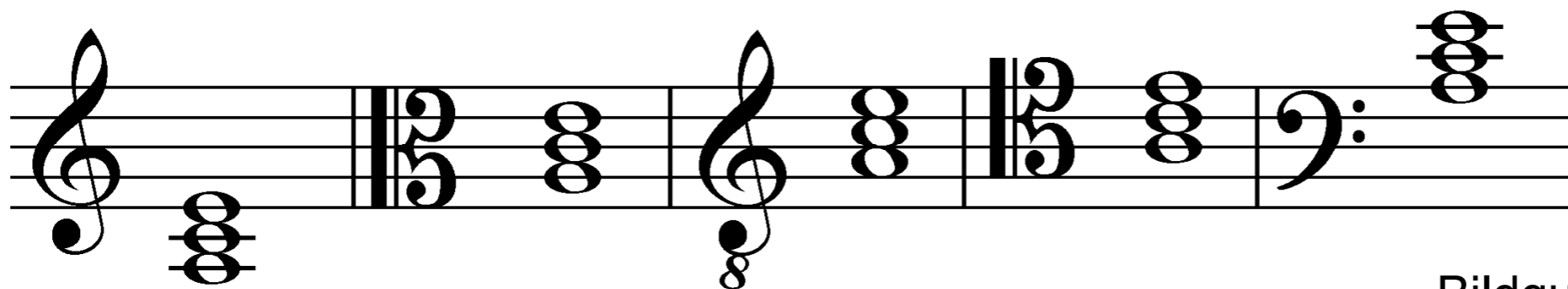
- 1 Oktave = Frequenzverhältnis 2:1
- gleichmäßig unterteilt in 12 Halbtonschritte
- Ganztonschritt = 2 Halbtonschritte
- Intervalle: Prime, Sekunde, Terz, Quarte, Quinte, Sexte, Septime, Oktave, (None, Dezime, ...)
- Frequenzverhältnis eines Halbtonschrittes etwa $\sqrt[12]{2} : 1$
- genaues Verhältnis abhängig von der verw. Stimmung
 - Gleichstufige Stimmung: exakt gleiche Freq.verhältnisse
 - Reine Stimmung: ganzzahlige Frequenzverhältnisse für alle Intervalle (z.B. Quinte = 2 : 3, Quarte = 3 : 4), klingt nur in einer Tonart, tritt z.B. bei Blasinstrumenten auf
 - Wohltemperierte Stimmung: alle Tonarten sind gleichermaßen spielbar, z.B. Klavier

Notation von Tönen

- Notenschrift dient zum Festhalten von Kompositionen
 - verschiedene Schriften, historisch und kulturell verschieden
 - hier: nur die heutzutage bei uns verwendete Notation
- Nette Einführung: http://www.aviva-berlin.de/aviva/content_Girls%20+%20Boys.php?id=1854
- Noten als Markierung in einem Notensystem aus 5 Linien
- Form der Note gibt Dauer bzgl. Taktschlägen an



- Notenschlüssel schafft Bezug zu einem Grundton

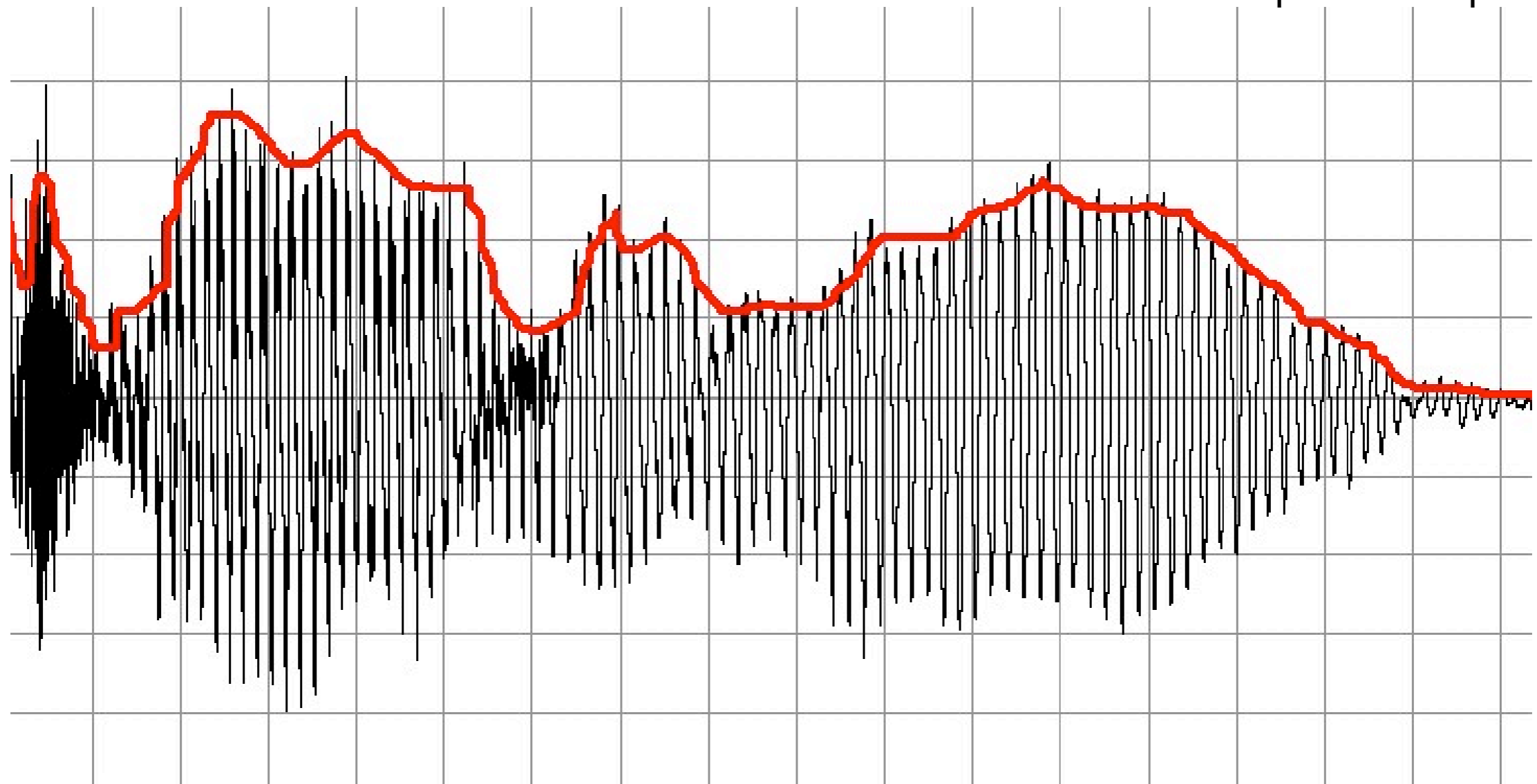


Bildquelle: Wikipedia

Signal & Hüllkurve

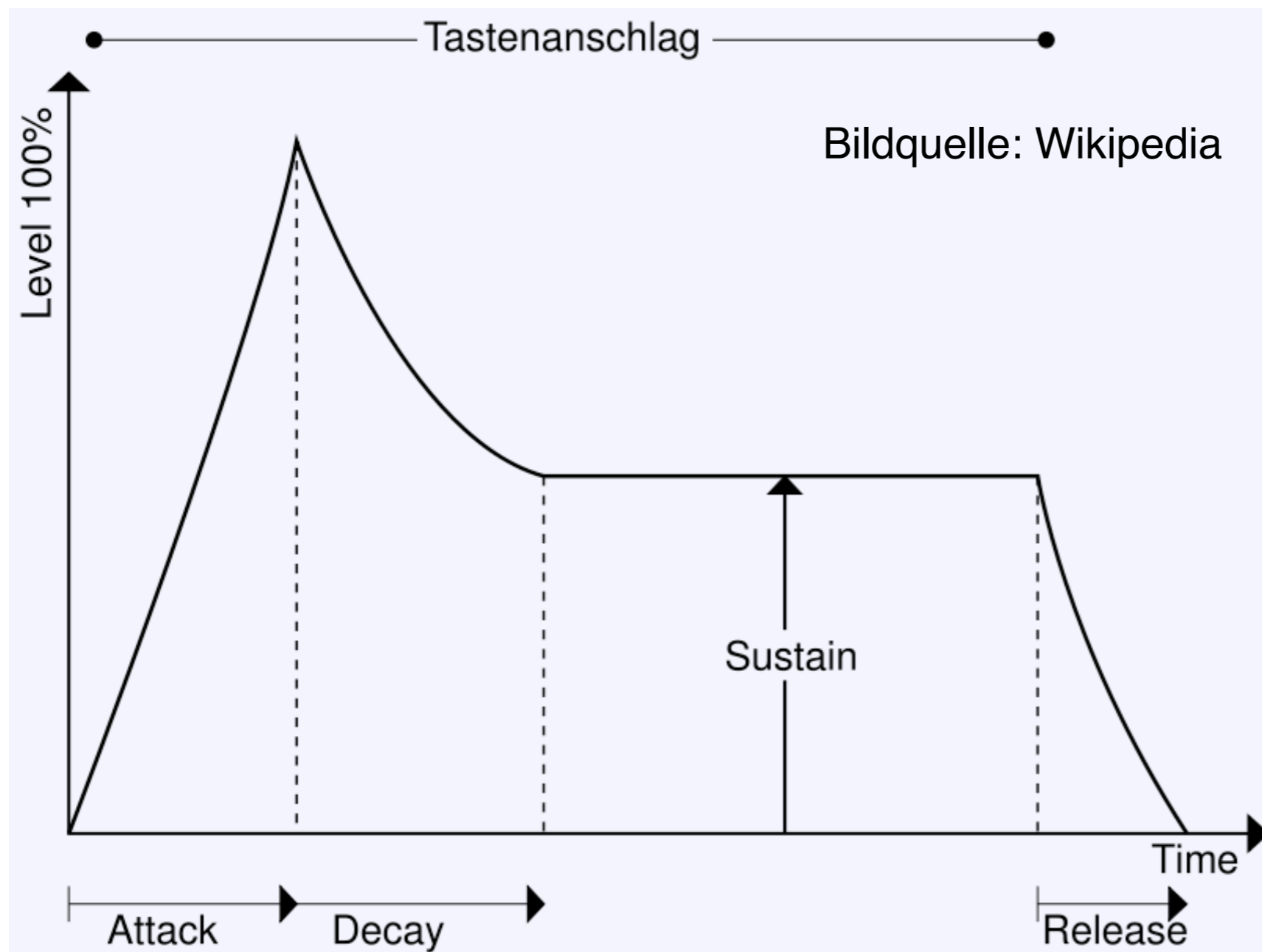
- Die Hüllkurve verbindet die Spitzen eines (periodischen) Signals
- in manchen Folien dieser Vorlesung sind nur Hüllkurven gezeigt!

