

A3. Digitale Tonverarbeitung

A3.1 Akustische Grundlagen der Audiotechnik ←

A3.2 Analoge Audiotechnik

A3.3 Digitale Audiotechnik

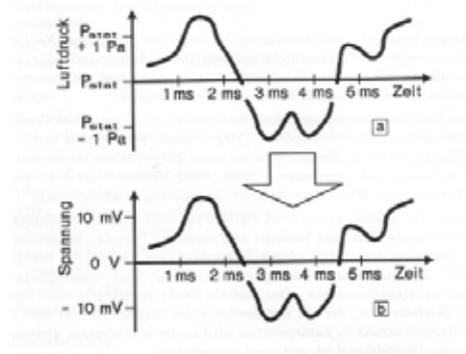
Literatur:

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

H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

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

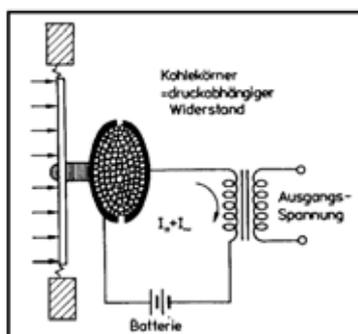
Impedanz

- **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

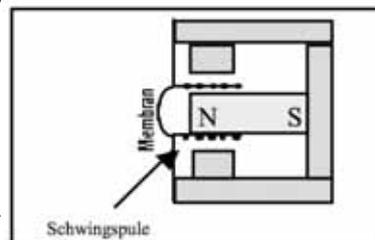
Grundprinzipien der Schallwandlung

- 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

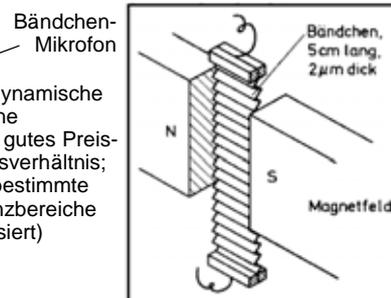
Mikrofontypen (Beispiele) (1)



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



Tauchspulen-Mikrofon

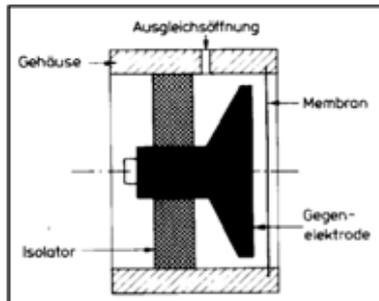


Bändchen-Mikrofon

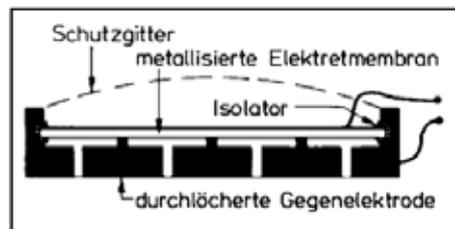
elektrodynamische Mikrofone
(robust, gutes Preis-Leistungsverhältnis; oft auf bestimmte Frequenzbereiche spezialisiert)

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)

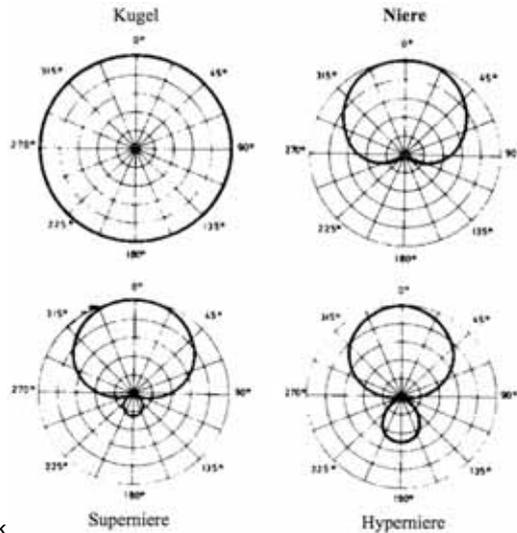
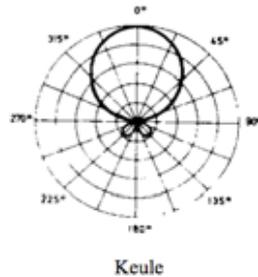
Quelle: Jürg Jecklin, Universität für Musik und
darstellende Kunst Wien

