

Medientechnik

Andreas Butz

Ludwig-Maximilians-Universität München

Sommersemester 2008

Vorlesungskonzept: Heinrich Hußmann

4. Digitale Tonverarbeitung

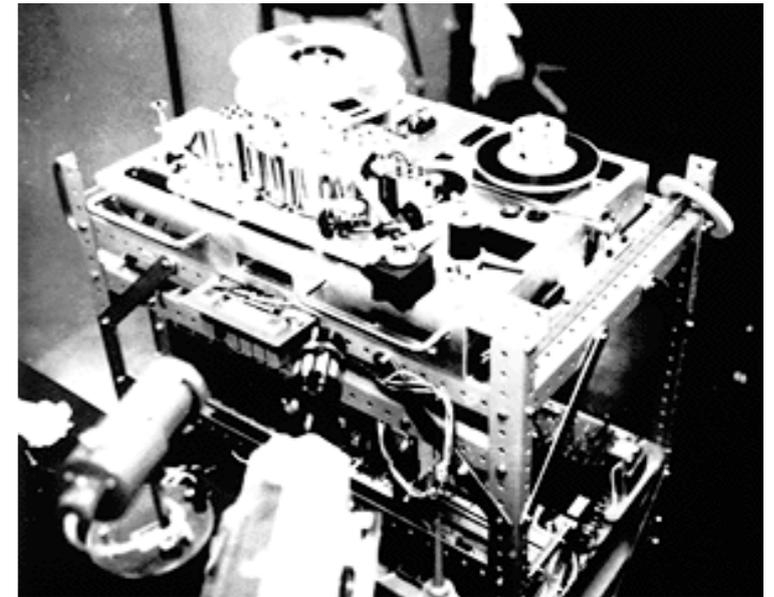
- 4.1 Akustische Grundlagen der Audiotechnik
- 4.2 Analoge Audiotechnik
- 4.3 Digitale Audiotechnik 
- 4.4 Raumklang

Literatur:

- M. Warstat, Th. Görne: Studiotechnik, 5. Auflage, Elektor-Verlag 2002
- H. Raffaseder: Audiodesign, Fachbuchverlag Leipzig 2002
- B. Katz: Mastering Audio – The Art and The Science, Focal Press 2002

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)

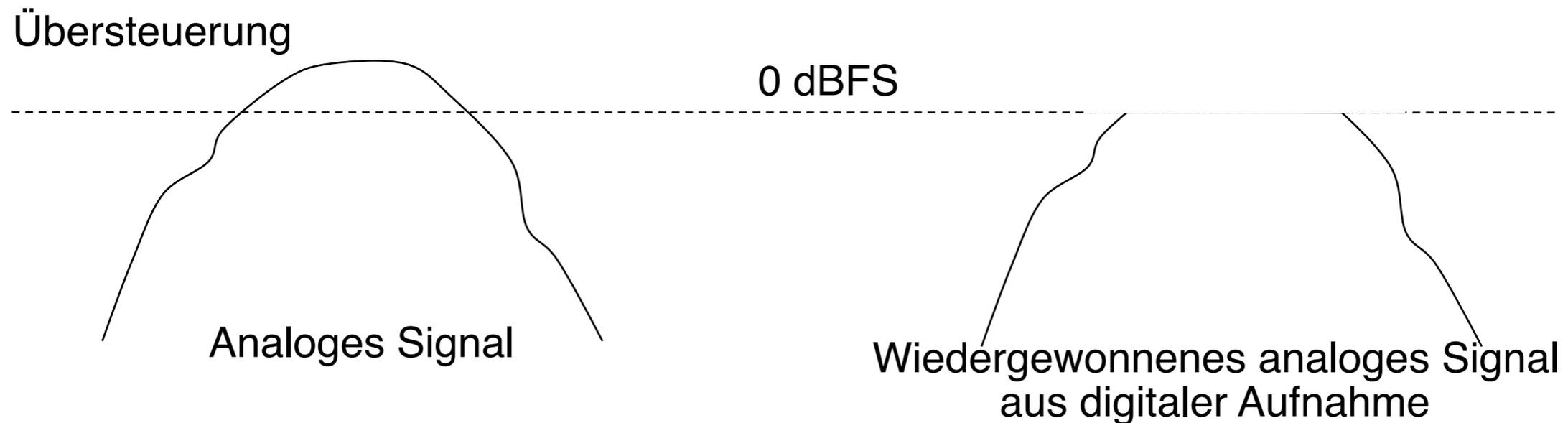
Analog-/Digital-Wandlung

- 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

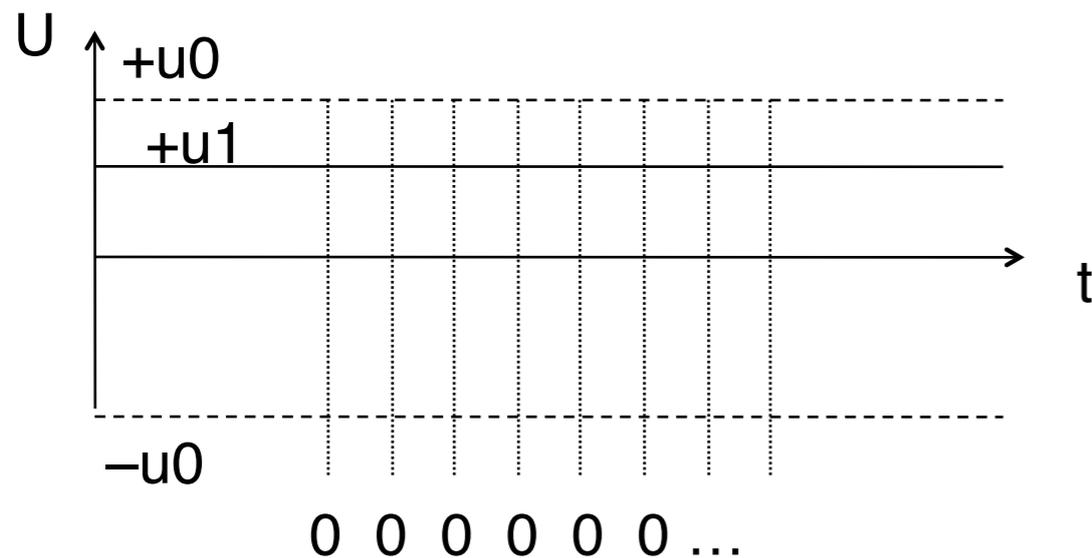
- Maximaler digitaler Audiopegel: 0 dBFS (dB Full Scale)
 - *Maximal* möglicher Wert in der gewählten Quantisierung
 - Prinzipiell unabhängig vom Spannungswert nach Analog-Konversion
 - Alle real auftretenden Pegelwerte sind negativ
- 1 Bit Wortlänge = Verdopplung des Dynamik-Wertebereichs = 6 dB
 - 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“?