Bildquelle: Wikipedia



ADSR Hüllkurve

- Verwendung z.B. im analogen Synthesizer
- Begrifflichkeit taucht auch an anderen Stellen auf



Ein frühes Grammophon



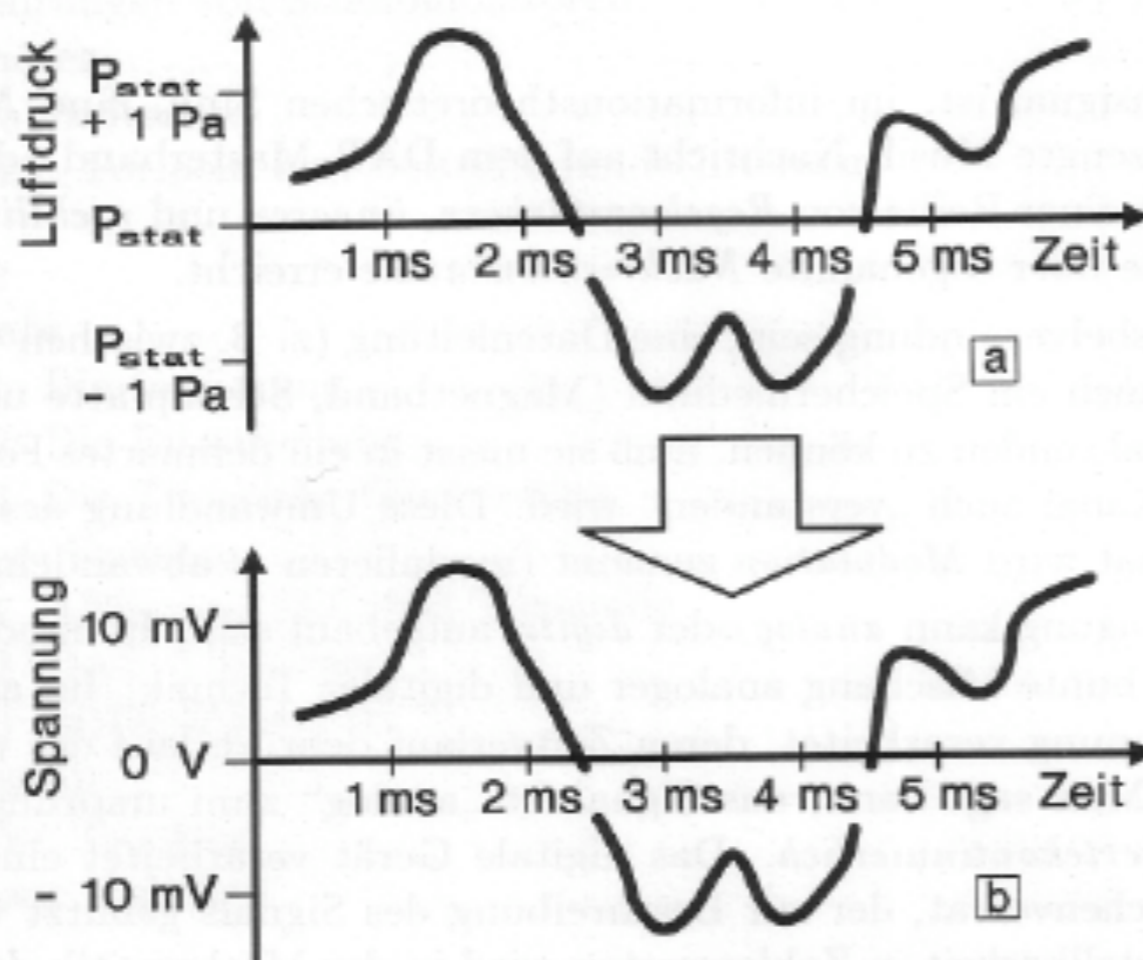
- Grammophon von E. Berliner, 1887 (Modell)
(Phonomuseum St.Georgen/Schwarzwald)

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 (Ω), $1 \Omega = 1 \text{ V} / 1 \text{ A}$
- *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 4Ω) 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**

$$\log(2) = 0.301029996$$

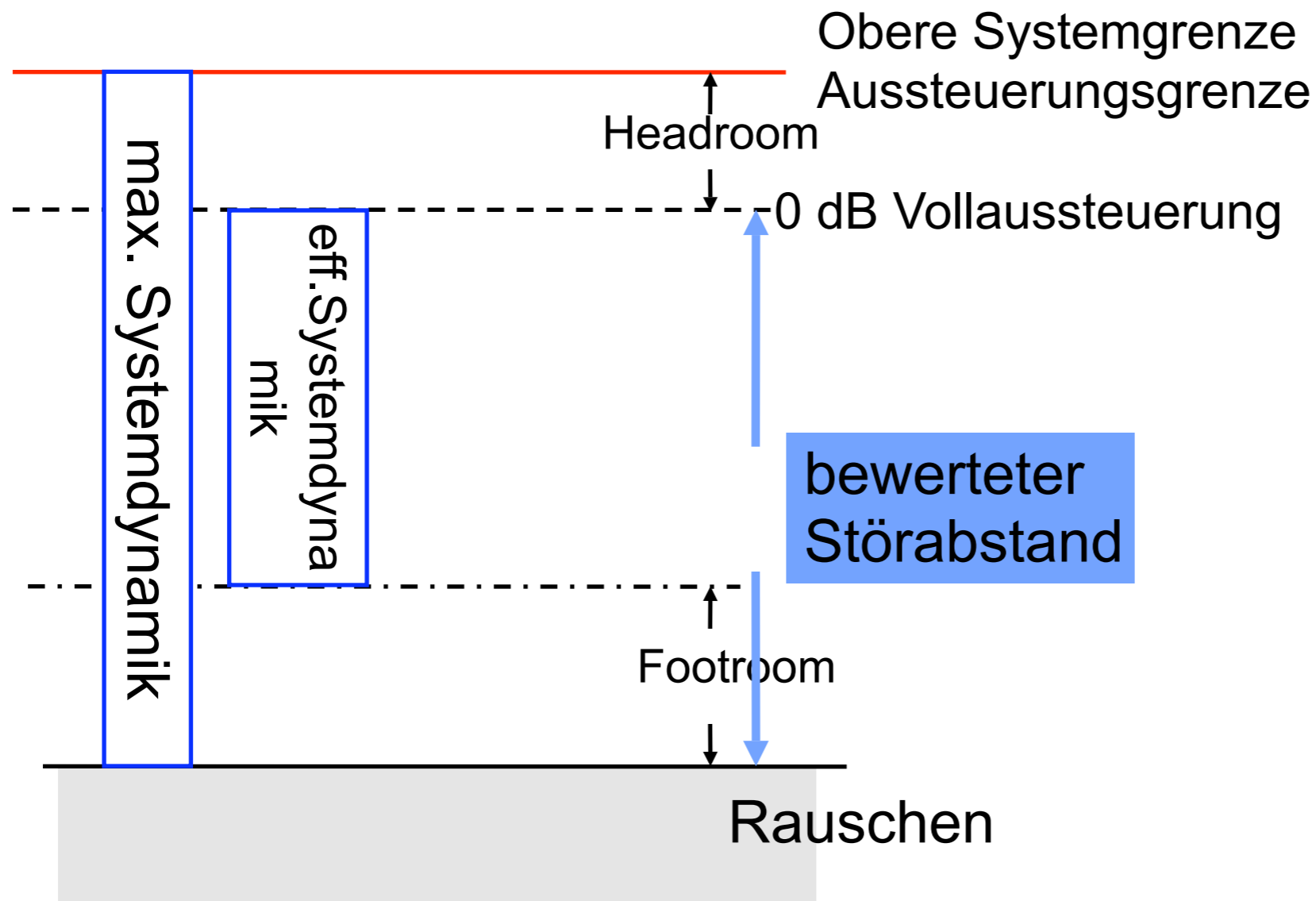
Amplitudenpegel (effektive Amplitudenwerte):

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

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)

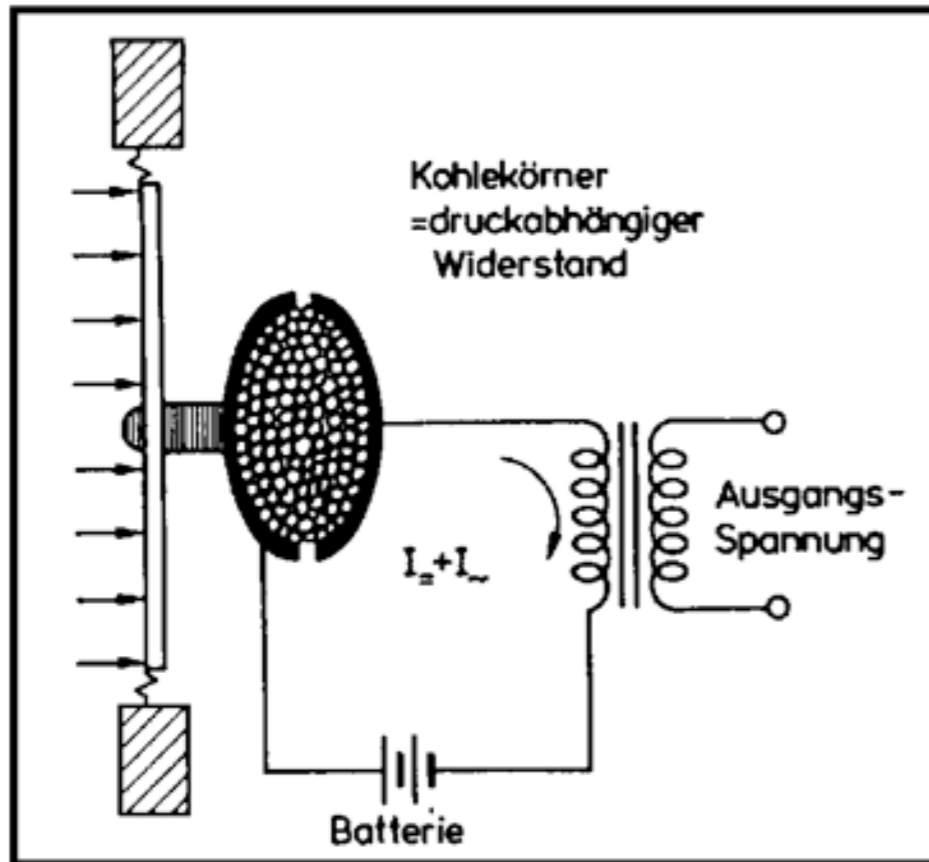
Arbeitsbereich abhängig von Gerätetechnologie (z.B. -40 dB VU bei analogem Bandgerät)

