

7. Digitale Tonverarbeitung

- 7.1 Akustische Grundlagen der Audiotechnik 
- 7.2 Audio-Aufnahme- und Wiedergabetechnik
- 7.3 Analoge Audio-Verarbeitungsketten
- 7.4 Digitale Audiotechnik
- 7.5 Software zur Tonbearbeitung
speziell: Tonbearbeitung in Java
Java Sound

Literatur:

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

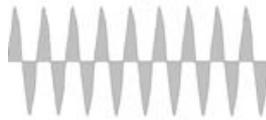
H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002

Empfindungen: Klang und Geräusch

- Primärempfindungen der Tonwahrnehmung:
 - Tonhöhe (Bsp. verschiedene Klaviertasten)
 - Lautstärke (Bsp. Trommelanschlag)
 - Klangfarbe (Bsp. gleicher Ton auf verschiedenen Instrumenten)
- Klang:
 - alle drei Primärempfindungen wahrnehmbar 
- Geräusch:
 - nur Lautstärke wahrnehmbar 

Periodizität

- Klänge sind, als Signalform betrachtet, *periodisch* (d.h. wiederholenden Teilabschnitte)
- Geräusche sind schlechter strukturiert und oft aperiodisch.



Blockflöte



LKW



Violine



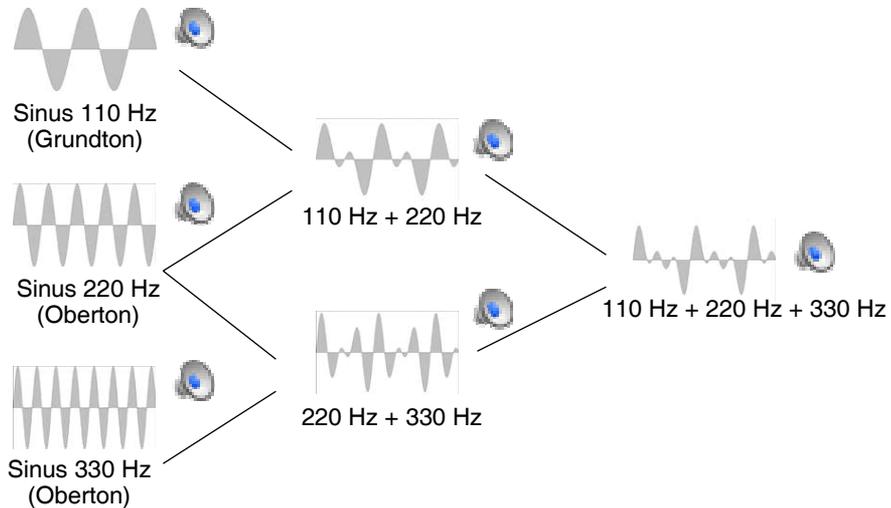
Fahrradkette



Frequenzspektrum, Oberschwingungen

- *Frequenz* (Tonhöhe):
 - Maß für die Häufigkeit, mit der sich positive und negative Spannungen abwechseln, Maß 1 Hertz = 1 Schwingung/s
- *Audiosignal*:
 - besteht aus Vielzahl von Frequenzen (Frequenzspektrum)
 - *Bandbreite*: Differenz zwischen höchster und niedrigster Frequenz
- *Beispiel*: Ton eines Musikinstrumentes
 - Auch hier: Vielzahl von überlagerten Frequenzen
- *Grundton*: Tiefste am Signal beteiligte Frequenz
 - Grundton ist für die wahrgenommene Tonhöhe bestimmend
- *Obertöne (harmonische Schwingungen)*:
 - *reine Obertöne*: ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz
 - zusätzlich: geräuschhafte Tonanteile (z.B. Zupfgeräusch)
 - Obertonspektrum ist für charakteristischen Instrumentklang bestimmend

Überlagerung harmonischer Schwingungen



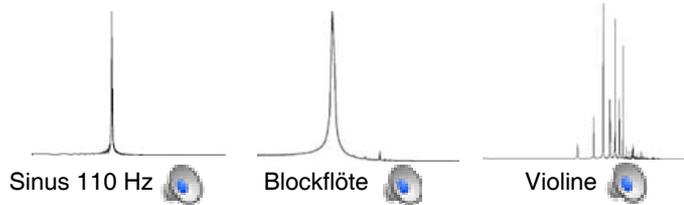
Interferenz und Schwebung

- **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

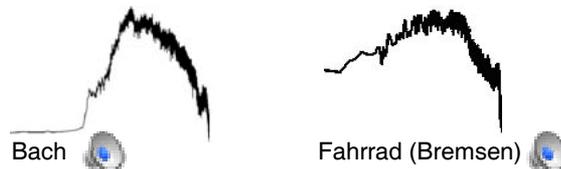
Frequenzspektrum

- Frequenzspektrum von Klängen
 - Anzahl diskreter Spektrallinien (Grund- und Obertöne)
- Frequenzspektrum von Geräuschen
 - kontinuierliches Spektrum diverser Frequenzen