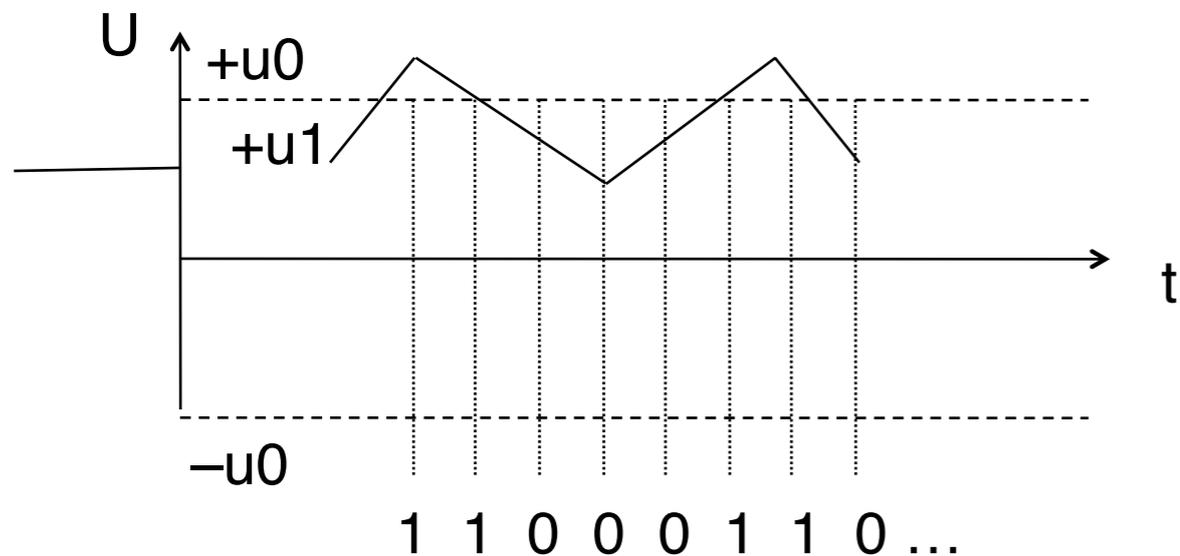


- Signalanteile, die durch Übersteuerung bei der Aufnahme verloren gehen, sind für immer verloren („Clipping“)
 - „OVER“-Anzeige nur bei Aufnahme, nicht bei Wiedergabe!
- Digitales Clipping
 - Akustisch wesentlich unangenehmer als bei analoger Übersteuerung
 - Rechteck-artige Schwingungen
- OVER-Anzeige bei digitalen Peakmetern:
 - Folge von mehreren aufeinander folgenden 0 dBFS-Werten (z.B. 3)

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



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

- Durch Hinzufügen von Rauschen kann die Auflösung der Digitalisierung gesteigert werden (Dithering)
- Gleichzeitig Quantisierungsverzerrungen reduziert

Wortlängenmanagement

- Digitale Bearbeitung liefert größere Wortlängen
 - Berechnungsergebnisse in der Signalverarbeitung
- Es ist sinnvoll, mit längeren Wortlängen zu arbeiten
 - Intern in digitalen Audiogeräten
 - In der digitalen Audio-Bearbeitungskette
 - Vermeiden der Akkumulation von Rundungsfehlern!
- Rückführung auf Medienwortlänge (Rundung)
 - In einem einzigen Schritt, nicht mehrfach
 - Am Ende der Bearbeitungskette
 - Meist unter Verwendung von Dithering (Re-Dithering)

Digitale Audiotechnik

- Klassifikationen digitaler Audiobausteine:
 - Hardware oder Software
 - » Hardware notwendig für A/D- und D/A-Konversion
 - » Hardware sinnvoll bei hohen Anforderungen an Latenzzeit
 - » Hardware-Bedienelemente für Software-Lösungen (z.B. digitales Mischpult)
 - Produktion oder Modifikation
 - » Produktion: Synthesizer, Tongeneratoren, MIDI-Eingabegeräte
 - » Modifikation: Mischung, Filter, Effekte
 - Live oder Postprocessing
 - » Live: Aufnahmestudio, Live-Bühne, Rundfunk
 - » Postprocessing: „offline“ Nachbearbeitung
 - » Hauptunterschied: Latenzzeiten z.B. für Effekt-Rendering

Soundkarten



- Bestandteile:
 - Digitaler Signal-Prozessor (DSP)
 - » Digital-Analog-Converter (DAC)
 - » Analog-Digital-Converter (ADC)
 - Speicher (z.B. für Wellenformen bei Klangsynthese und als Puffer)
- Anschlüsse:
 - Analoge und digitale Audio-Ein-/Ausgänge
 - MIDI-Ein-/Ausgänge
 - Raumklang- (Surround Sound-)Ausgänge
- Einfache Soundfunktionalität heutzutage meistens "on board"
- Geschichte:
 - Xerox *Alto* Prototyp beherrscht einfache Audio-Verarbeitung (1972)
 - Erster Audio-fähiger Kleincomputer für den Massenmarkt: Apple Macintosh (1982)

Digitales Mischpult



Digitales Mischpult
mit eigenem DSP (Digital Sound Processor)



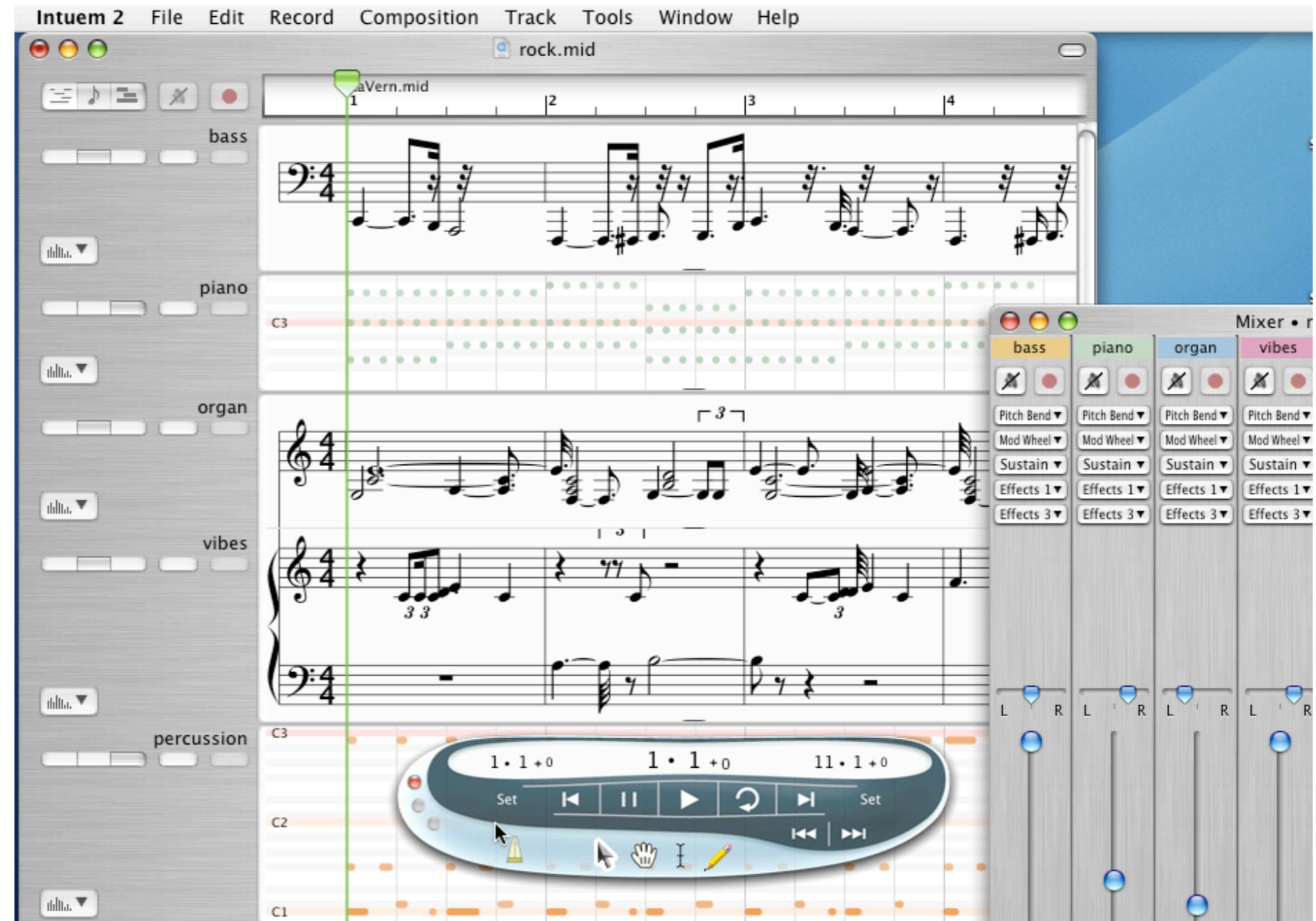
Steuergerät für Software
(z.B. Cubase, Logic)
angeschlossen über FireWire



