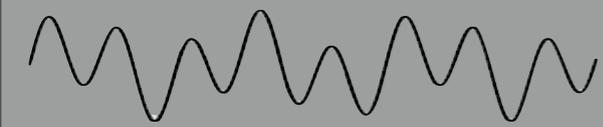


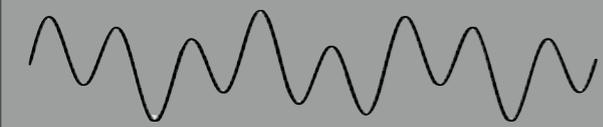
Digitale Audiosignalverarbeitung





Inhalt

- Grundlegendes zur Signalverarbeitung
- AD-/DA-Wandlung
- Digitale Signalprozessoren: Aufbau
Funktion
Anwendungen
- Digital Audio Workstations
- Digitale Summierung

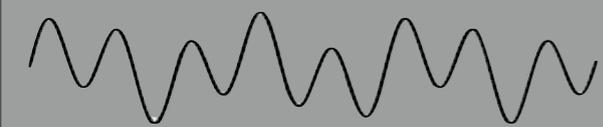


Grundlegendes zur Signalverarbeitung

Digitale Signalverarbeitung = Teilgebiet der Nachrichtentechnik

Digitaler Vormarsch gegen analoge Probleme:

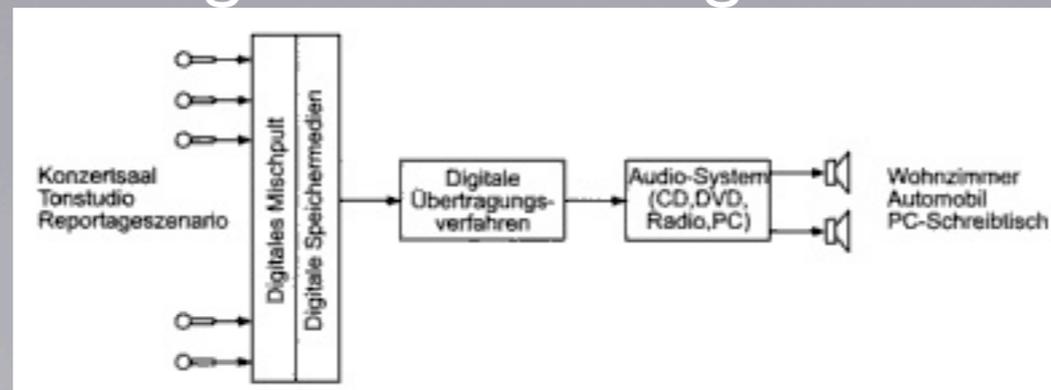
- geringe Genauigkeit
- Alterung
- Datenspeicherung nicht möglich
- teurer
- Eigenrauschen



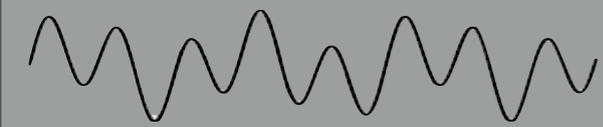
Grundlegendes zur Signalverarbeitung

Verarbeitung digitaler Signale mit digitalen Systemen

Signalverarbeitungskette



Aufnahme, Speicherung, Übertragung, Wiedergabe
Analog → Digital → Analog



AD / DA Wandlung

Begriffserklärungen:

Samplingfrequenz: Häufigkeit, wie oft ein Signal in einem bestimmten Zeitintervall abgetastet wird
Einhaltung des Shannonschen Abtasttheorem!