Quelle: Seminar E-Technik Uni Erlangen

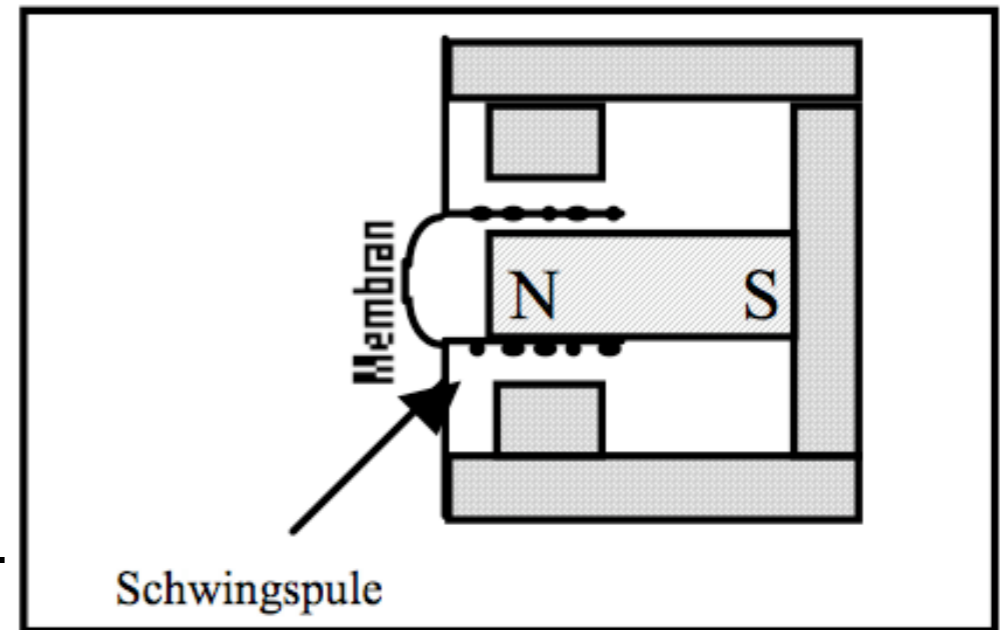
Grundprinzipien der Schallwandlung

- 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)



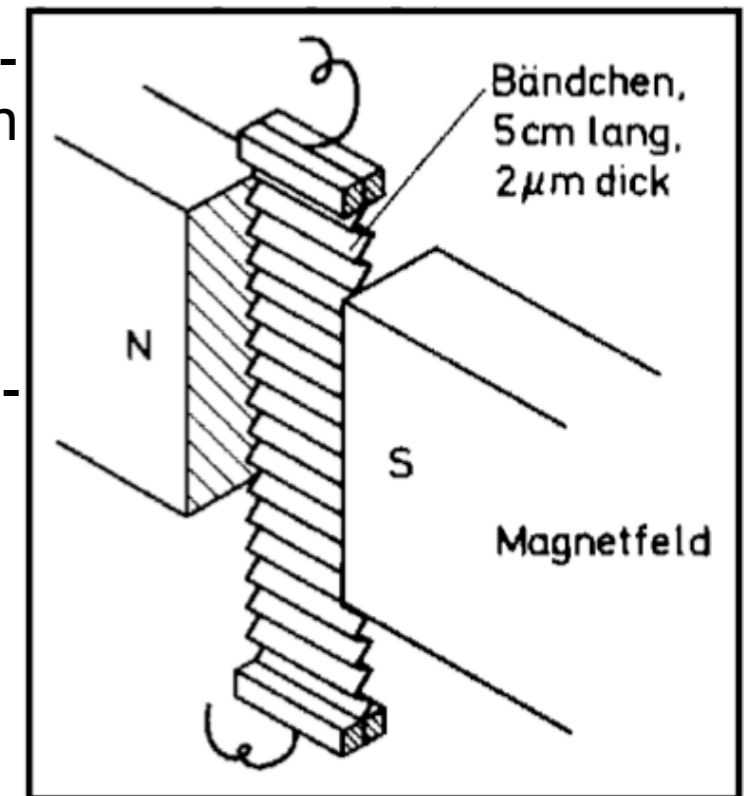
Kohlemikrofon
(preisgünstig, nicht im Studio- oder HiFi-Bereich; typische Anwendung: ältere Telefonmikrofone)