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

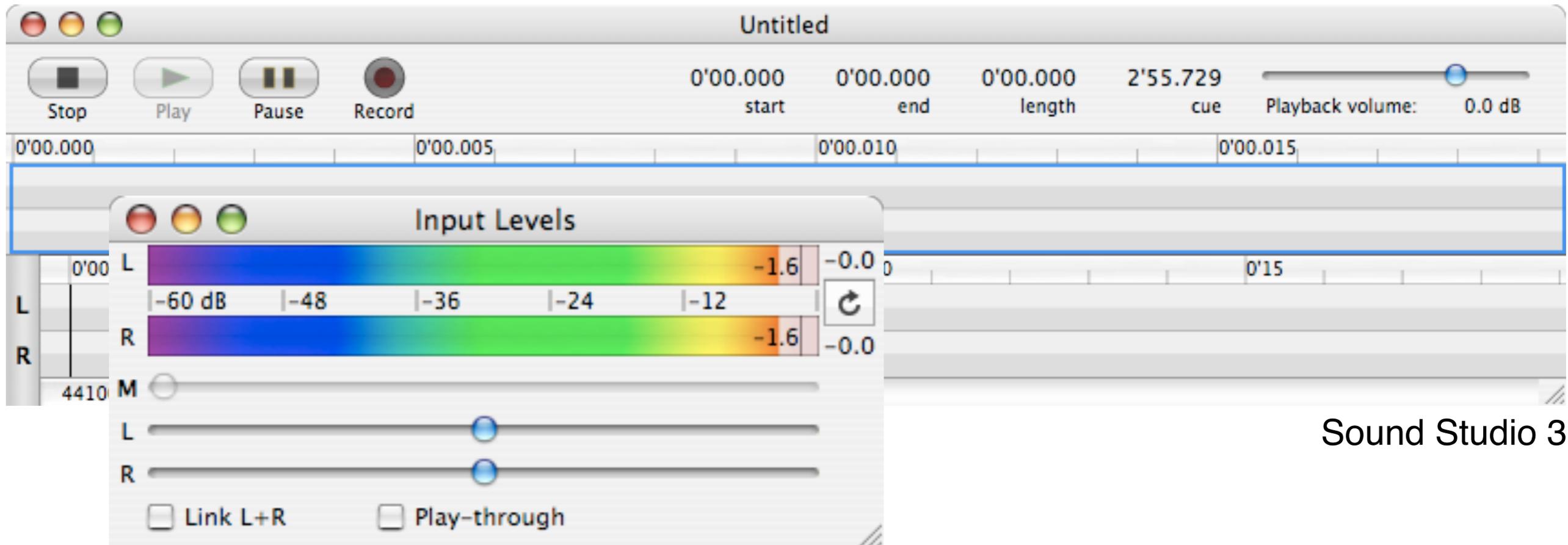
Software: Sequencer

- Aufnahme und Erstellung (Komposition) von MIDI-Daten
- Mischen von MIDI-Spuren und digitalisierten Audio-Daten (virtuelles Mischpult)
- Digitale Effekte



Intuem

Software: Audio-Aufnahme



Sound Studio 3

- Zugriff auf Eingabegeräte (Mikrofone, Mischpult)
- Fortschrittsanzeige
- Aussteuerungsanzeige und -Kontrolle
- Speicherung in diversen Formaten
- Oft kombiniert mit anderen Funktionen (z.B. Postprocessing)

Software: Audio-Bearbeitung



Audacity

- Import diverser Audio-Formate
- Misch- und Schnittfunktionen
- Nachbearbeitung von Klangspektrum und Pegel
- Anwendung von Audio-Effekten

Bearbeitung der Amplitude (1)

- Verstärken, Dämpfen, "Normalizing":
 - nachträgliche Anpassung des gesamten Signalpegels
 - Z.B. Einstellen auf Standard-Durchschnittspegel („Normalizing“)
 - bei Verstärkung werden auch unerwünschte Effekte (z.B. Rauschen, Nebengeräusche) mitverstärkt!
- Normalizing:
 - Relativ zu welchem Standard?
 - Bsp.: Abmischen eines Albums:
 - » Auf keinen Fall einzelne Titel auf Standard-Pegel „normalisieren“
 - » Sinnvoller: Normalizing des Gesamtalbums (Charakter der Einzelsongs bleibt erhalten)