Klänge:



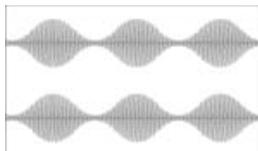
Geräusche:



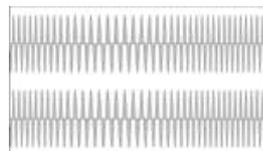
Zeitlicher Verlauf von Schallsignalen

- Mikroskopischer Zeitbereich: $0,05 \text{ ms} < t \leq 50 \text{ ms}$
 - Hörbare Frequenzen (20 Hz bis 20 kHz)
- Zeitbereich der Übergangsklänge (Transienten): $50 \text{ ms} < t \leq 150 \text{ ms}$
 - Modulation hörbarer Frequenzen
 - So "schnell" (20 Hz bis 7 Hz), dass noch als Variation des Klangs wahrgenommen
- Makroskopischer Zeitbereich: $t > 150 \text{ ms}$
 - Verlauf eines Klangs (z.B. gespielte Note) über die Zeit (Hüllkurve)
 - Formaler Aufbau eines Musikstücks
 - Tempo, Metrum, Rhythmus
- Beispiele für Transienten:

Tremolo
Amplituden-
moduliertes
Sinussignal

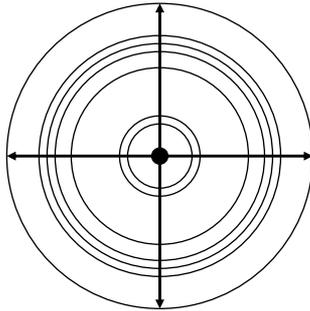


Vibrato
Frequenz-
moduliertes
Sinussignal



Schallausbreitung

- Schall breitet sich als *Kugelwelle* aus
 - Gleicher Schalldruck und gleiche Schallschnelle zu gegebenem Zeitpunkt auf konzentrischer Kugel um die Quelle
 - Bei grösserer Entfernung: Äquivalent zu einer *ebenen Welle*



Reflexion

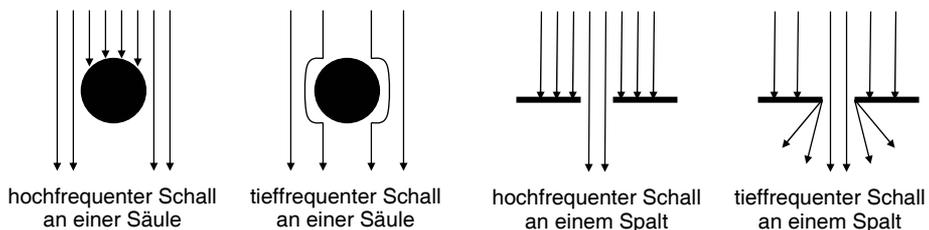
- Für Schallwellen gelten die gleichen Gesetze wie für Lichtwellen
- Aber: Effekte abhängig von Wellenlänge
 - Wellenlänge bei Schallausbreitung in der Luft bei 20°C zwischen ca. 20 m (tiefe Frequenzen) und 2 cm (hohe Frequenzen)
 - Lichtwellen erheblich kürzer (Mikrometer-Bereich)
- *Reflexion:*
 - Reflexionsgesetz (Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel) gilt nur, wenn Grenzfläche gross im Vergleich zur Wellenlänge
 - » d.h. in kleineren Räumen keine Reflexion tiefer Frequenzen
 - Rauigkeit der Oberfläche führt zu *diffuser* (zerstreuender) Reflexion, wenn Unebenheiten in der Grössenordnung der Wellenlänge
 - » d.h. auch bei zentimetergrossen Unebenheiten wirkt Wand auf tieffrequenten Schall als "glatt"

Absorption, Brechung

- *Absorption:*
 - Ein Teil der Schallenergie wird nicht reflektiert
 - » Absorptionsgrad abhängig vom Material und der Schallfrequenz
 - *Dissipation:* Umwandlung in Wärmeenergie
 - *Transmission:* Weiterleitung im absorbierenden Medium
 - Aufteilung der absorbierten Energie in Dissipation und Transmission
 - » frequenzabhängig: niedrige Frequenzen höhere Transmission (*Körperschall*)
- *Brechung:*
 - Auch Schall wird gebrochen
 - Z.B. bei Luftschichten verschiedener Temperatur