Weitere Mikrofontyp Unterscheidungen

- Freifeld- vs. Grenzflächen-Mikrofon
 - Freifeldmikrofon:
 - » Auf Stativ oder in der Hand
 - Grenzflächenmikrofon:
 - » 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 Umgebungsgerausche

Richtcharakteristiken

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



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

Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Hußmann

Medientechnik – A3 - 9

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")



Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Hußmann

Medientechnik – A3 - 10

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
 - Trittschall
 - Aussteuerung (Distanzen berücksichtigen)

Sprecher nahe am Mikrofon, kein Poppchutz

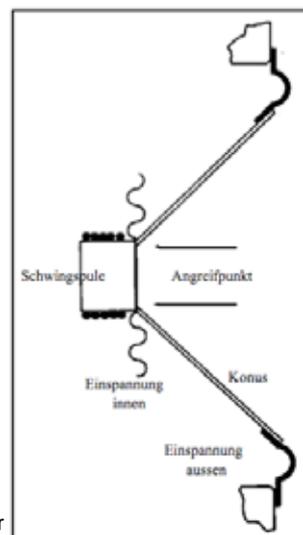


Sprecher unter Mikrofon, mit Poppchutz



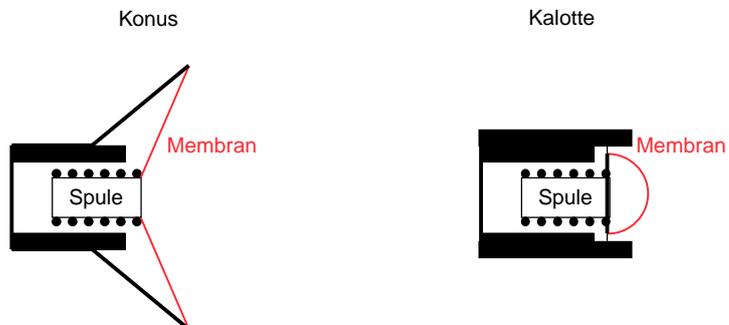
Lautsprecher

- 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

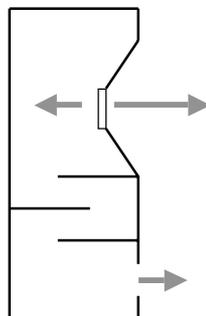


Typischerweise bestehen Lautsprecherboxen aus mehreren verschiedenen Einzellautsprechern mit einer "Frequenzweiche"
z.B. Hochtöner, Mitteltöner, Tieftöner

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

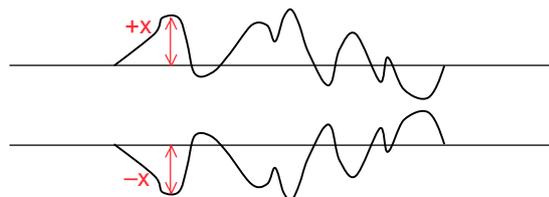
Literatur:

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

H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

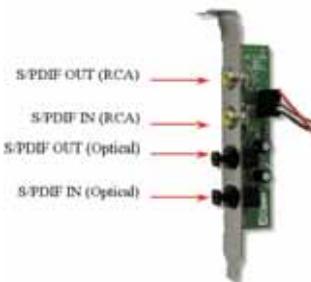
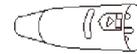
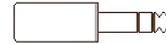
Anschlussstechnik: Leitungen