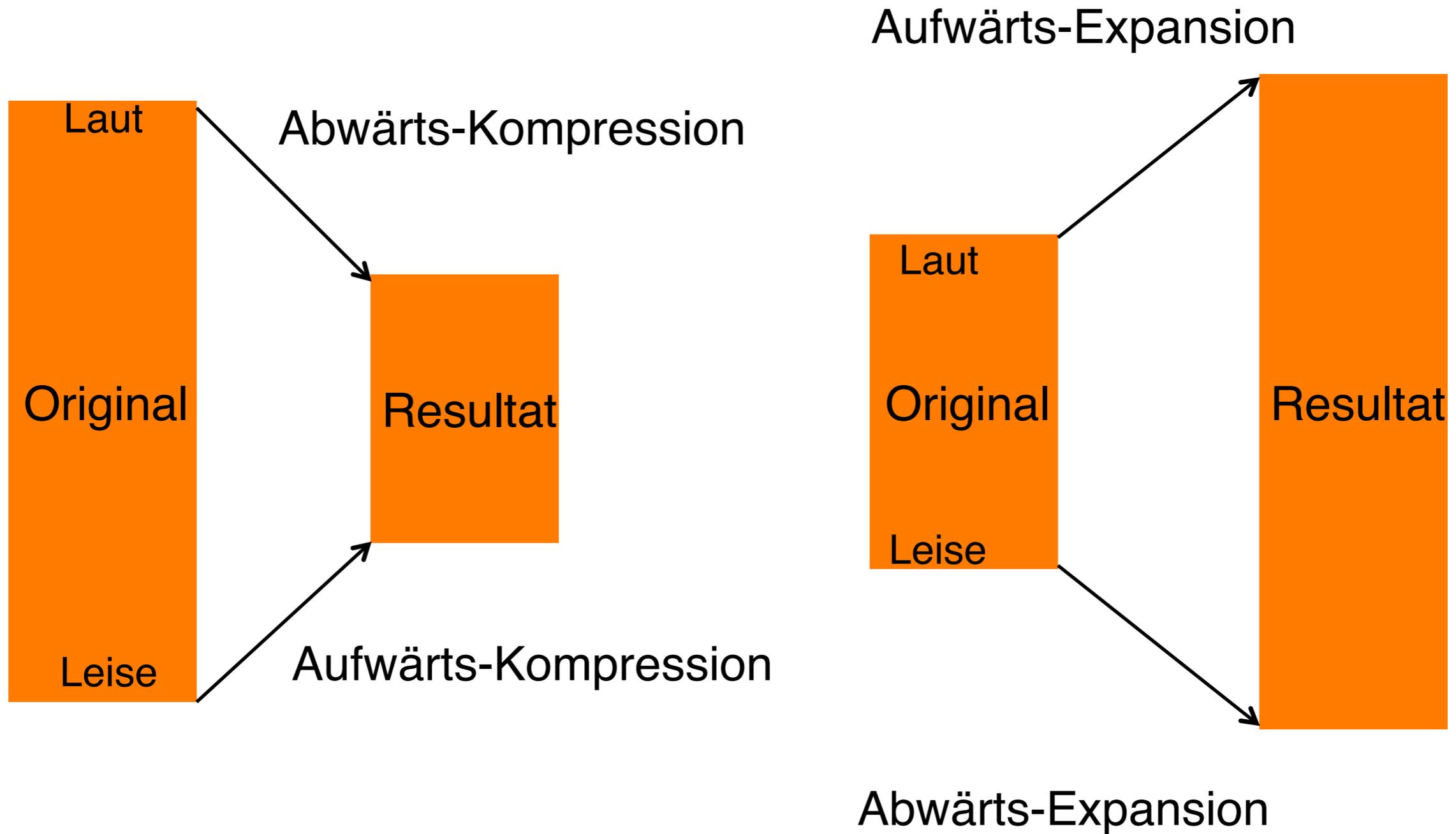
Bearbeitung der Amplitude (2)

- 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
 - 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

Dynamik

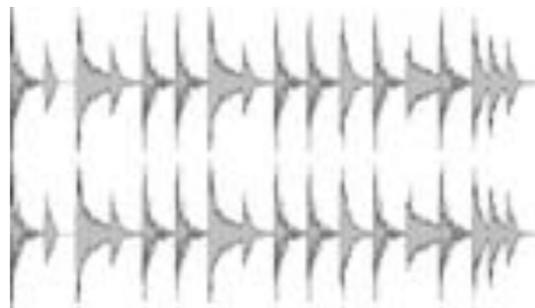
- Unterschied zwischen lauten und leisen Passagen
 - Höchster minus kleinster Amplitudenwert in einem Zeitfenster
- Mikrodynamik
 - Kleine Zeitfenster (Sekundenbruchteile)
 - Eigenschaften von Instrumenten
 - Z.B. Schlagzeug hat hohe Mikrodynamik
 - Bearbeitung der Dynamik eines Einzelkanals vor der Abmischung
- Makrodynamik
 - Große Zeitfenster (Sekunden bis Minuten)
 - Eigenschaften von Songs bzw. Szenen
 - Z.B. pianissimo bis fortissimo
 - Bearbeitung der Gesamtdynamik eines längeren Abschnitts
- Probleme mit Dynamik:
 - Übersteuerung bei Wiedergabe
 - Unhörbarkeit durch Hintergrundgeräusche

Varianten der Dynamik-Modifikation

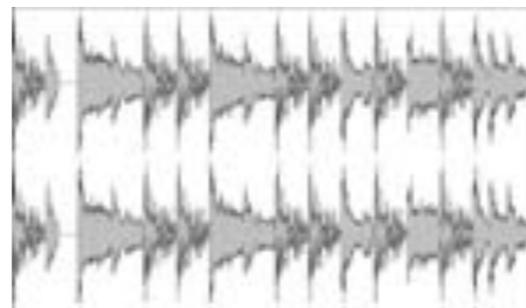


Bearbeitung der Dynamik (1)

- 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

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
 - Immer im Nulldurchgang schneiden (sonst Knacken hörbar)
 - 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