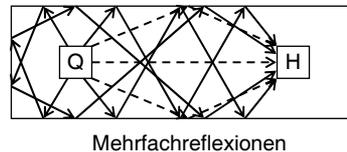
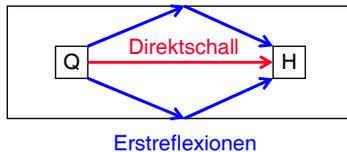
Beugung

- Lichtwellen erzeugen immer einen Schatten hinter einem undurchsichtigen Gegenstand
 - Weil Gegenstand gross im Vergleich zur Wellenlänge
- Schall-"Schatten" entsteht erst, wenn Gegenstand gross im Vergleich zur Wellenlänge
- Bei Gegenständen in der Grössenordnung der Wellenlänge tritt *Beugung* auf
 - Wellen fließen "um das Hindernis herum"
 - Wellen werden von einem Spalt zerstreut



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:



7. Digitale Tonverarbeitung

- 7.1 Akustische Grundlagen der Audiotechnik
- 7.2 Audio-Aufnahme- und Wiedergabetechnik ←
- 7.3 Analoge Audio-Verarbeitungsketten
- 7.3 Digitale Audiotechnik
- 7.5 Software zur Tonbearbeitung
speziell: Tonbearbeitung in Java

Java Sound

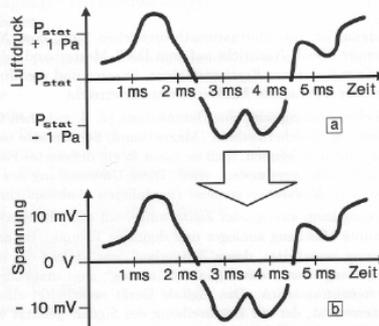
Literatur:

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 ist *Wechselspannung*



Allgemeine elektrotechnische Grundbegriffe

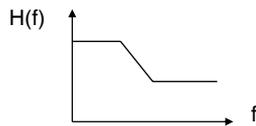
- *Strom:*
 - gerichtete Bewegung von Elektronen in einem Leiter
 - gemessen in Ampere (A)
- *Spannung:*
 - Kraft, die Elektronen in Bewegung setzt
 - gemessen in Volt (V)
- *elektrische Leistung:*
 - Produkt aus Strom und Spannung
 - gemessen in Watt (W), $1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$
 - *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

Frequenzgang

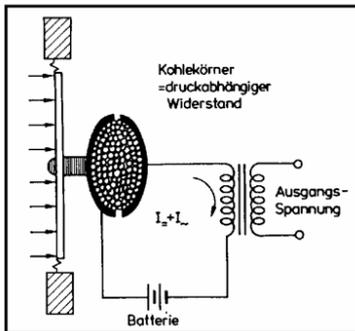
- Idealerweise ist eine Kette von akustischen Signalwandlern so beschaffen, dass alle Frequenzen gleich behandelt werden
- Reale Geräte:
 - Schwächen bestimmte Frequenzen ab, verstärken andere
 - Lineare Verzerrung
- *Frequenzgang (Übertragungsfunktion):*
 - Verhältnis des Ausgangsspektrums zum Eingangsspektrum
 - 1 = unveränderte Übertragung
 - Darstellung meist als Graph
 - Bestimmung durch Ausmessen von "weissem Rauschen"



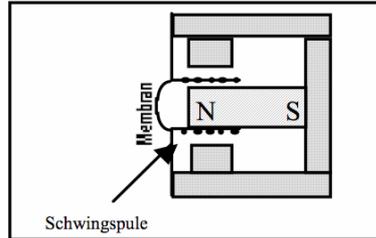
Grundprinzipien der Schallwandlung

- Prinzipiell 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)



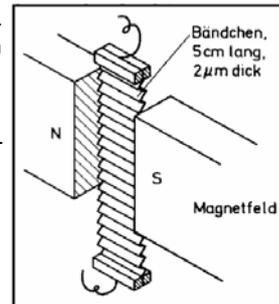
Kohlemikrofon
(preisgünstig, nicht im Studio- oder HiFi-Bereich; typische Anwendung: ältere Telefonmikrofone)