Tauchspulen-
Mikrofon

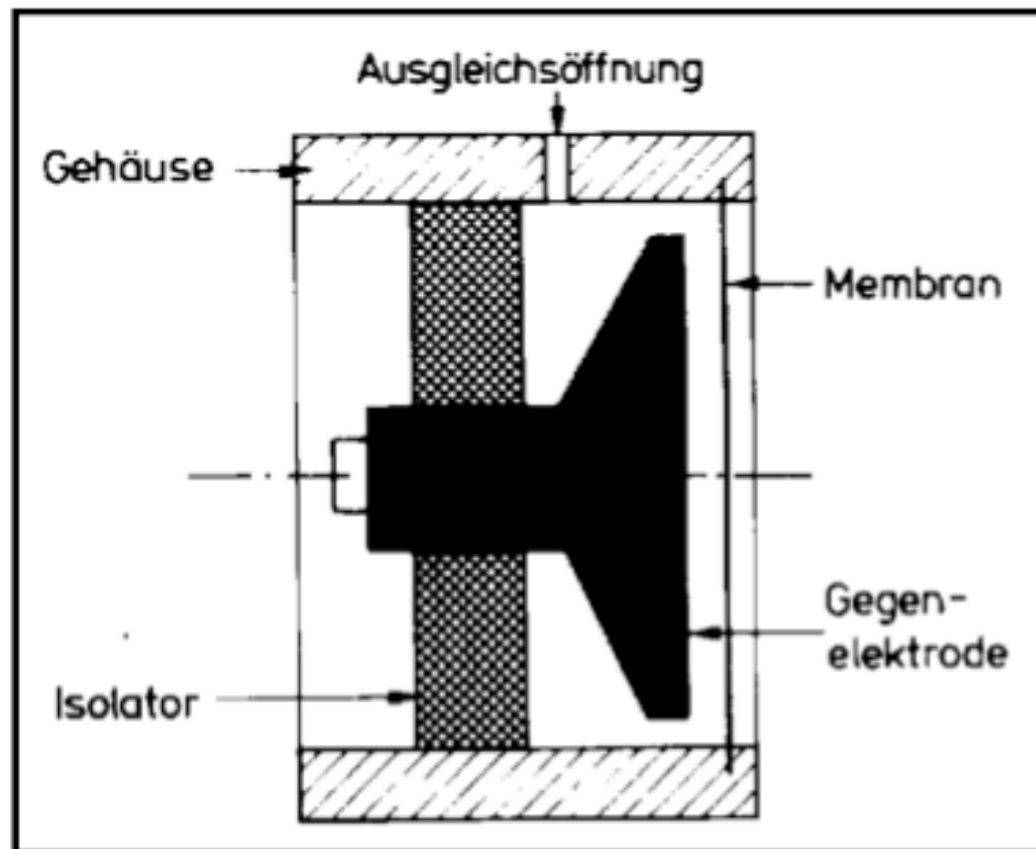
Bändchen-
Mikrofon

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

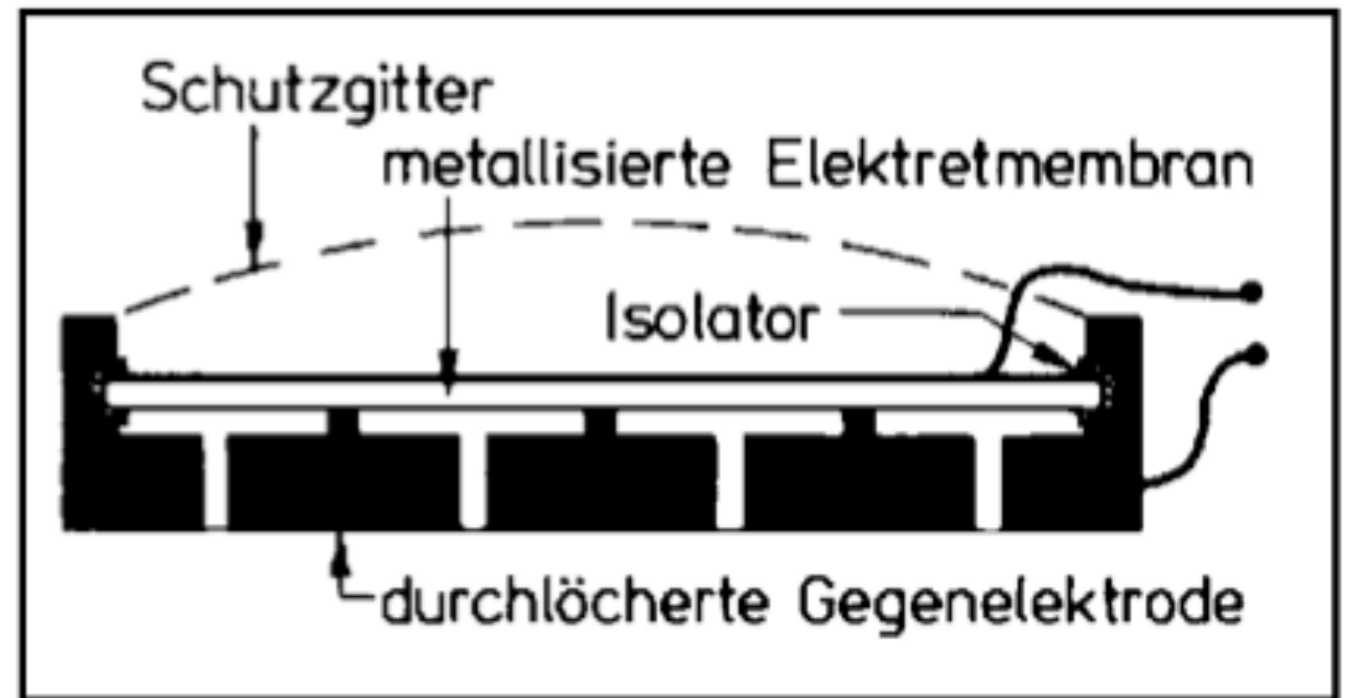


Quelle: Jürg Jecklin, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

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

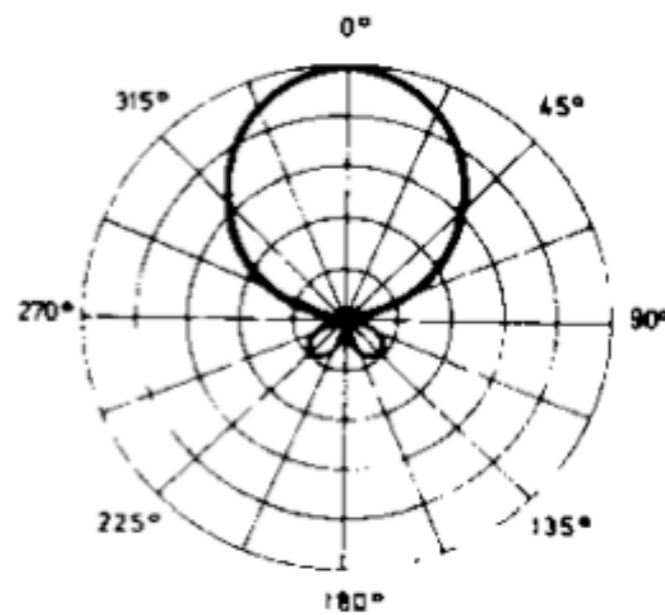
Weitere Mikrofontyp Unterscheidungen

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

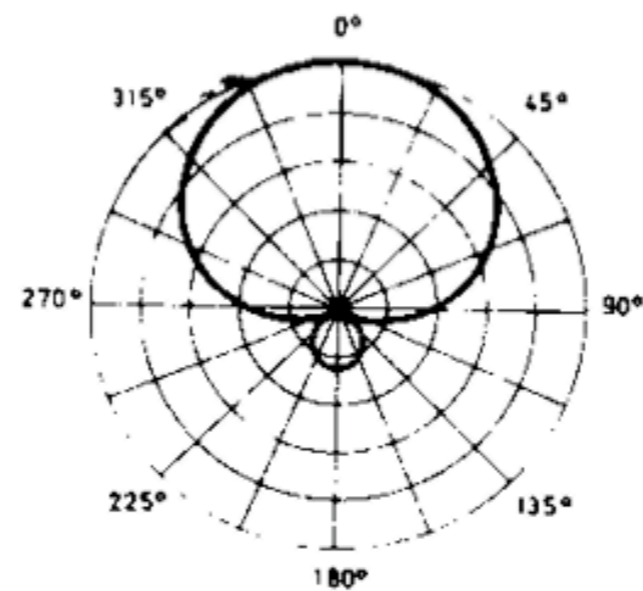
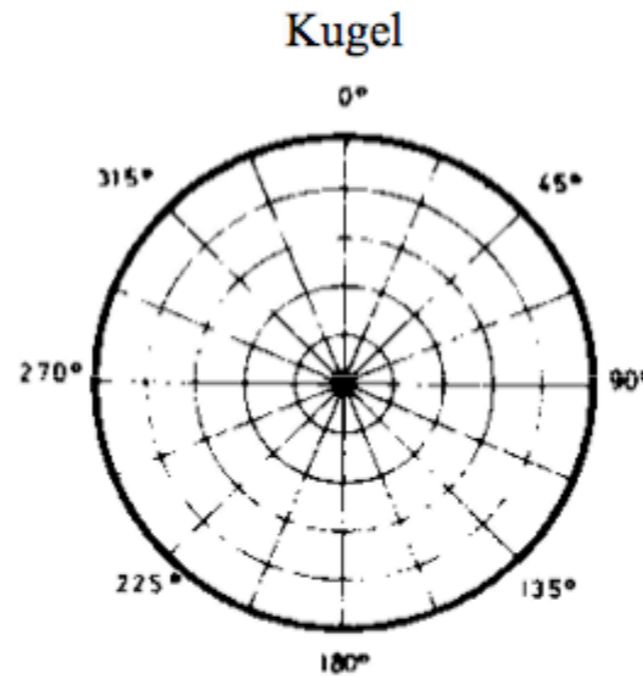


Richtcharakteristiken

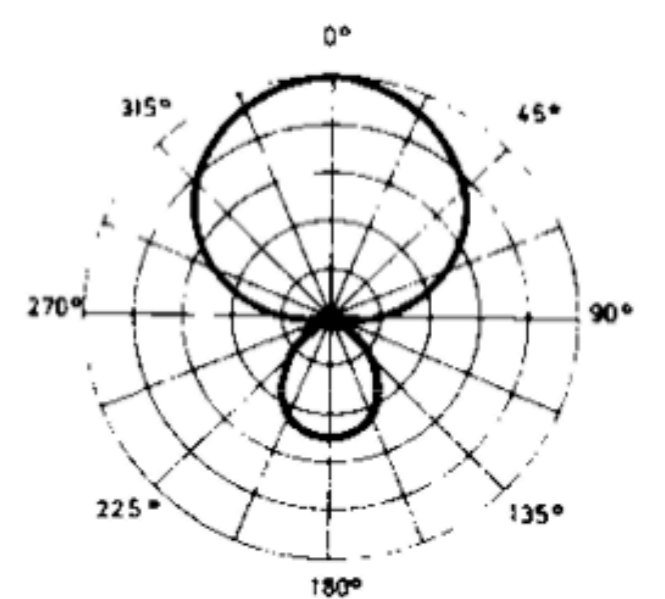
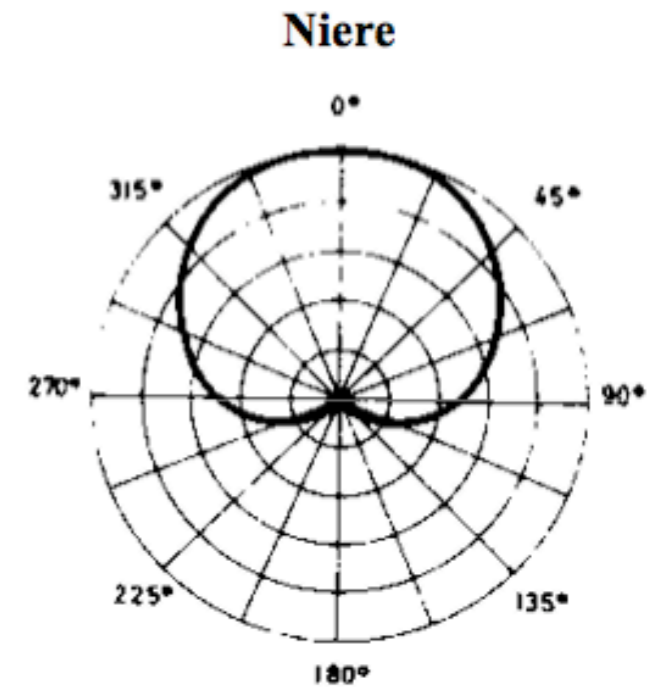
Darstellung der Empfindlichkeit für Schall aus verschiedenen Richtungen
Z.B. Nierencharakteristik für Richtmikrofone



Keule



Superniere



Hypernieren

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")



XY, AB, ORTF

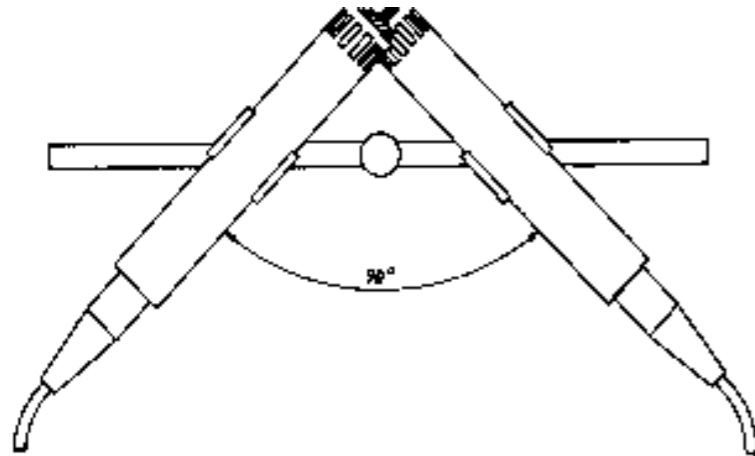
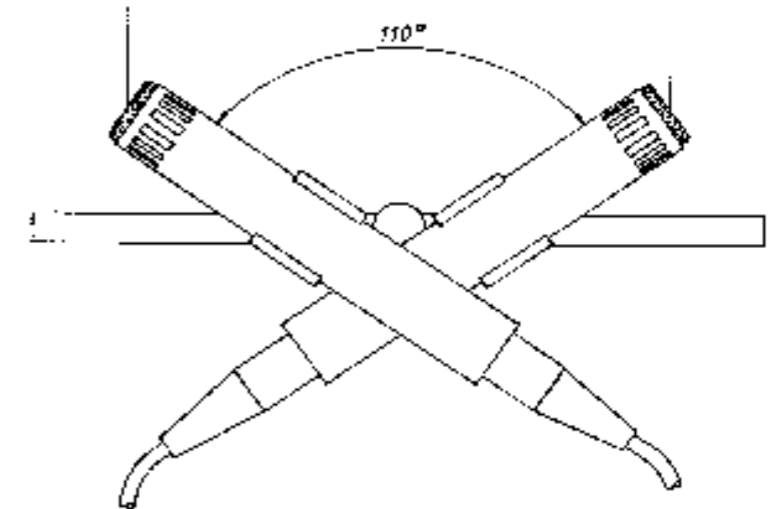
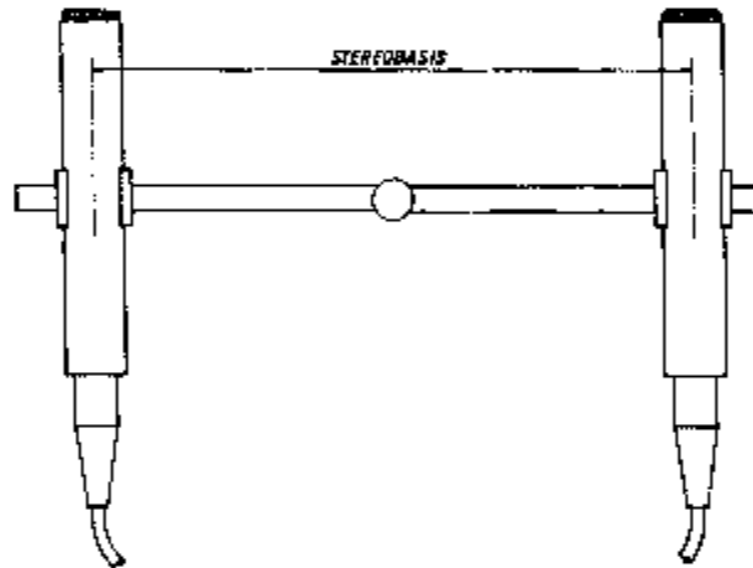


Abb. 16: Eine XY-Stereoanordnung kann auch mit zwei einzelnen Nierenmikrofonen aufgebaut werden, die man auf eine Schiene montiert.



http://www.mediaculture-online.de/fileadmin/bibliothek/rein_akustischeraeume/rein_akustischeraeume.html

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
 - » Poppchutz
 - Trittschall
 - Aussteuerung (Distanzen berücksichtigen)



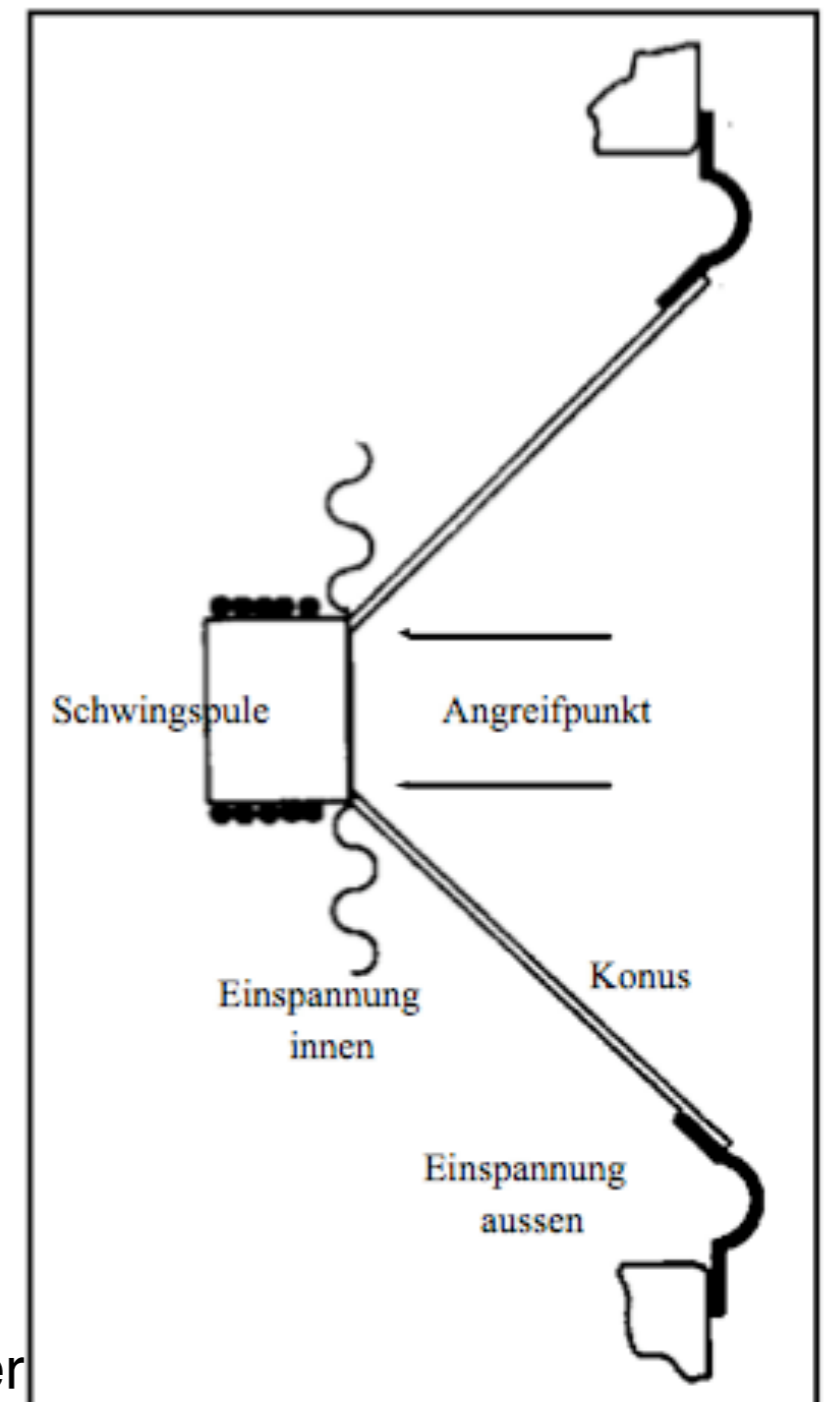
Sprecher nahe am Mikrofon, kein Poppchutz