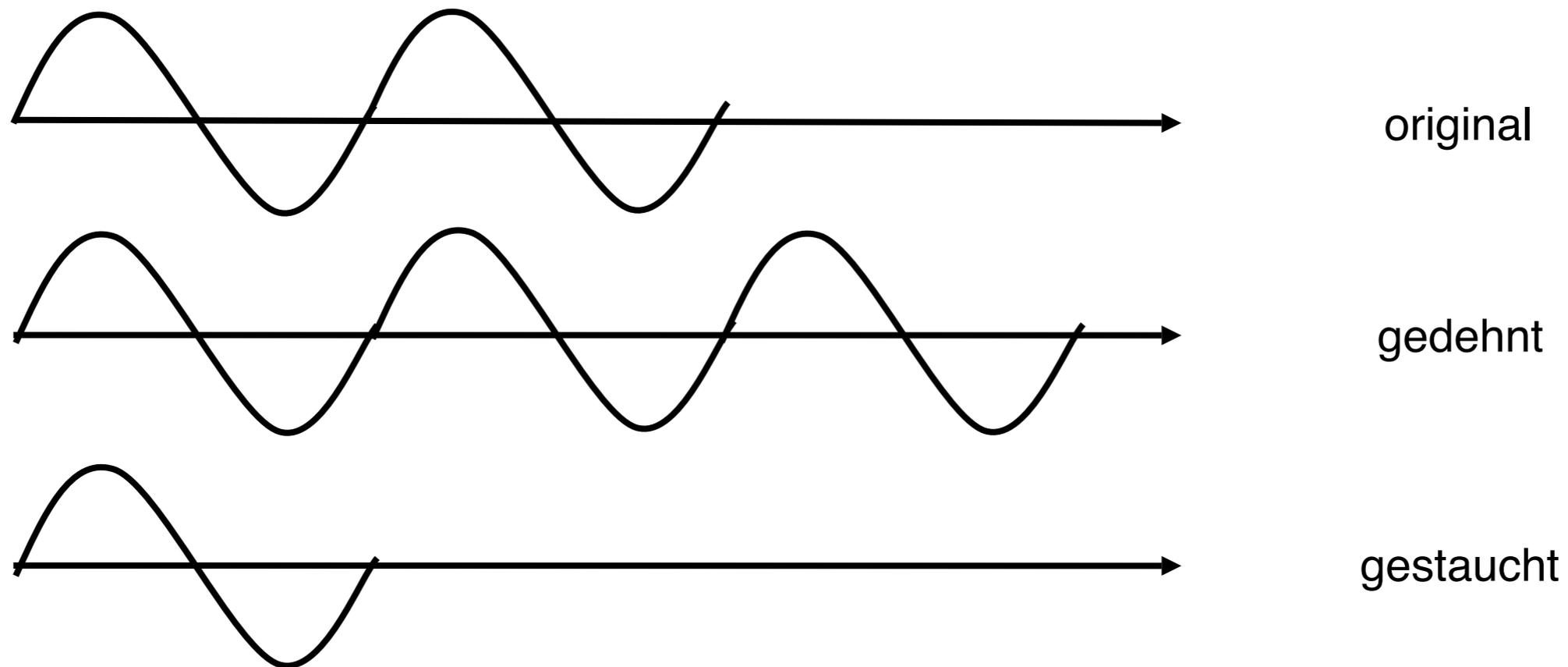
Kugel auf Teller

1/16 Resampling

1/64 Resampling

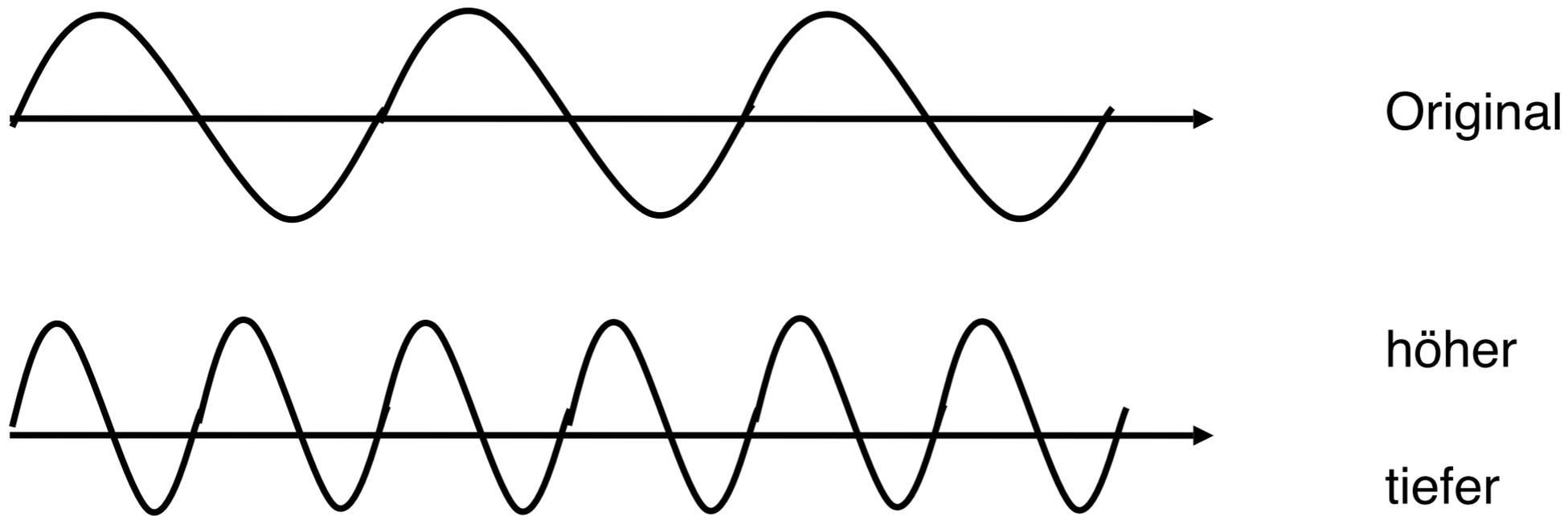
Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (3): Timestretching

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



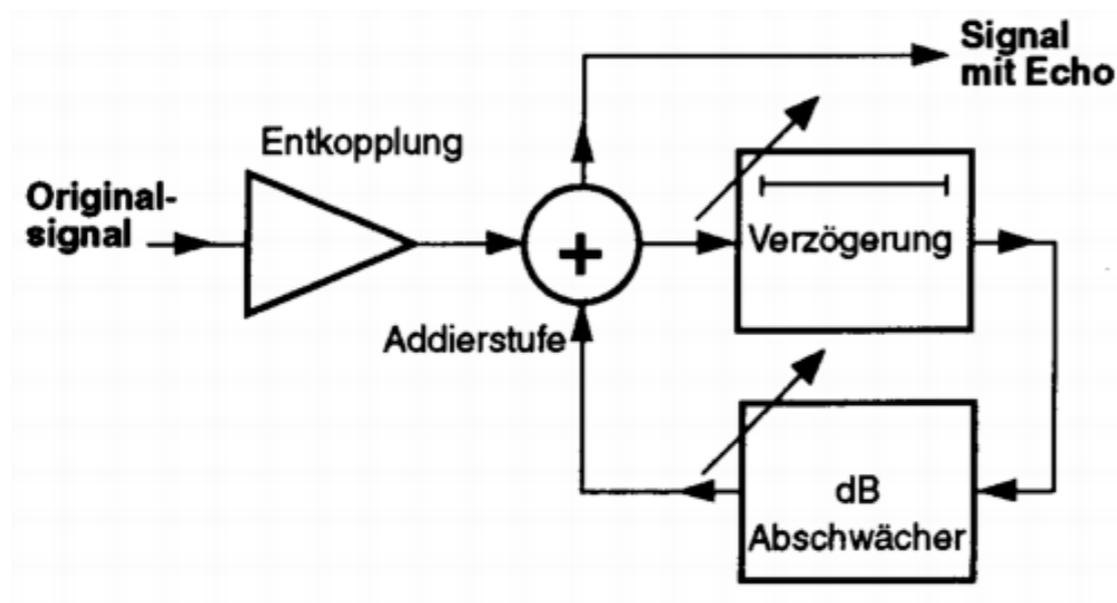
Bearbeitung des zeitlichen Verlaufs (4): Pitchshifting

- Tonhöhenkorrektur bei gleicher Spieldauer
 - Zusammensetzbar aus Timestretching und Resampling