- 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



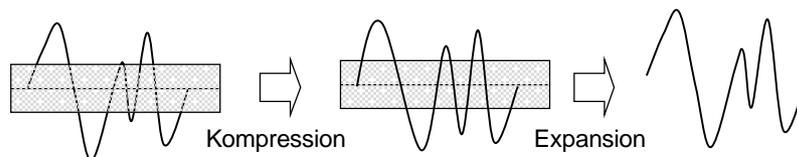
Anschlussstechnik: Steckernormen

- 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

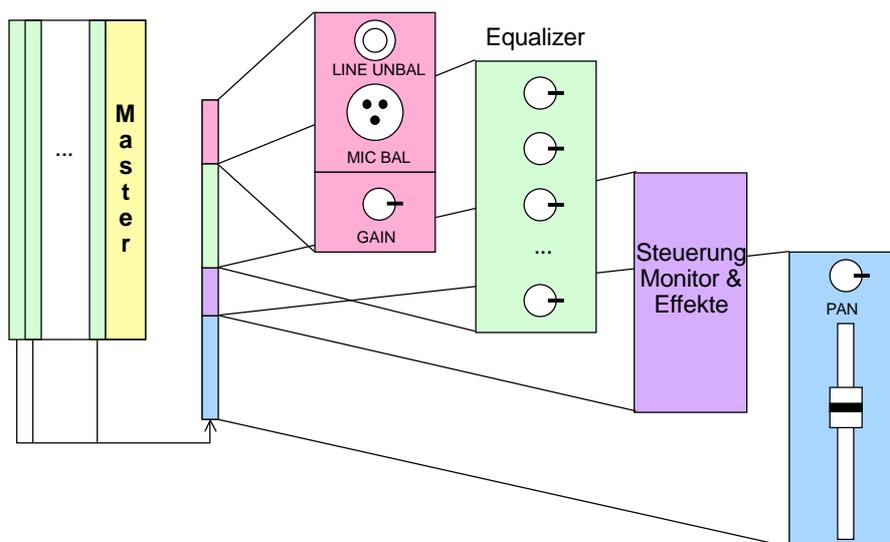
- Typische Komponente für Analogtechnik
- Analoge Komponenten führen zu störendem Rauschen
 - vor allem "Eigenrauschen" bei Magnetbandaufzeichnung
 - Bei Tonbandaufnahmen mit grosser "Dynamik" (d.h. großem Unterschied zwischen höchstem und niedrigstem Signalpegel) stört das Bandrauschen die leisen Passagen
- 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



Reale Audio-Mischpulte



Bedienungselemente eines Mischpults (Prinzip)

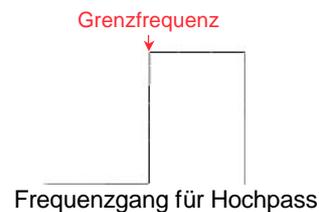
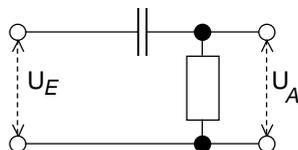


Frequenzfilter

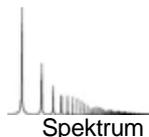
- Frequenzfilter sind Schaltungen oder Algorithmen, die ein von der Frequenz abhängiges Übertragungsverhalten von Eingang zu Ausgang aufweisen.
- Klassische Analogtechnik:
 - Filter aus Elektronik-Bauelementen (Widerstände, Kondensatoren, Spulen)
- Digitaltechnik:
 - Filter als digitaler Signalverarbeitungsbaustein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

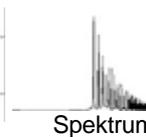
- Hochpass: lässt hohe Frequenzen durch, blockiert niedrige Frequenzen
- Elektrotechnische Realisierung
 - "RC-Hochpass erster Ordnung"



Eingangssignal:
Sägezahnswingung

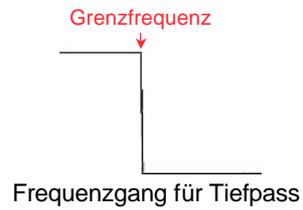
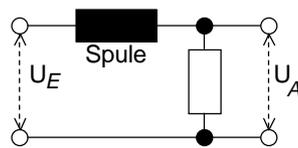