Sprecher unter Mikrofon, mit Poppchutz

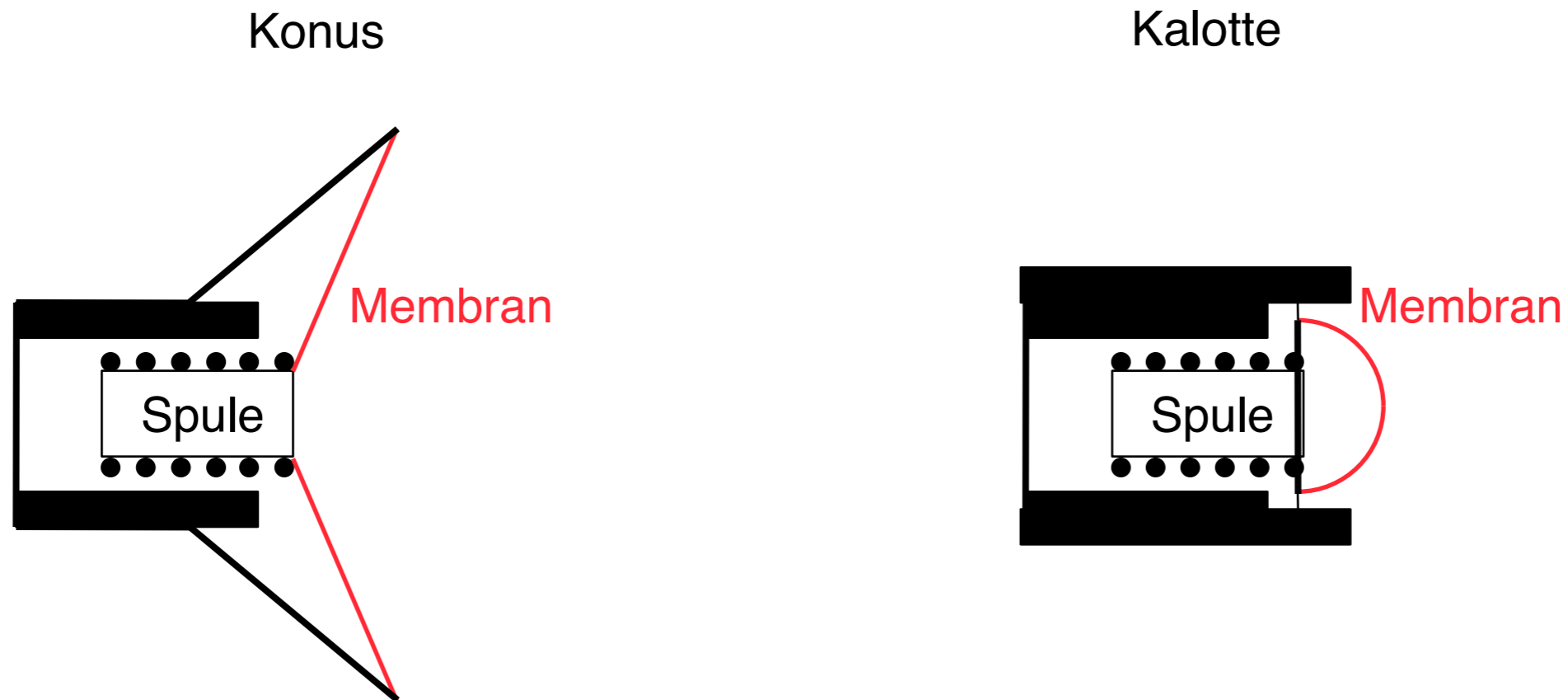
Lautsprecher

- 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

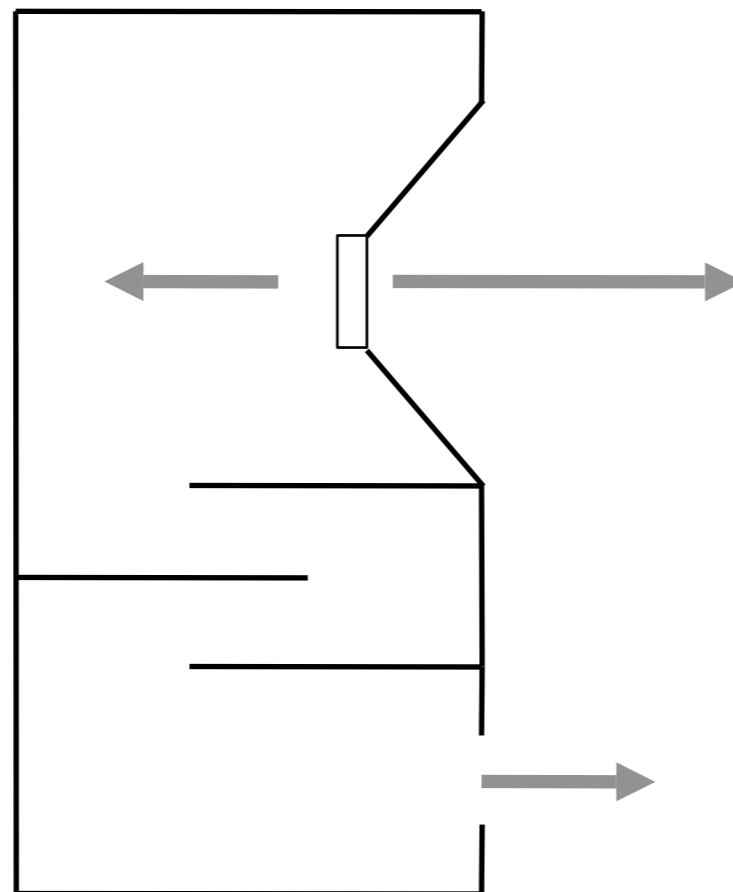


Typischerweise bestehen Lautsprecherboxen aus mehreren verschiedenen Einzellautsprechern mit einer "Frequenzweiche"
z.B. Hochtöner, Mitteltöner, Tieftöner


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.



4. Digitale Tonverarbeitung

- 4.1 Akustische Grundlagen der Audiotechnik
- 4.2 Analoge Audiotechnik 
- 4.3 Digitale Audiotechnik
- 4.4 Raumklang

Literatur:

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

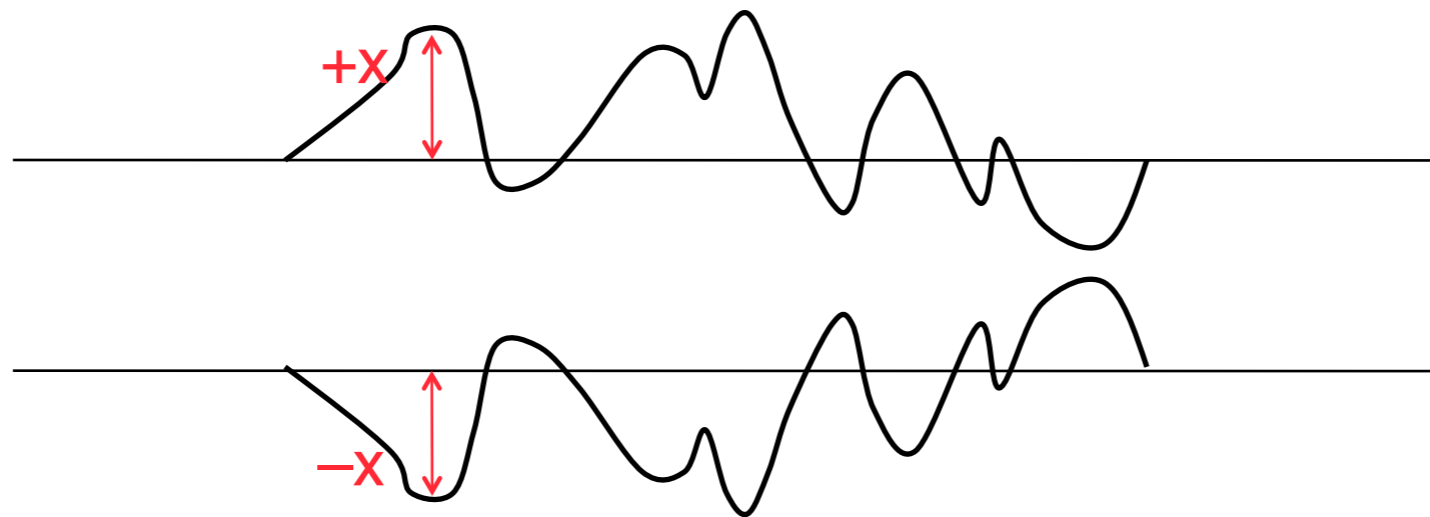
H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

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° 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