Quantisierungsstufen \longrightarrow Auflösung in Bits

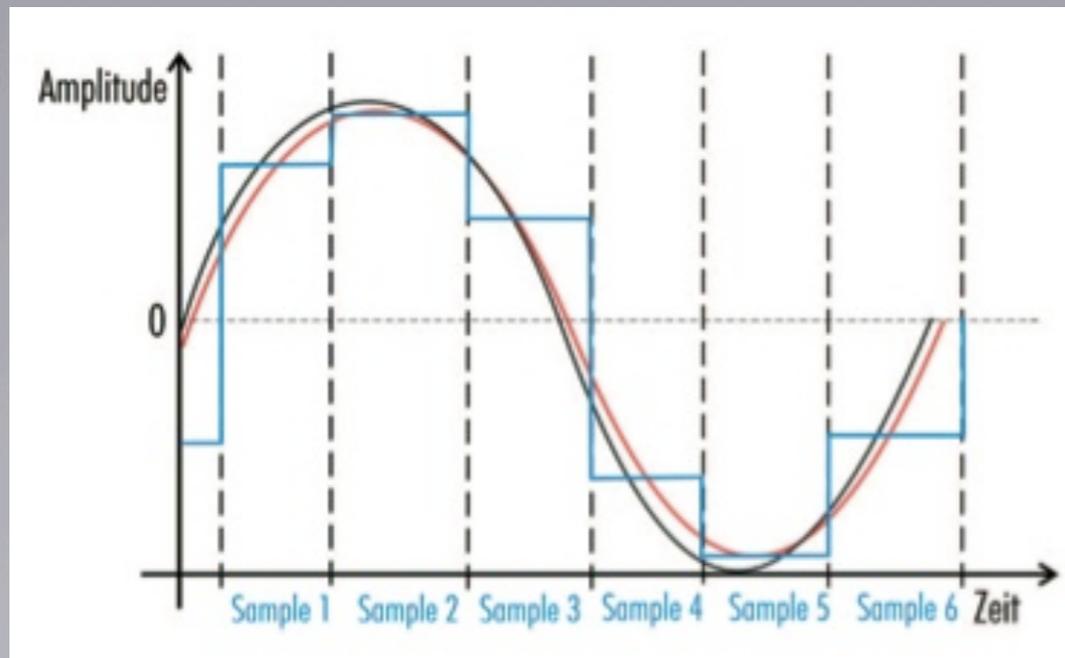
Stufen	Abbildungen	Dynamik
8 bit	256	48 dB
16 bit	65536	96 dB
20 bit	1048576	120 dB
24 bit	16777216	144 dB



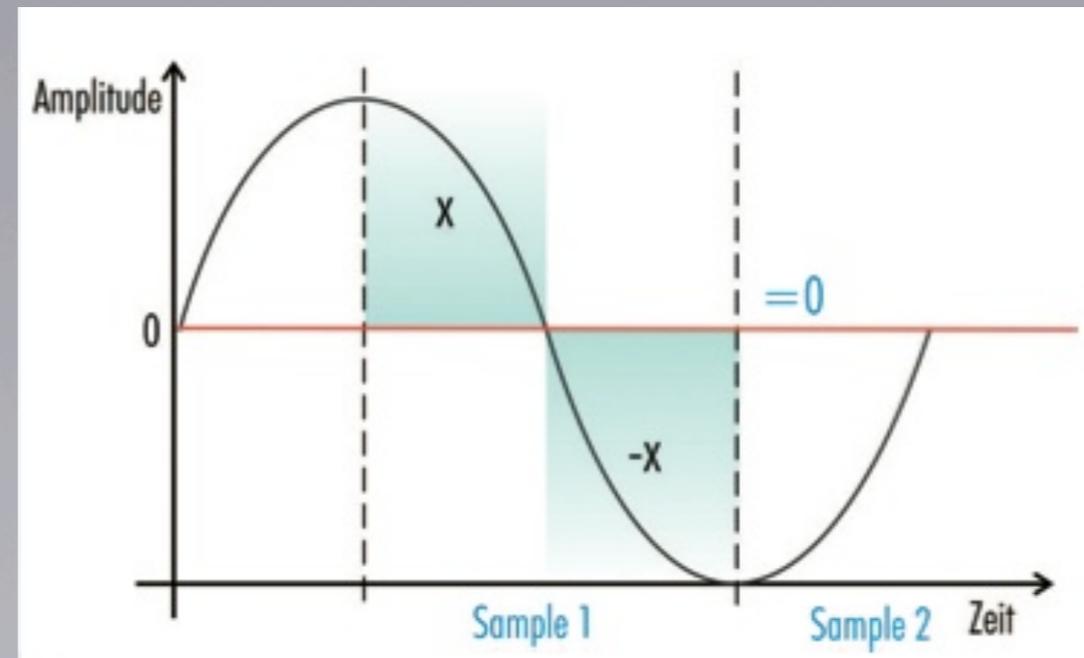
AD / DA Wandlung

Probleme:

- Phasenwinkel zwischen Nutz- und Abtastsignal $\neq 0^\circ$

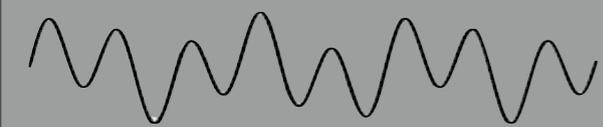


1/6 Abtastfrequenz



1/2 Abtastfrequenz

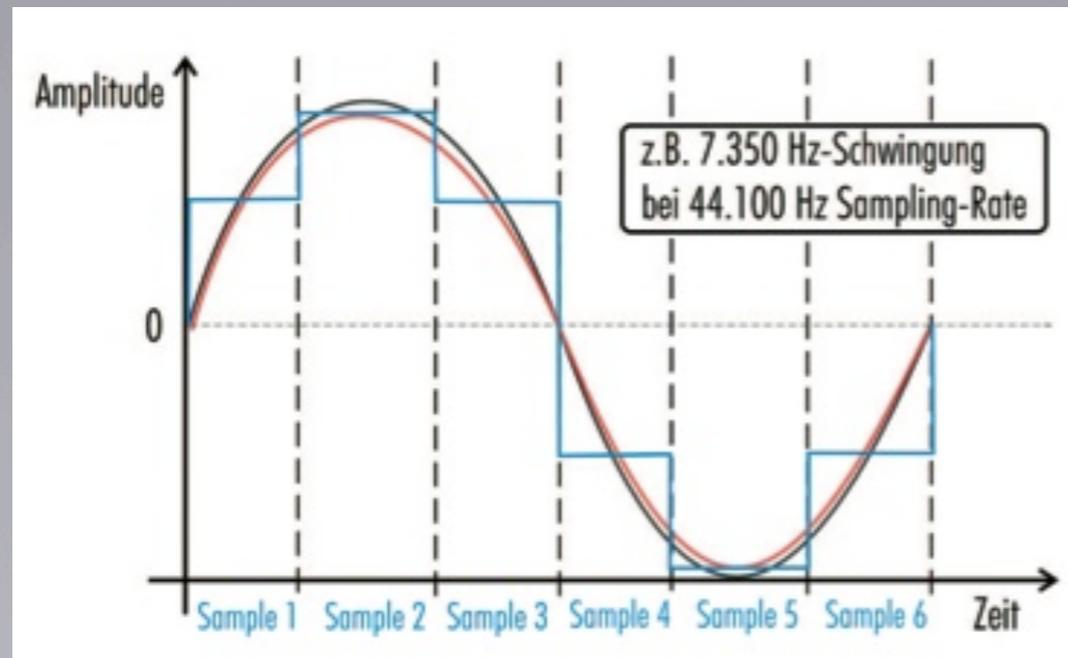
Abtastung beginnt nicht immer bei 0°



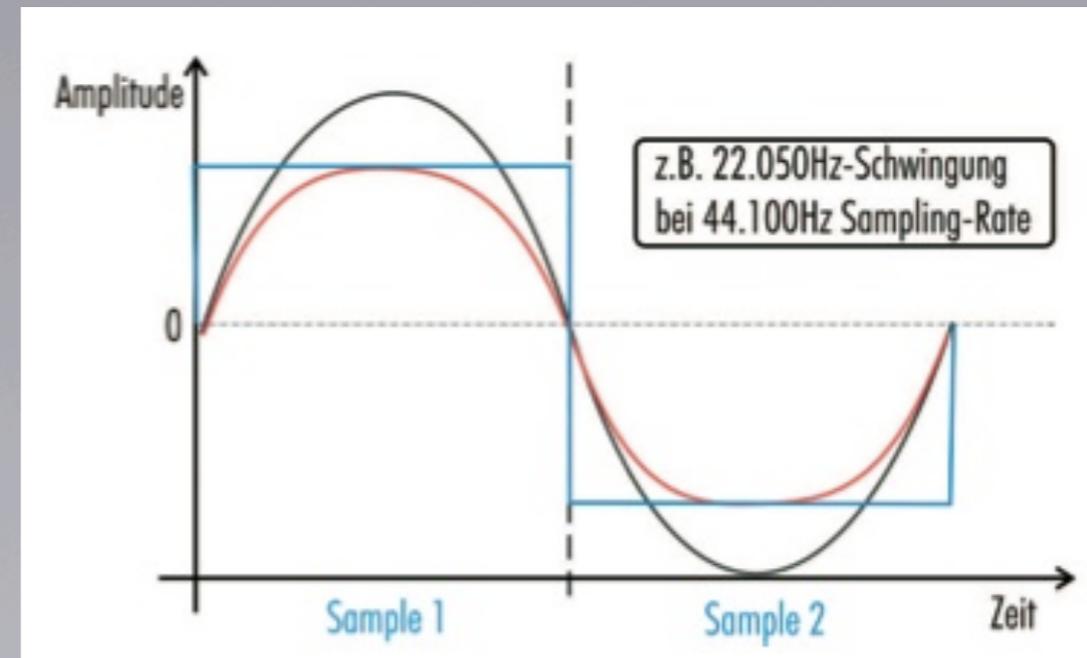
AD / DA Wandlung

Probleme:

- Nutzfrequenz = $1/2$ Abtastfrequenz

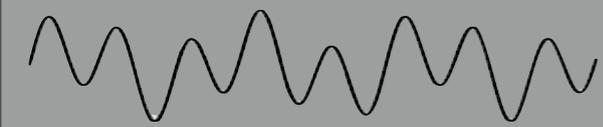


$1/6$ Abtastfrequenz



$1/2$ Abtastfrequenz

Je näher Nutzfrequenz an Abtastfrequenz, desto schwierigere Rekonstruktion



AD / DA Wandlung

Probleme:

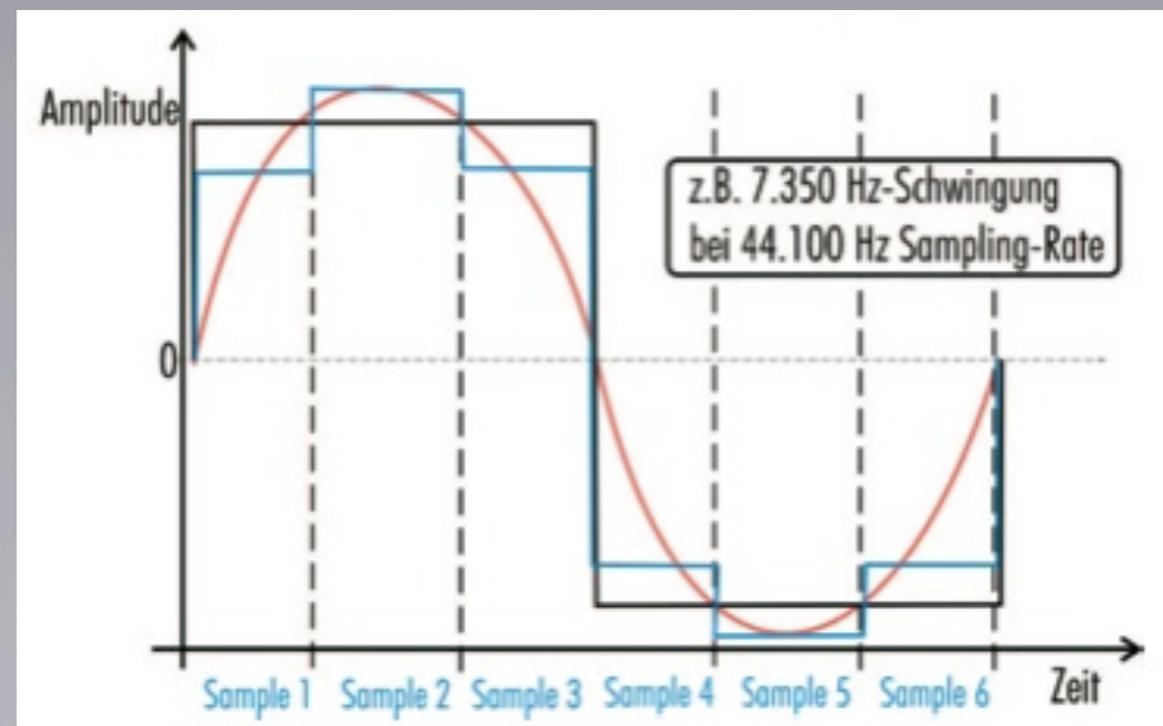
- Wechselnde Frequenzen & Phasenlagen (z.B. bei Musik):
Frequenz und Phasenlage stehen in keinem Verhältnis zur Abtastfrequenz
 - Unharmonische Verzerrungen (Intermodulationsverzerrungen)
Nehmen mit sinkendem Pegel und steigender Frequenz zu
- Klirrfaktor: Bei kleinen Pegeln am größten
Sinkt mit steigendem Pegel
Abrupter Übergang in den Übersteuerungsbereich



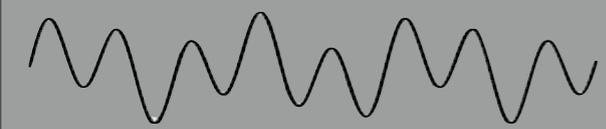
AD / DA Wandlung

Probleme:

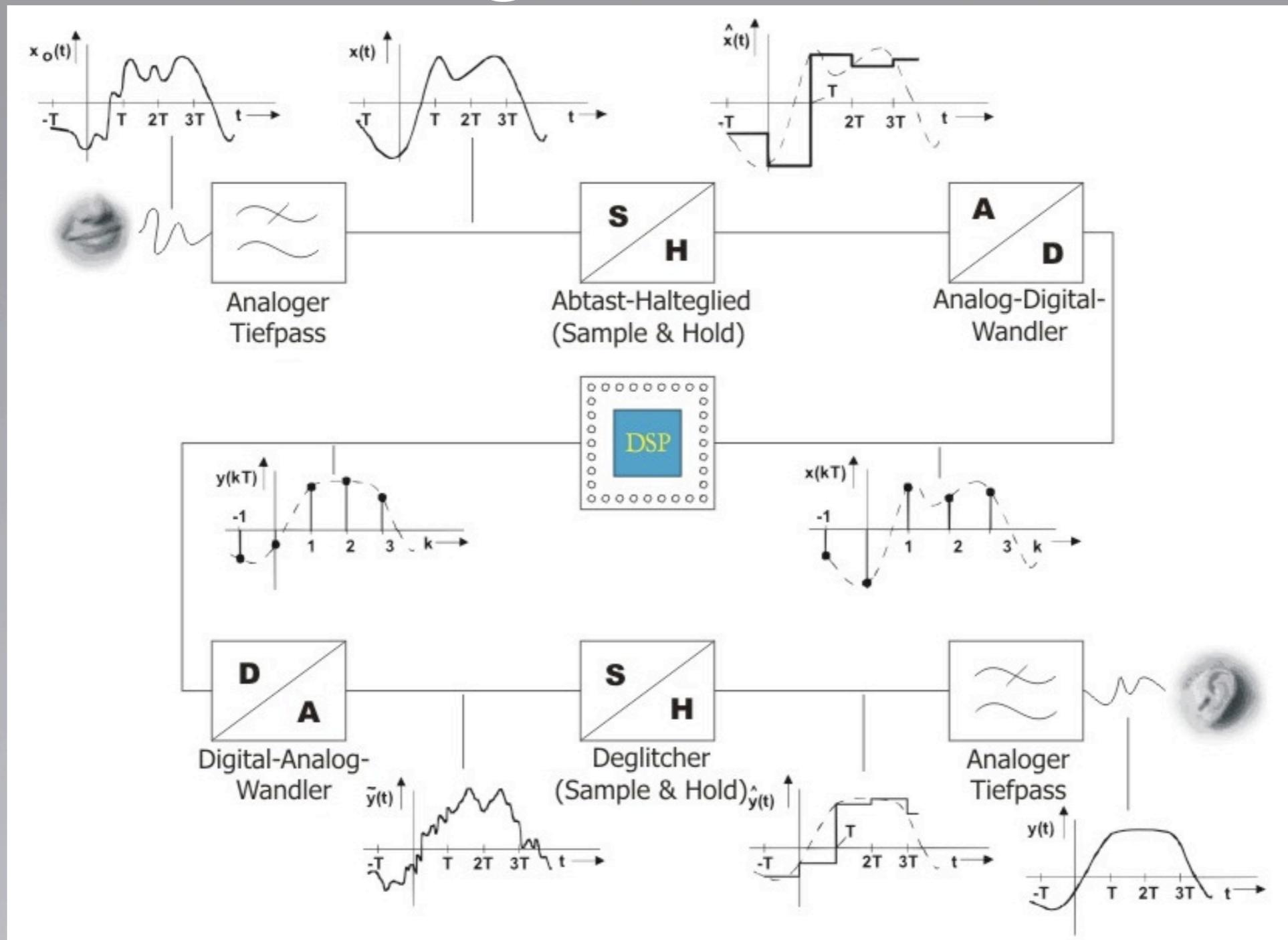
- Impulstreue: Glättung von Signalen

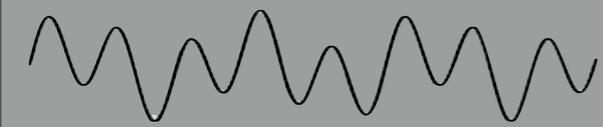


Wird durch lahme, minderwertige Bauteile & schlechte Kabel verursacht
Bereits ab ca. 7kHz wird die Flankensteilheit / Attack vermindert