Tauchspulen-Mikrofon

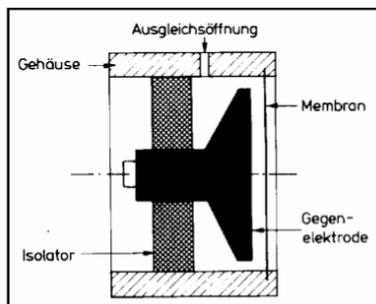
Bändchen-Mikrofon

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

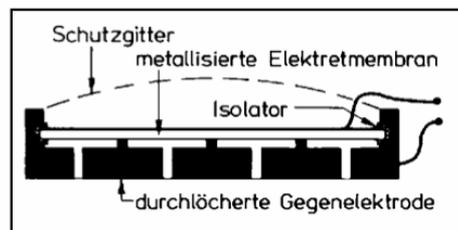


Quelle: Jürg Jecklin, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

Mikrofontypen (Beispiele) (2)



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



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

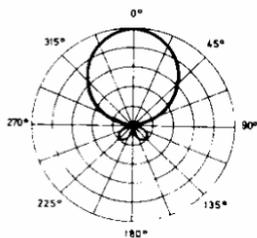
Quelle: Jürg Jecklin, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

Weitere Mikrofontypen

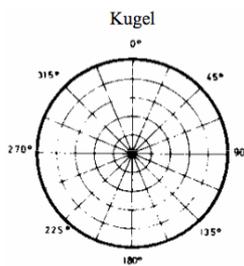
- Freifeld- vs. Grenzflächen-Mikrofon
 - Freifeldmikrofon:
 - » Auf Stativ oder in der Hand
 - Grenzflächenmikrofon:
 - » Direkt an Wänden, Tischen, Böden
 - » Vermeidet Interferenzen mit Reflexionen
 - » meist Elektretmikrofone
- Körperschallmikrofone, Pick-Up-Mikrofone
 - zur Befestigung am Instrument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

Richtcharakteristiken

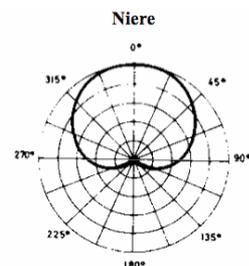
Darstellung der Empfindlichkeit für Schall aus verschiedenen Richtungen
Z.B. Keulencharakteristik für Richtmikrofone



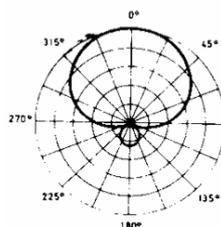
Keule



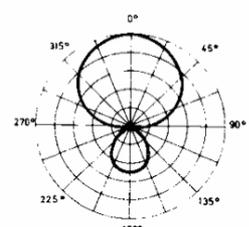
Kugel



Niere



Superniere

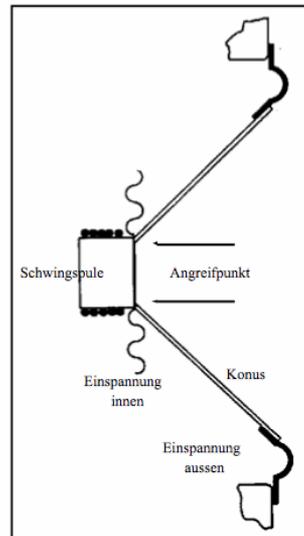


Hyperniere

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

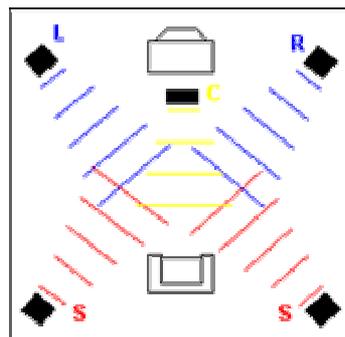
Lautsprecher

- 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



Raumklang (1)

- Stereo:
 - ist die einfachste Art der Klangverteilung mit 2 Kanälen und zwei Boxen. Einfacher ist nur noch Mono mit nur einem Kanal.
- Dolby Pro-Logic(Dolby Surround):
 - ist in der Lage den Sound auf 4 Kanäle aufzuteilen. Die Wiedergabe arbeitet sogar mit 5 Boxen: Zwei Frontlautsprecher (links und rechts), zwei Surround-Boxen hinter dem Hörer (die allerdings nur das selbe Mono-Signal wiedergeben) und einem Center-Lautsprecher.
 - Die 3D-Audio-Wiedergabe ist relativ gut.



Raumklang (2)

- 6-Kanalverfahren ("5.1")
 - Frontboxen (links und rechts)
 - 2 Surround-Boxen hinter dem Zuhörer, (separat angesteuert)
 - Center-Speaker
 - Subwoofer.

Da das menschliche Ohr tiefe Töne nicht orten kann, ist der Standort des Subwoofers egal.