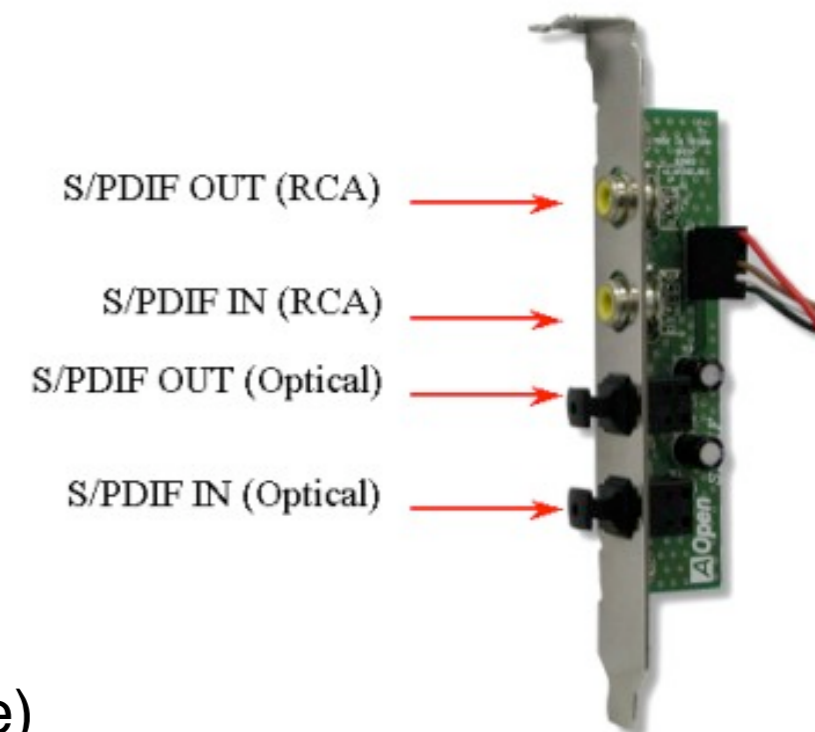
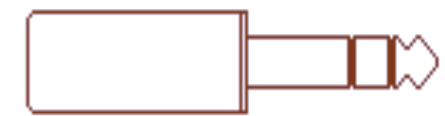
Anschlussstechnik: Leitungen

- 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



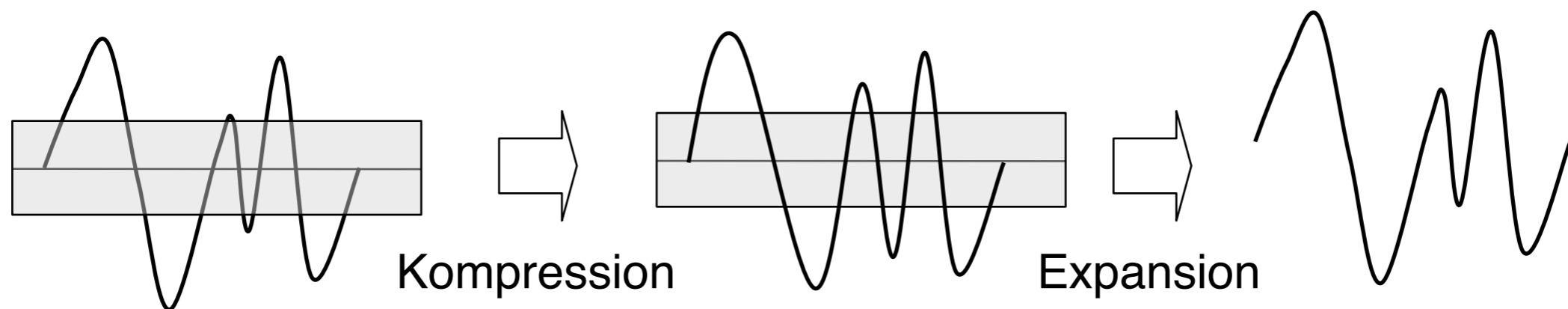
Anschlussstechnik: Steckernormen

- 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)



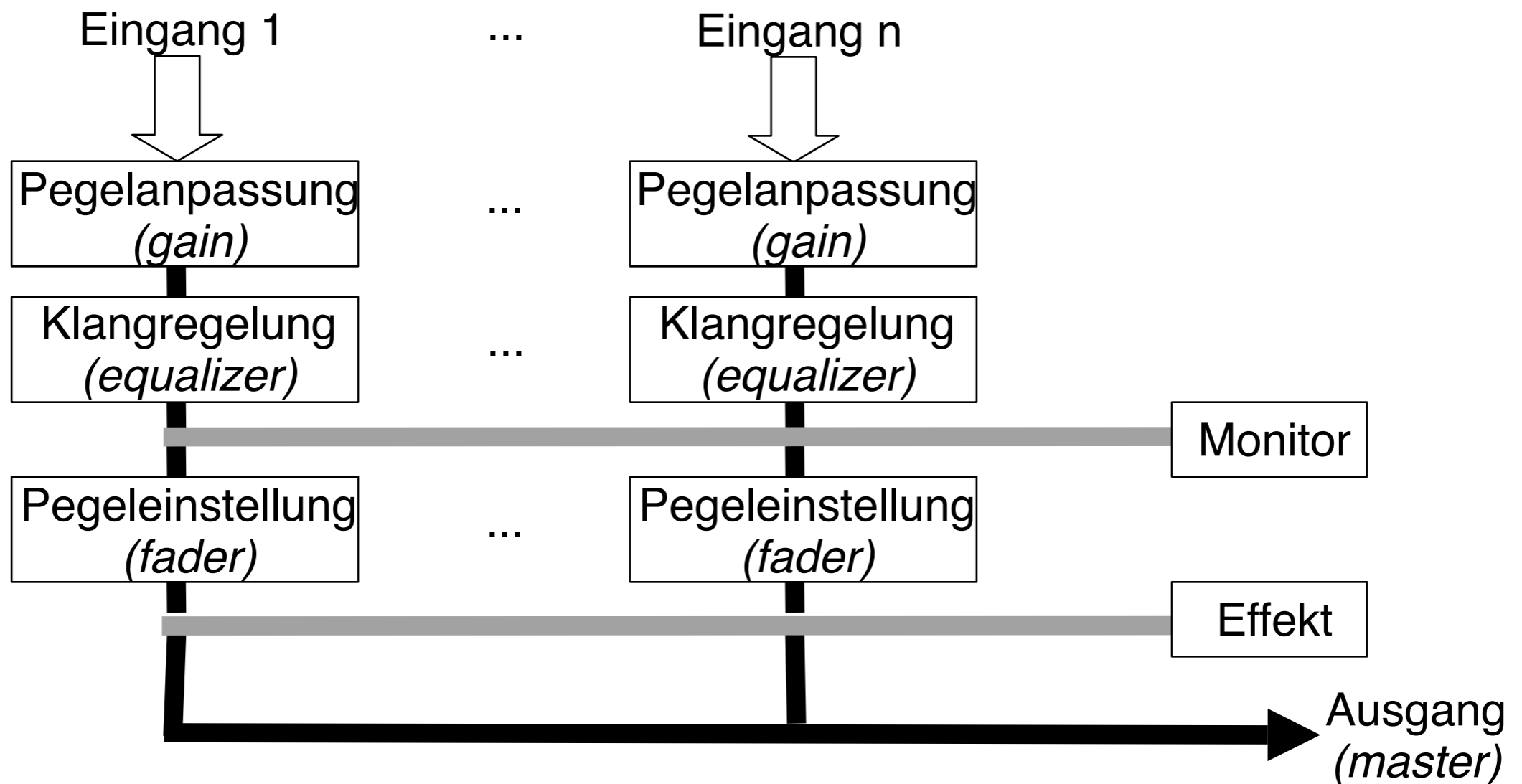
Kompander/Dynamikkompressor

- 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

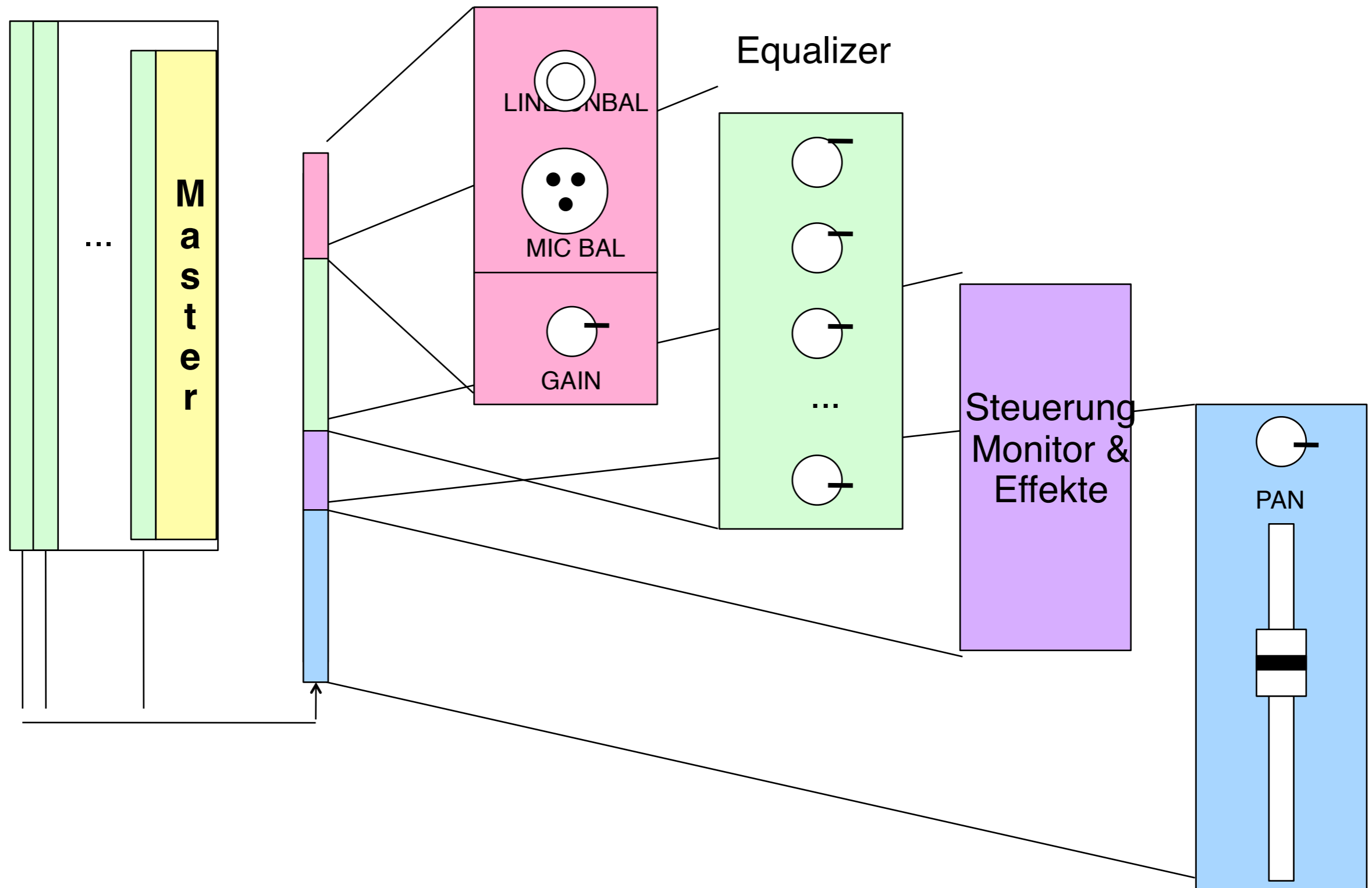
- Tonregieanlage: Herzstück eines Tonstudios
 - Pegelanpassung
 - Klangbearbeitung
 - Signalverteilung