Resultat nach Hochpass:

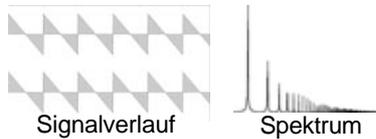


Tiefpass

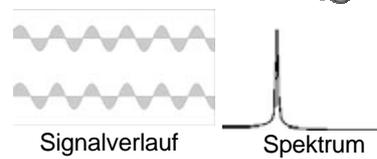
- Tiefpass: lässt tiefe Frequenzen durch, blockiert hohe Frequenzen
- Elektrotechnische Realisierung
 - "RL-Tiefpass erster Ordnung"



Eingangssignal:
Sägezahnswingung

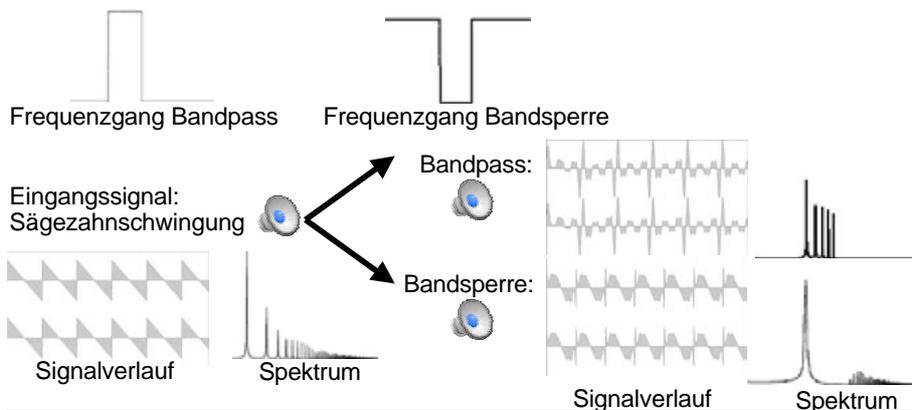


Resultat nach Tiefpass:



Bandpass, Bandsperre

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



A3. Digitale Tonverarbeitung

A3.1 Akustische 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

Digitale Audiotechnik

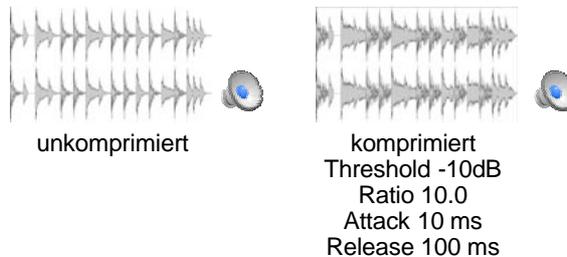
- Digitale Einheiten bilden meist analoge Geräte nach
 - Oft durch Software realisiert, z.B. digitaler Mixer
 - Zur besseren Bedienbarkeit zusätzlich Hardware-Steuergeräte, die realen Geräten nachgebildet sind
 - Verarbeitung von digitalisierten Analogsignalen und/oder MIDI-Daten
 - Effekte:
 - » Bei MIDI-Daten:
 - Beeinflussung des Klangerzeugers (Synthesizer)
 - » Bei digitalisierten Audiodaten:
 - Digitales Äquivalent analoger Audio-Effektfilter (*online*)
 - Realzeitbedingungen machen oft Spezialhardware nötig
 - Digitale Nachbearbeitung digitalisierter Audiodaten:
 - » zur Erzeugung zusätzlicher Klangeffekte
 - » zur Gestaltung von Audio-Präsentationen ("digitaler Schnitt")
 - » zur Qualitätsverbesserung
 - » *offline*, d.h. reine Softwarelösungen möglich