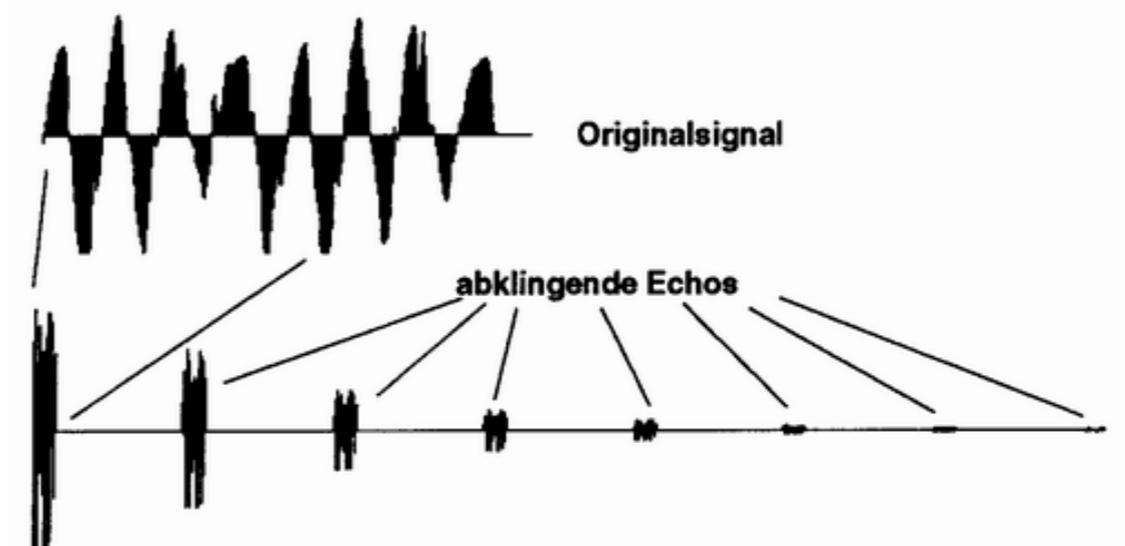


Raumorientierte Bearbeitung: Echo und Hall

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

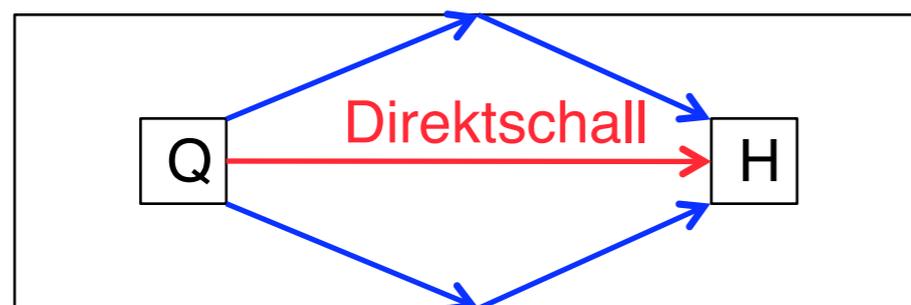


Echoprinzip

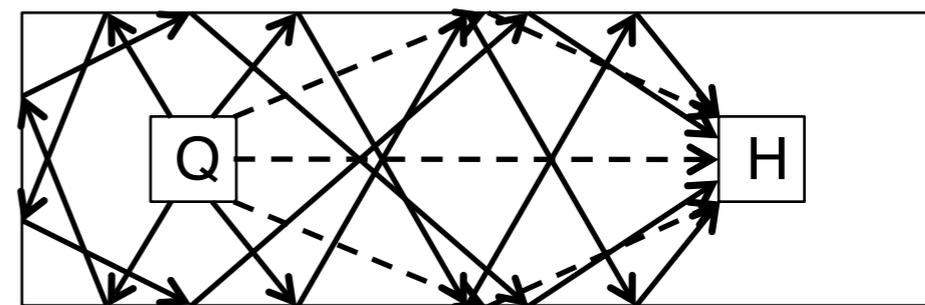


Schallausbreitung im geschlossenen Raum

- 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



Erstreflexionen



Mehrfachreflexionen

Impulsantwort

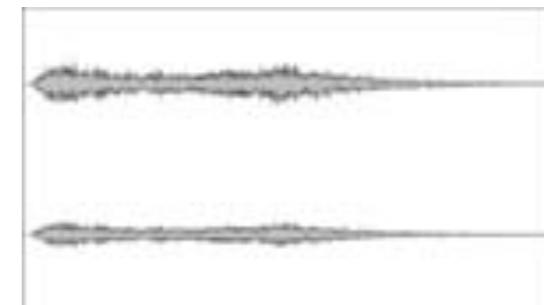
- Verhältnis von Direktschall, Erstreflexionen und Nachhall kann experimentell ermittelt werden:
 - Kurzer Impuls bestimmter Frequenz (Klatschen, Schuss)
 - Spektrum des reflektierten Signals beschreibt Übertragungseigenschaften des Raums (*Impulsantwort*)
- Mathematische Berechnung der Raumwirkung: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