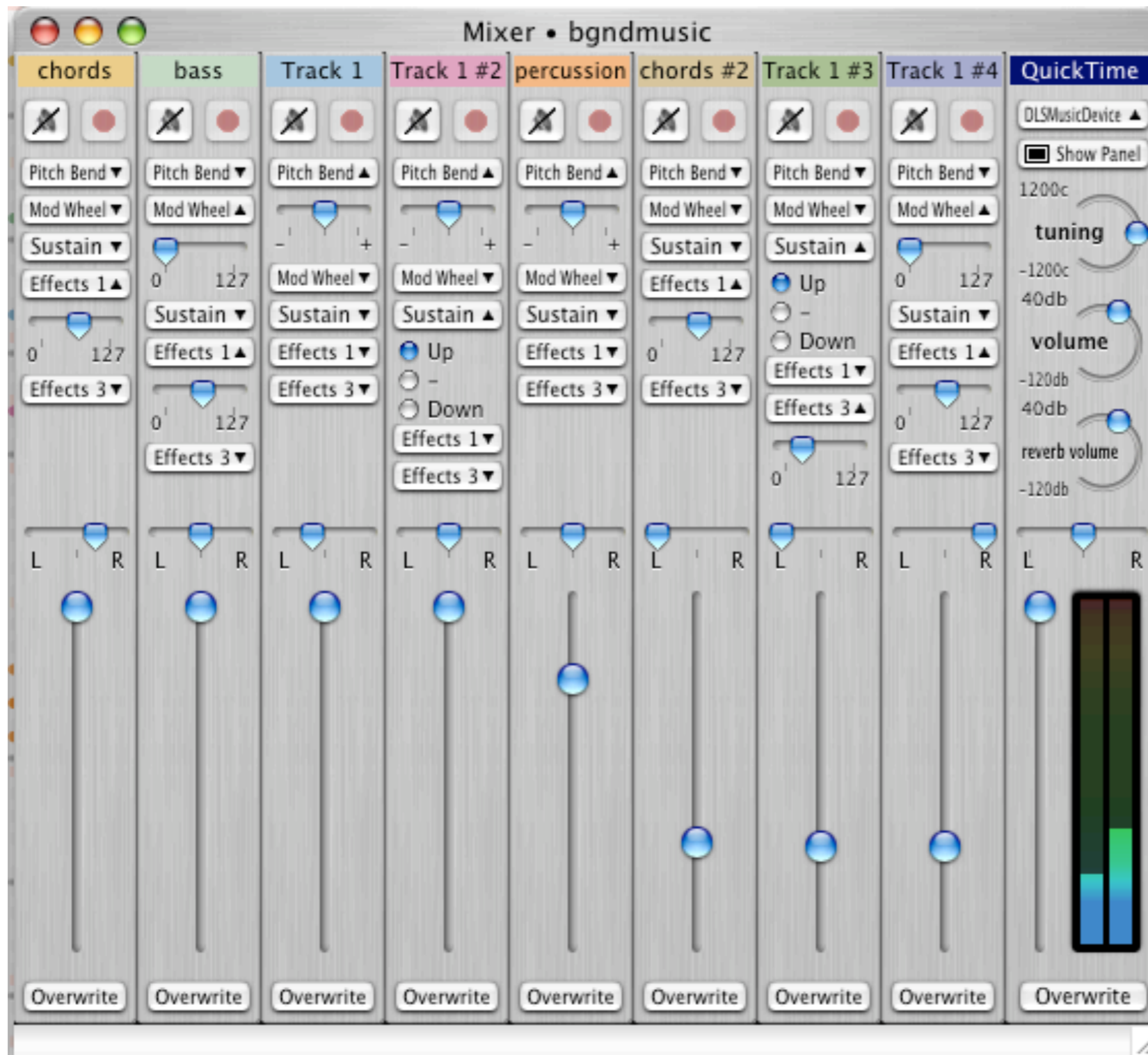
Reale Audio-Mischpulte



Bedienungselemente eines Mischpults (Prinzip)



Ein virtuelles Mischpult



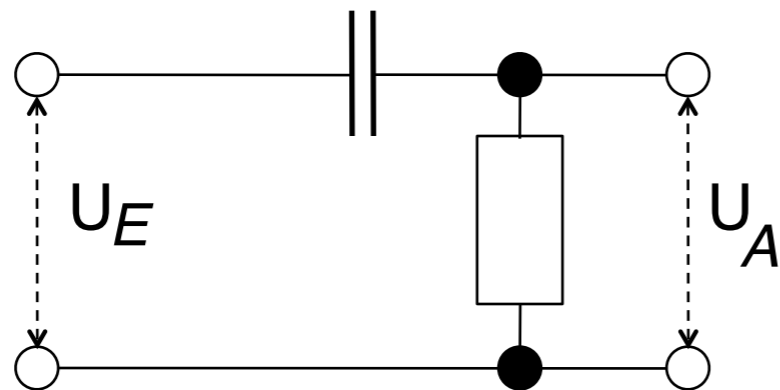
Software:
Intuem 2.1.0

Frequenzfilter

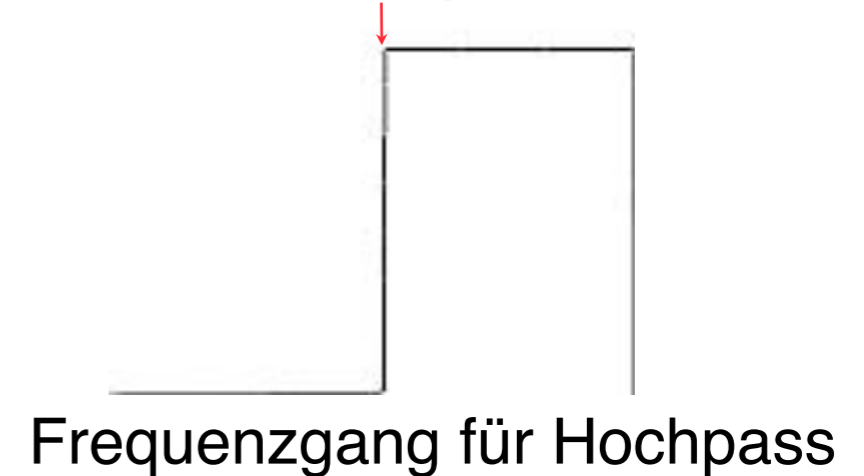
- Frequenzfilter sind Schaltungen oder Algorithmen, die ein von der Frequenz abhängiges Übertragungsverhalten von Eingang zu Ausgang aufweisen.
- Klassische Analogtechnik:
 - Filter aus Elektronik-Bauelementen (Widerstände, Kondensatoren, Spulen)
- Digitaltechnik:
 - Filter als digitaler Signalverarbeitungsbaustein (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

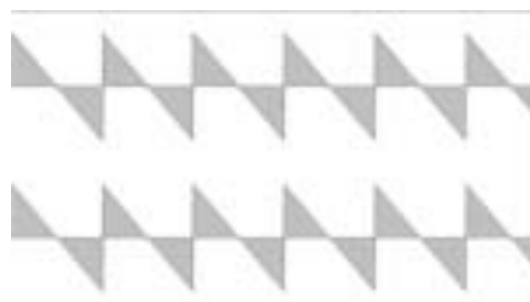
- Hochpass: lässt hohe Frequenzen durch, blockiert niedrige Frequenzen
- Elektrotechnische Realisierung
 - "RC-Hochpass erster Ordnung"



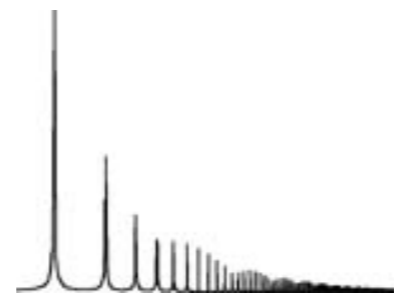
Grenzfrequenz



Eingangssignal:
Sägezahnswingung



Signalverlauf

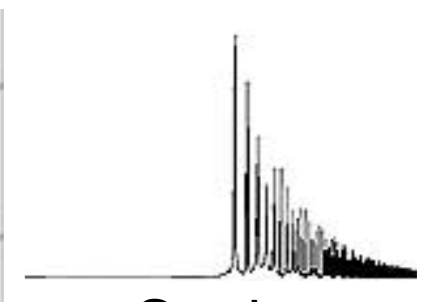


Spektrum

Resultat nach Hochpass:



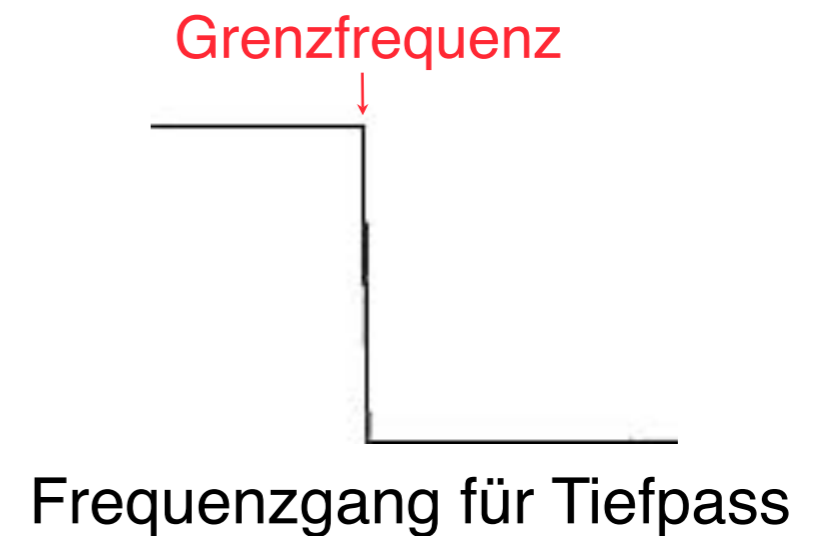
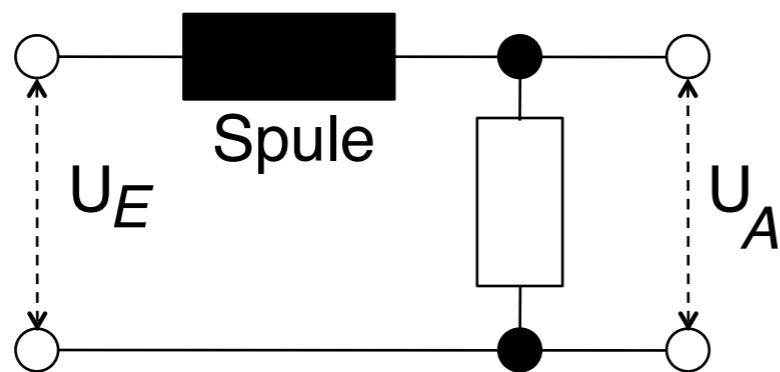
Signalverlauf



Spektrum

Tiefpass

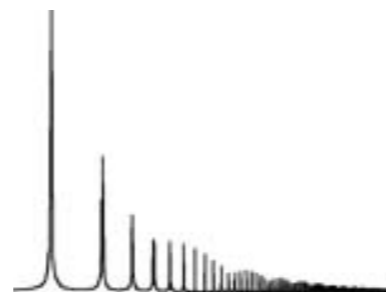
- Tiefpass: lässt tiefe Frequenzen durch, blockiert hohe Frequenzen
- Elektrotechnische Realisierung
 - "RL-Tiefpass erster Ordnung"