Bearbeitung der Amplitude

- Verstärken, Dämpfen, "Normalizing":
 - nachträgliche Anpassung des gesamten Signalpegels
 - bei Verstärkung werden auch unerwünschte Effekte (z.B. Rauschen, Nebengeräusche) mitverstärkt
- 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
 - Unerwünschten "Gleichspannungsanteil" abziehen
- Vorsicht beim Zusammenmischen verschiedener Signale:
 - Gesamtpegel beachten! Signale werden meistens additiv zusammengeführt
 - Digitale Übersteuerung führt zu *Clipping*, welches nachträglich nicht mehr korrigiert werden kann
 - Abhilfe: Einzelne Signale/Spuren vorher entsprechend abschwächen

Bearbeitung der Dynamik (1)

- Kompressor:
 - Reduktion der Dynamik (der Differenz zwischen lautester und leisester Stelle)
 - Schwelle (*threshold*): Amplitudenwert, ab dem die Reduktion einsetzt
 - Faktor (*ratio*): Stärke der Reduktion
 - Einsatz (*attack*) und Ausklingen (*release*): Übergangszeiten
- Beispiel:



Bearbeitung der Dynamik (2)

- Multiband-Kompressor
 - Aufteilung des Signals in Frequenzbänder
 - Jedes Frequenzband einzeln komprimiert
 - Geeignet zur selektiven Veränderung des Klangbilds
- Expander:
 - Umkehrfunktion zum Kompressor (Dynamikerhöhung)
- Limiter:
 - Schneidet Signal oberhalb der Schwelle auf festen Pegel ab
 - Vermeidet Übersteuerung
- Gate:
 - Schneidet Signal unterhalb des Schwellwertes ab
 - Kann zur Rauschunterdrückung oder zum Ausschalten von Nebengeräuschen dienen

Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (1)

- Schneiden von Audio-Material
 - Früher wirklich mit der Schere (am Tonband)!
- Heute mit Cut, Copy und Paste im Audio-Editor
 - Möglichst in Pausen schneiden
 - Schnitte zu ähnlichem Signal sind relativ problemlos
 - Schnitte von leisem zu lautem Signal sind relativ problemlos
 - Schwierig sind Schnitte innerhalb eines kontinuierlichen Signals
- Überblenden:
 - Bearbeiten der Hüllkurven und Zusammenmischen
 - Kreuzblende (langsam) und Sturzblende (rasch)
- Schleifen (*loop*):
 - Verlängern eines akustischen Ereignisses durch Wiederholen
 - Schnittregeln an der Nahtstelle zu beachten

Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (2): Resampling

- Andere Wiedergabegeschwindigkeit als Samplingrate
 - Ändert die Zeitdauer und gleichzeitig alle Tonhöhen

- Beispiel:

Original

Resampling * 0,7

Resampling * 1,4



- Beispiel: Erzeugung neuer Töne

Kugel auf Teller

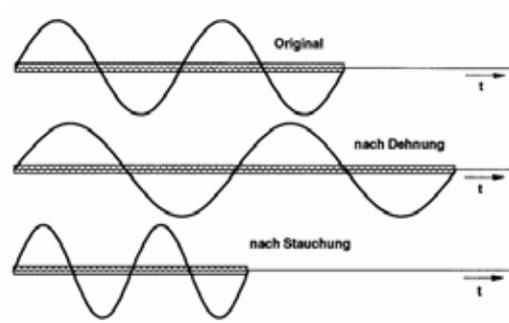
1/16 Resampling

1/64 Resampling



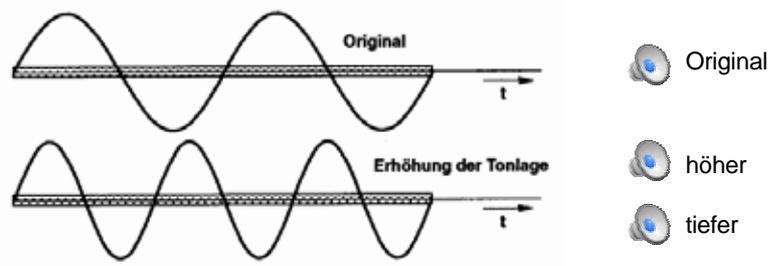
Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (3): Timestretching