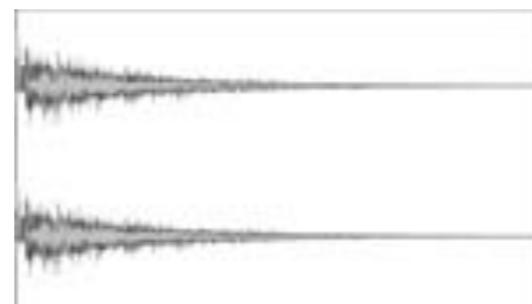
Originalton



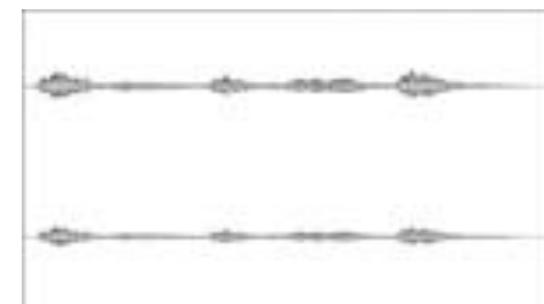
Impulsantwort Kathedrale



Faltungsergebnis



Impulsantwort Büroraum



Faltungsergebnis



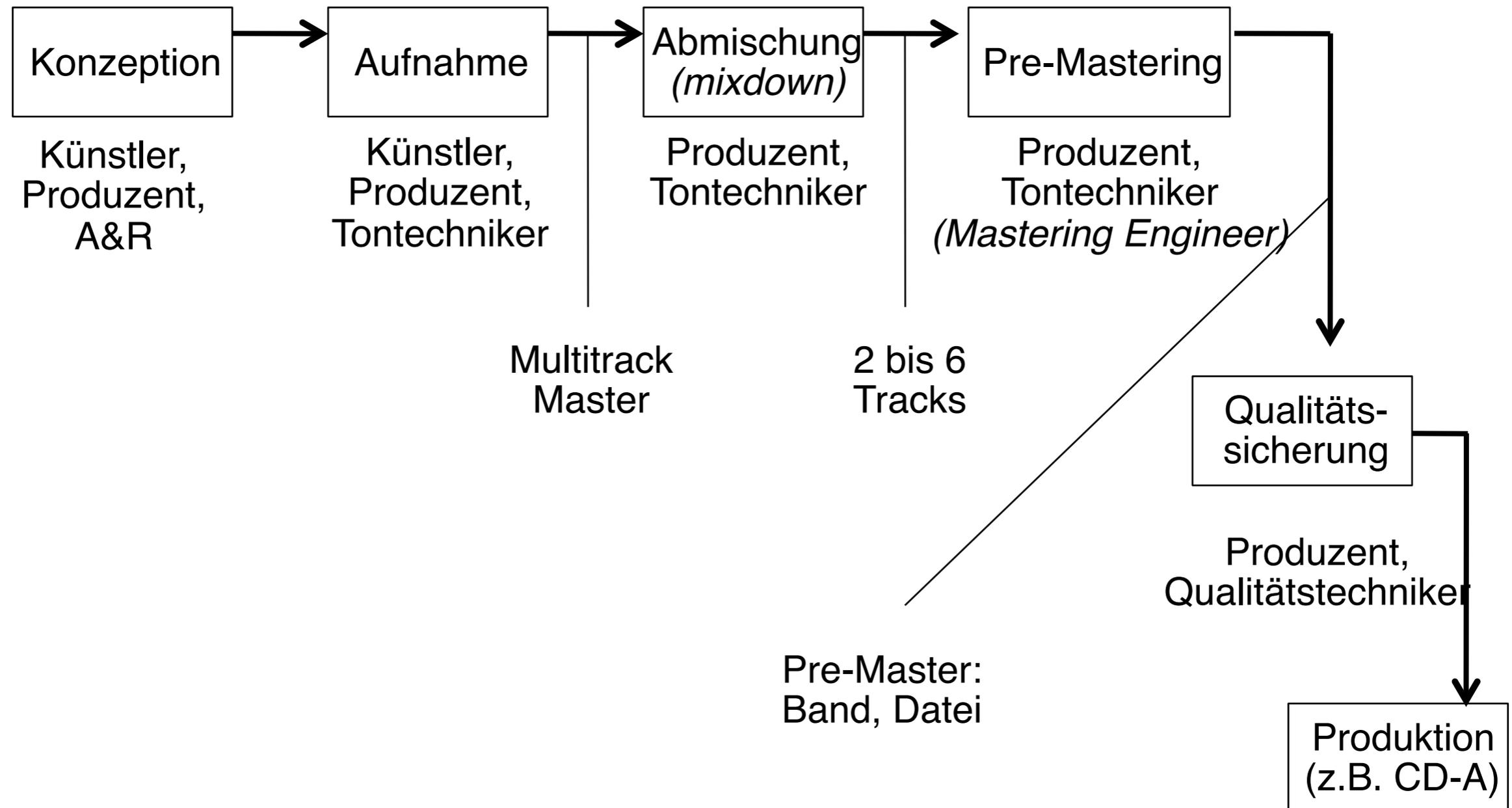
Phasenorientierte Bearbeitung

- Sehr kurze Verzögerungen (unter 30 ms) werden als Phasenveränderungen wahrgenommen und beeinflussen den Gesamtklang
- Chorus:
 - Sehr schnelle, minimal in der Höhe veränderte Signalrückführung
 - 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

Restoration

- 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
- **Decracking:**
 - Wiederholtes Declicking, auch automatisch ausgeführt

Produktionsprozess eines Musikalbums



- Aus: Bob Katz: Mastering Audio

Loudness Wars

- Psychoakustische Tatsache:
 - Spontan wird eine lautere Audio-Darbietung bei sonst gleicher Qualität als „besser“ empfunden
 - Eindruck ändert sich bei längerem Hören!
- Digital vs. Analog:
 - Digitales Audio (CD) tendenziell „leiser“
 - Hochwertiges digitales Audio noch leiser
 - Wegen Ausnutzung des verfügbaren Dynamikbereichs
- Tendenz:
 - Digitale Audio-Aufnahmen werden oft zu hoch ausgesteuert (sollen lauter klingen)
 - Kompression wird oft zu stark angewandt

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
- B. Katz: Mastering Audio – The Art and The Science, Focal Press 2002

Raumklang (1)

- Stereo:

Einfachste Art der Klangverteilung mit 2 Kanälen und zwei Boxen.
Einfacher ist nur noch Mono mit nur einem Kanal.

- Dolby Pro-Logic (Dolby Surround):

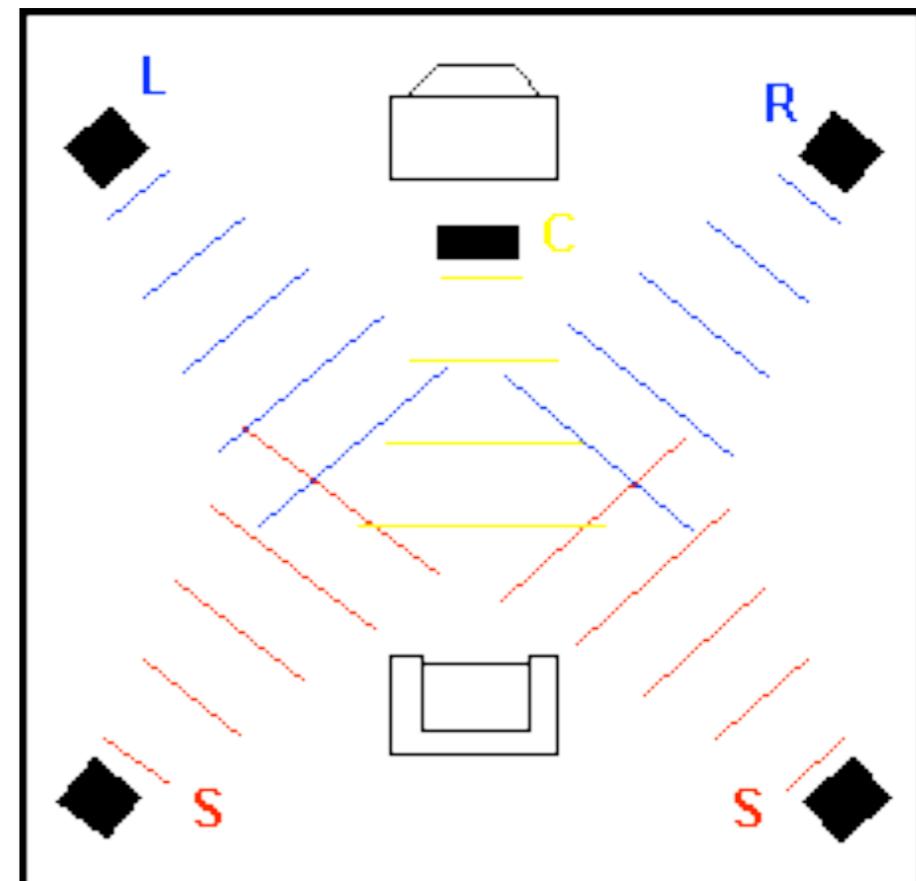
4 Kanäle, in den 2 Stereokanälen enkodiert

Bei Wiedergabe 5 Boxen:

Zwei Frontlautsprecher

Zwei Surround-Boxen
(dasselbe Mono-Signal)