Eingangssignal:
Sägezahnsschwingung



Signalverlauf



Spektrum

Resultat nach Tiefpass:



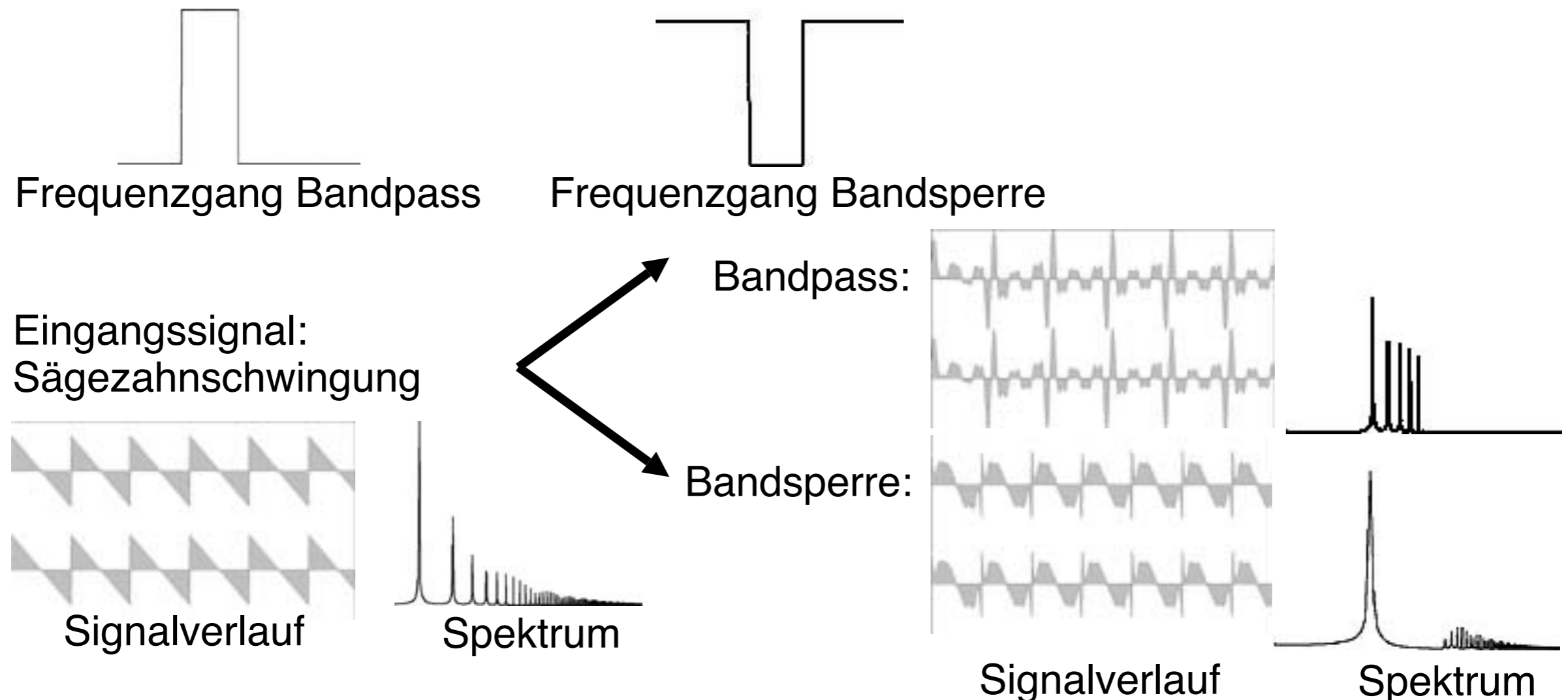
Signalverlauf



Spektrum

Bandpass, Bandsperre

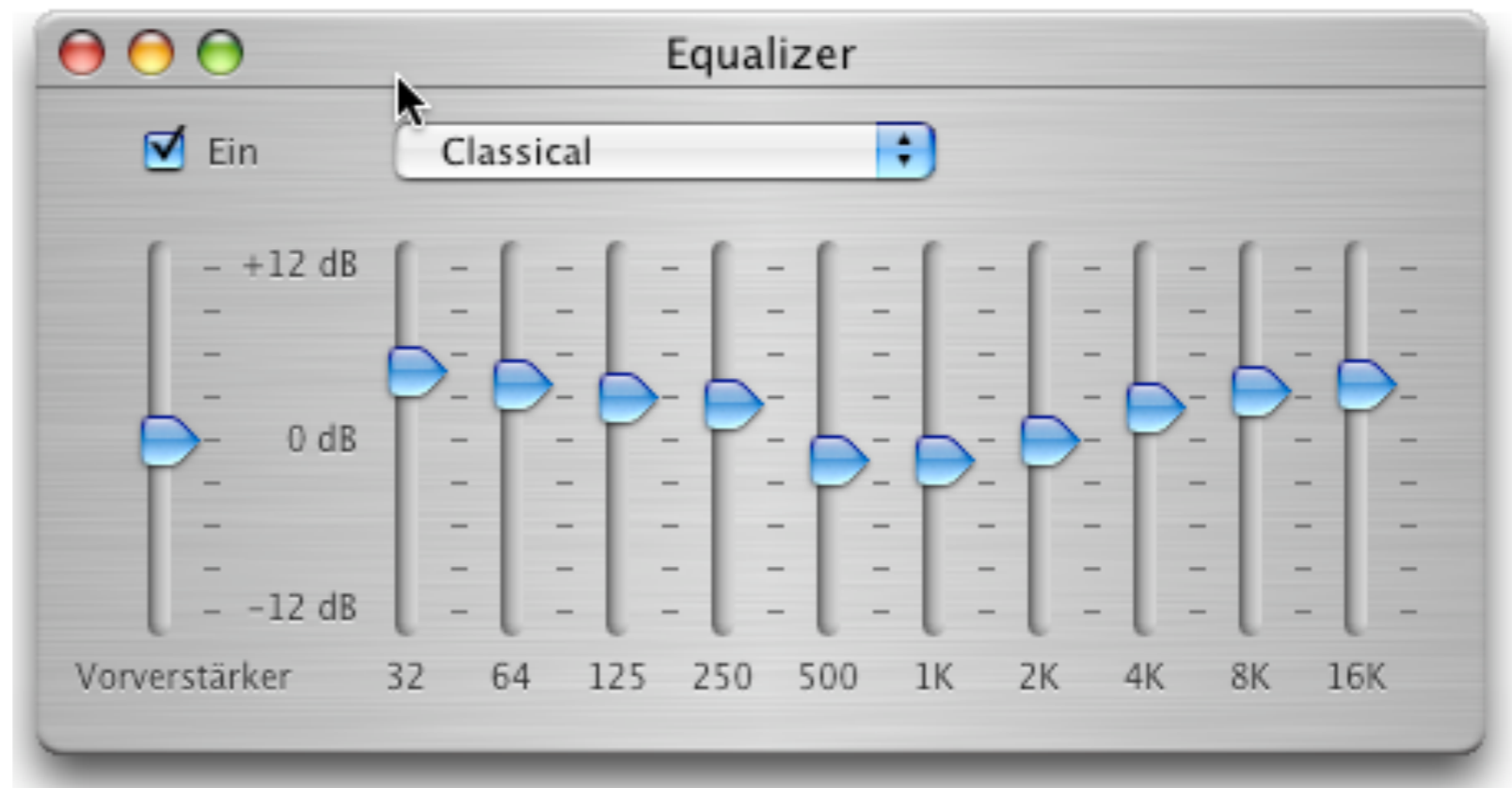
- Bandpass: lässt Frequenzen in bestimmtem Intervall durch, blockiert andere Frequenzen
- Bandsperre: blockiert Frequenzen in bestimmtem Intervall durch, lässt andere Frequenzen durch



Equalizer

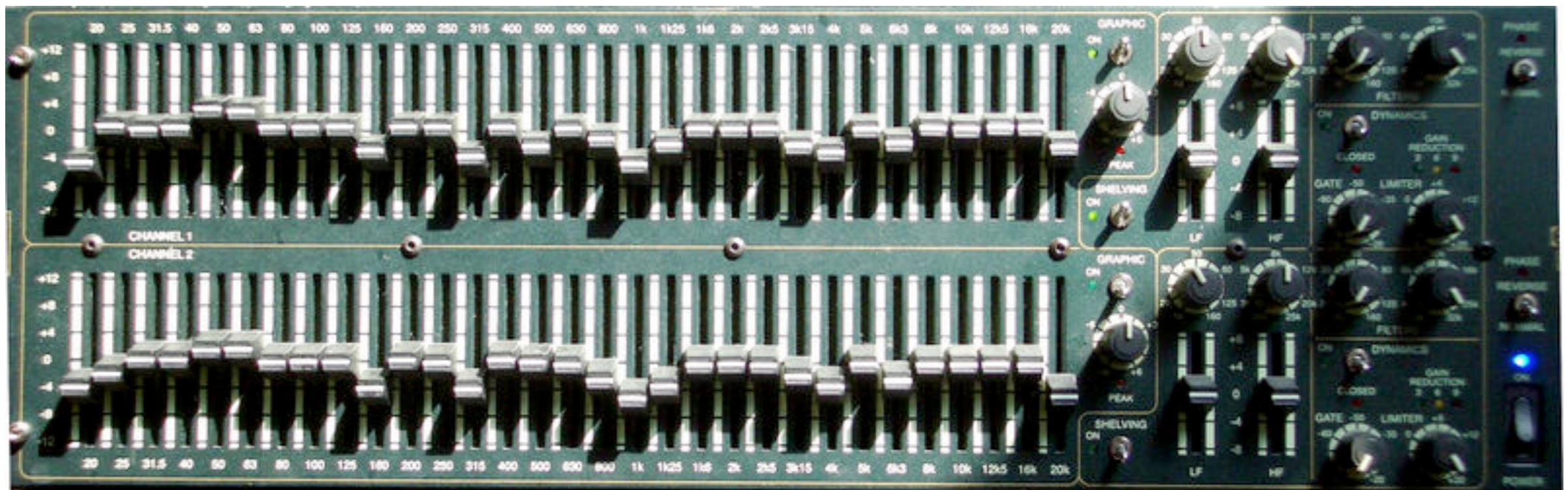
- Ursprung:
 - Ausgleichen von Frequenzgang-Unterschieden zwischen verschiedenen Mikrofonen (Linearisierung)
- Heutzutage:
 - Generelles Instrument zur frequenzselektiven Klangveränderung
 - Ausdruck von Künstler und Produzent optimieren
 - Musikstil optimal umsetzen (Klassik, Pop, Rock, ...)

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

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



Gestaltung durch Equalizing

(nach B. Owsinski, The Mixing Engineer's Handbook)

- Einzelne Instrumente klarer machen
- Einzelne Instrumente oder den Mix „überlebensgroß“ machen
- Jedem Instrument seinen Frequenzbereich zuweisen, in dem es dominiert.

Faustregeln:

- „If it sounds muddy, cut some at 250 Hz.
- If it sounds honky, cut some at 500 Hz.
- Cut if you're trying to make things sound better.
- Boost if you're trying to make things sound different.
- You can't boost anything that's not there in the first place.“