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



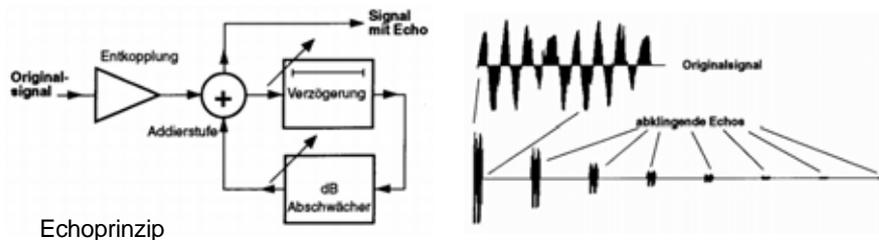
Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (4): Pitchshifting

- Tonhöhenkorrektur bei gleicher Spieldauer
 - Zusammensetzbar aus Timestretching und Resampling



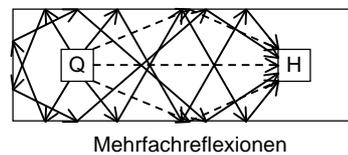
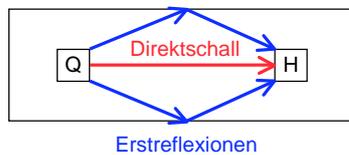
Raumorientierte Bearbeitung: Echo und Hall

- Echo:
 - Signal einmal verzögert und abgeschwächt zurückgeführt
 - Parameter: Verzögerung, Abschwächung
- Hall:
 - Signal vielfach (unendlich oft) mit verschiedenen Verzögerungszeiten zurückgeführt
 - Halleinstellungen können sehr komplex sein



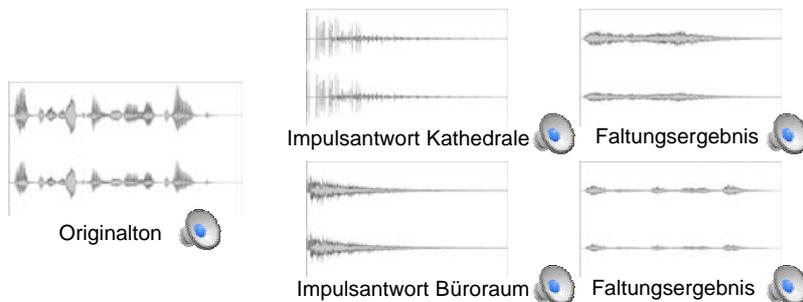
Schallausbreitung im geschlossenen Raum

- Direktschall:
 - gerade Linie zwischen Quelle und Hörer
 - kürzester Weg
- Erstreflexionen:
 - längerer Weg, längere Laufzeit
 - als unterschiedliches Signal wahrnehmbar (Echos)
- Mehrfachreflexionen:
 - als einheitliches "Hall-" Signal wahrgenommen
 - klingt mit der Zeit ab



Impulsantwort

- Verhältnis von Direktschall, Erstreflexionen und Nachhall kann experimentell ermittelt werden:
 - Kurzer Impuls bestimmter Frequenz (Klatschen, Schuss)
 - Spektrum des reflektierten Signals beschreibt Übertragungseigenschaften des Raums (*Impulsantwort*)
- Mathematische Berechnung der Raumwirkung:
 - *Faltung (convolution)* des Eingangssignals mit Impulsantwort
- Beispiel:



Phasenorientierte Bearbeitung

- Sehr kurze Verzögerungen (unter 30 ms) werden als Phasenveränderungen wahrgenommen und beeinflussen den Gesamtklang
- Chorus:
 - Sehr schnelle, minimal in der Höhe veränderte Signallückführung
 - Lässt Klang voller erscheinen
- Flanging:
 - 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