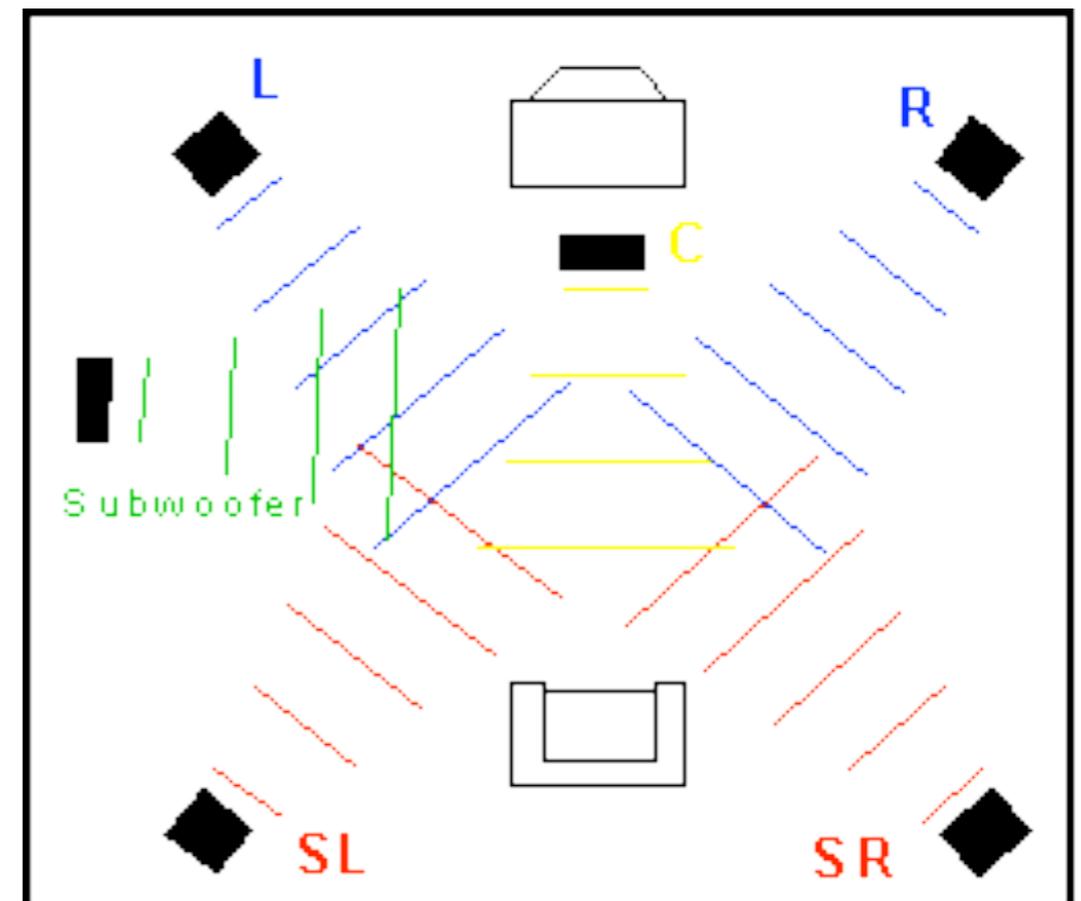
Center-Lautsprecher



Raumklang (2)

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

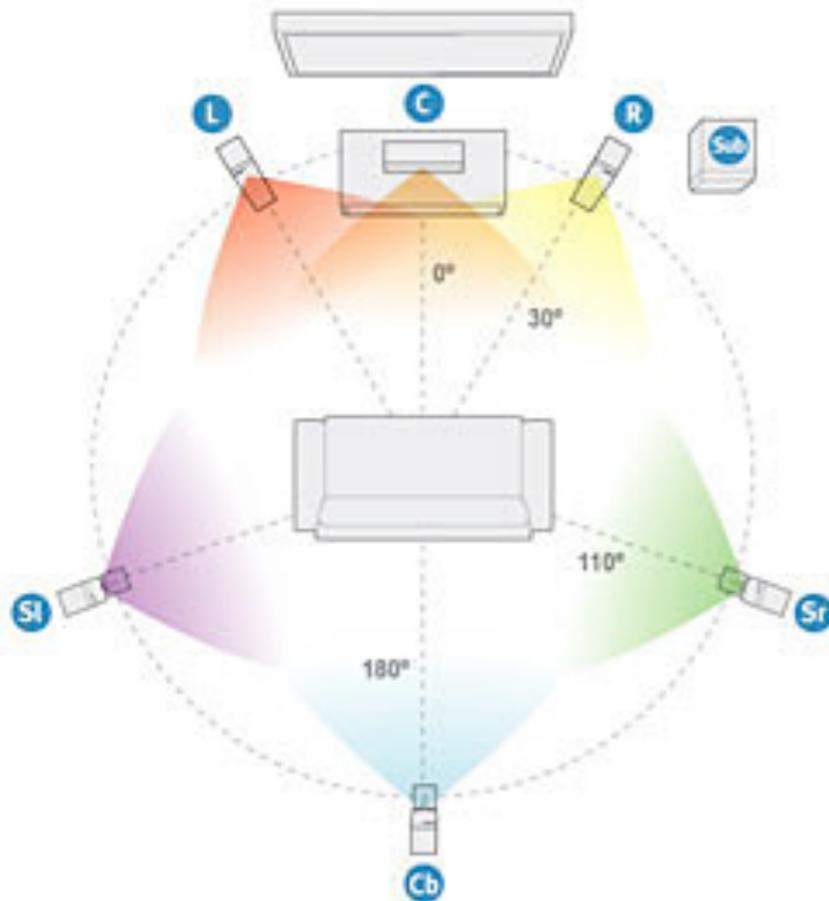
Da das menschliche Ohr tiefe Töne nicht orten kann, ist der Standort des Subwoofers egal.



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

Raumklang (3)

- 7- und 8-Kanal-Systeme:

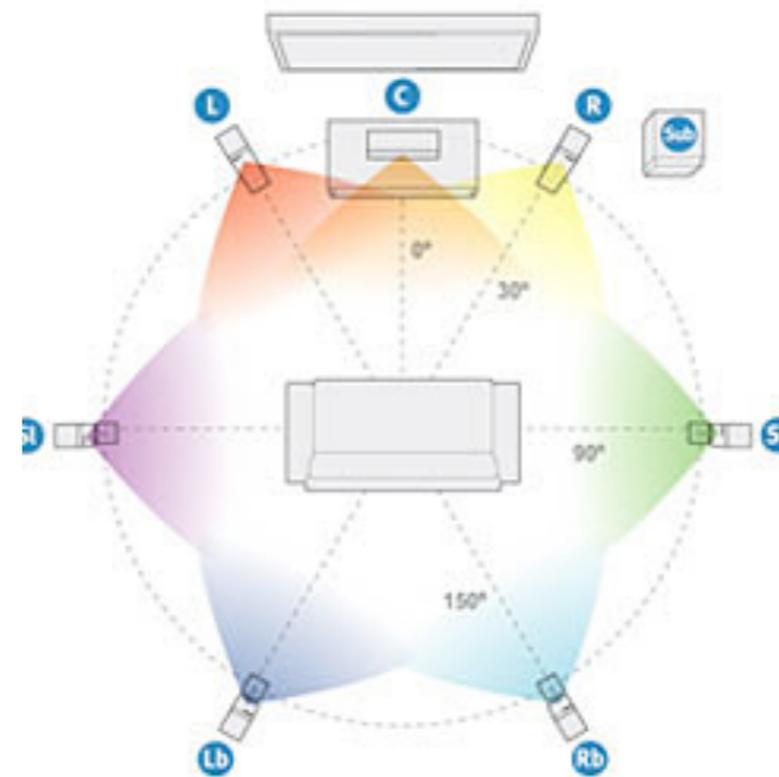


6.1

Schlüssel

- L** Links
- C** Center
- R** Rechts
- S_{sb}** Subwoofer
- Sl** Surround Links
- Sr** Surround Rechts
- Cb** Center Hinten

7.1



Schlüssel

- L** Links
- C** Center
- R** Rechts
- S_{sb}** Subwoofer
- Sl** Surround Links
- Sr** Surround Rechts
- Lb** Links Hinten
- Rb** Rechts Hinten