System zur digitalen Verarbeitung



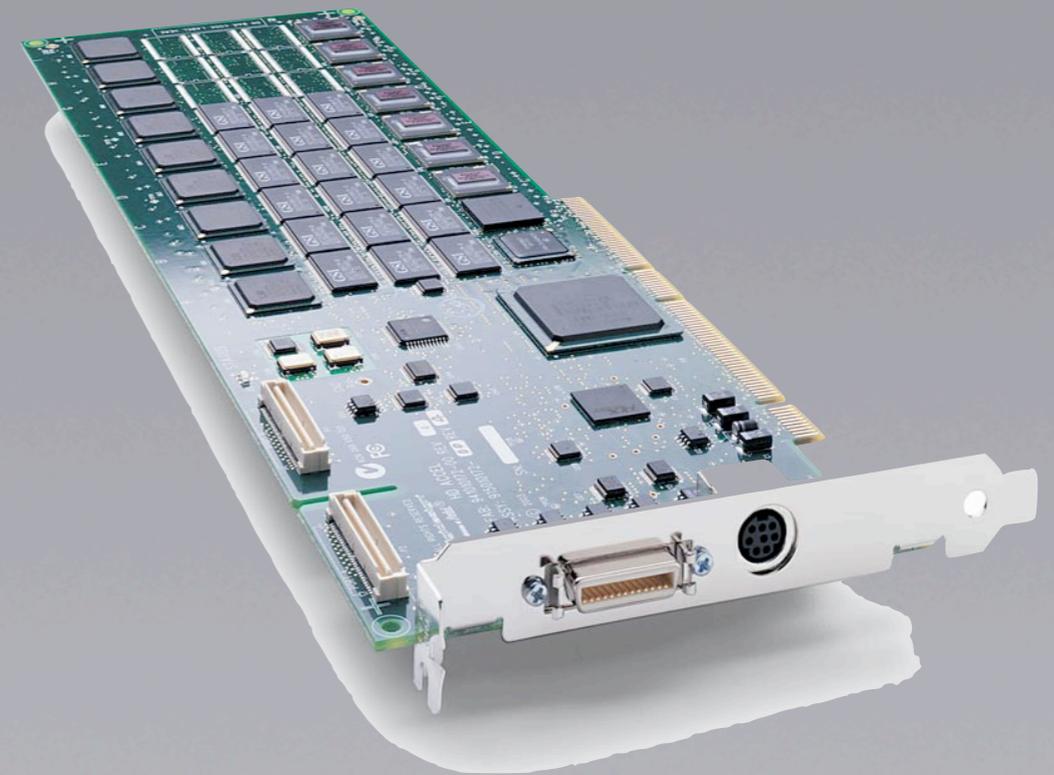


Digitale Signalprozessoren DSP

Spezieller Prozessor für Anwendungen
der Audiosignalverarbeitung

Digitale Verarbeitung in Echtzeit

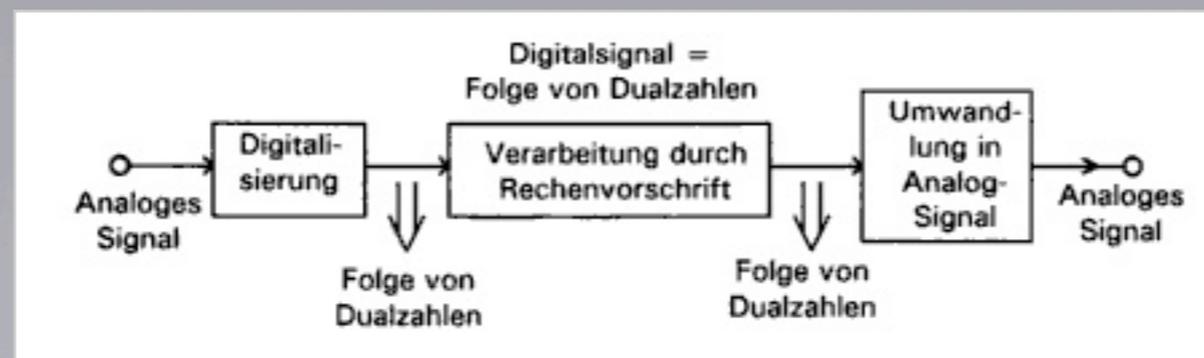
Benötigt zeitdiskrete Signale

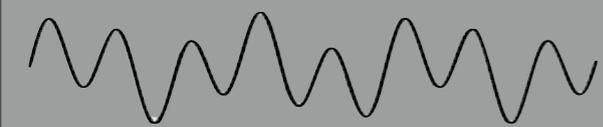




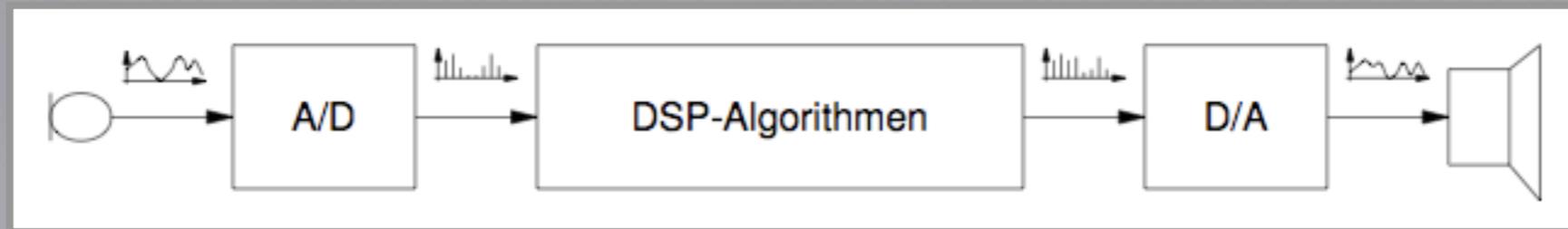
Digitale Signalprozessoren DSP

Eingangszahlenfolge $\xrightarrow{\text{Algorithmus}}$ Ausgangszahlenfolge





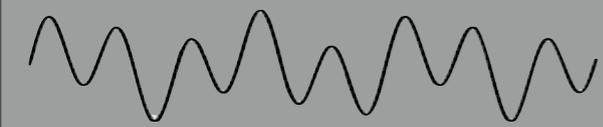
Digitale Signalprozessoren DSP



Verstärkung: $\text{output}[t] = \text{input}[t] * \text{gain}$

Delay: $\text{delay}[t] = \text{input}[t] * \text{gain} + \text{input}[t-t2] * \text{gain2}$

Und viele mehr: Hall, Echo, Verzerrung, Filter, Tonhöhenänderung



Digitale Signalprozessoren DSP

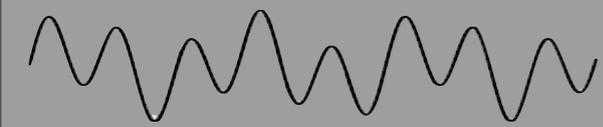
Vorraussetzungen für Echtzeitfähigkeit:

- Harvard-Architektur: Getrennter Programm & Datenspeicher
- MAC - Befehle: Führt Multiplikation und Addition in einem Befehl aus
- Serielle Schnittstellen
- Multiplex-Technik: 1 Befehl wird mehrfach ausgenutzt

Dauer eines Bearbeitungsschritt:

Bei 48 kHz Samplingfrequenz = $20\mu\text{s}$ Bearbeitungszeit

Verwendung von Festpunktarithmetik



Digitale Signalprozessoren DSP

Festkommadarstellung

Position des Kommas festgelegt

—————> Bestimmt Wertebereich & Auflösung

Bsp: 10 Bit Festkommazahl $x.y\ yyy\ yyy$

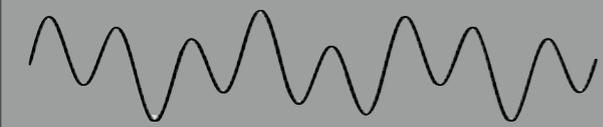
$x = \text{Wertigkeit } -1$ $y = 2^{-1}\ 2^{-2}\ 2^{-3}\ 2^{-4}\ 2^{-5}\ \dots\ 2^{-9}$

Wertebereich: 1.000 000 000 = -1 bis 0.111 111 111 = 0,998

Auflösung: $2^{-9} = 0,001953125$

Bereich der Zahlen unabhängig von Position des Kommas

Kleine darzustellende Zahlenmenge



Digitale Signalprozessoren DSP

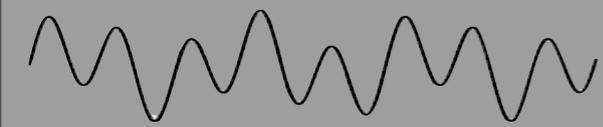
Festkommadarstellung

Bei Signalprozessoren:

- Geringer Rechenaufwand, einfacherer Aufbau

aber: begrenzte Genauigkeit und kostet viel Speicher

& bei jedem Rechenschritt muss darauf geachtet werden wo sich das Komma befindet und ob es einen Überlauf gibt



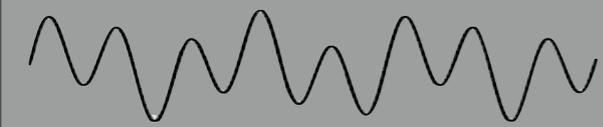
Digitale Signalprozessoren DSP

Gleitkommadarstellung:

Darstellung: $z = m * b^y$

m: Mantisse
y: Exponent
b: Basis

- Große Zahl kann mit kleinem Speicher präsentiert werden
- „fließende“ Position des Kommas
- sehr großer Wertebereich, aber variierender Genauigkeit



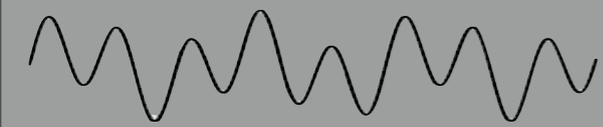
Digitale Signalprozessoren DSP

Gleitkommadarstellung:

Bei Signalprozessoren:

- komplexerer Aufbau; teurer

aber: Einfache Implementierung komplizierter Algorithmen



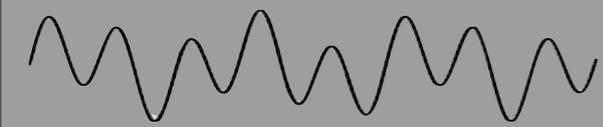
Digital Audio Workstations

System zur Aufnahme, Bearbeitung, Mischung & Mastering

- nicht-linear: Beliebige Stelle im Projekt anwähl - und bearbeitbar
- nicht-destruktiv: Bei Bearbeitung bleibt Originalmaterial erhalten

Stand-alone Systeme

Host-basierte Systeme: Nativ oder DSP



Digital Audio Workstations

32 Bit Gleitkommaarithmetik: Übersteuerung theoretisch unmöglich

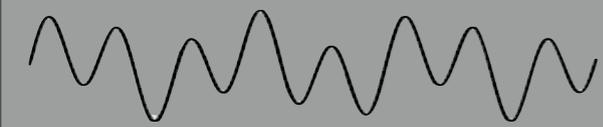
Mehr Headroom: Pegelreserve vom lautesten Signal bis zur Obergrenze

Bessere Darstellung von Signale mit leisen Tönen

Gleiche Genauigkeit bei jedem Level

Rundungsfehler z.B. bei Normalisieren werden kleiner

Größere Dynamik



Digital Audio Workstations

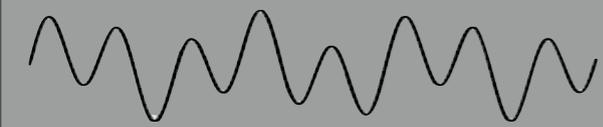
Nativ vs. DSP:

Nativ: Cubase, Logic, Pro Tools LE

Gesamte Signalverarbeitung auf Prozessor

—————> Rechner werden immer schneller

Floating Point Arbeitsweise

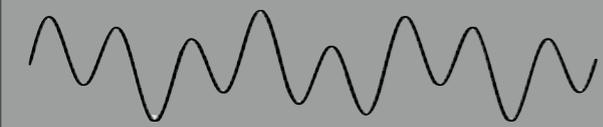


Digital Audio Workstations

Nativ vs. DSP:

- Nativ: - Andere Prozesse & Tasks laufen nebenher auf Prozessor
——→ U.a. Auswirkungen auf die Bildschirmdarstellung
- Ressourcen für die Abspiel-Engine abhängig von Zahl der Plug-Ins
 - Latenzen
 - Gefahr von Audio-Klicks bei Überlastung der CPU
 - „runterbouncen“ schränkt Flexibilität ein
(Arbeitsablauf ruht)

Aber: Preis/Leistungsverhältnis Top



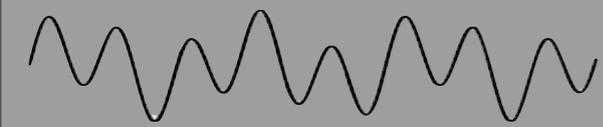
Digital Audio Workstations

Nativ vs. DSP:

DSP: Pro Tools HD, Soundscape

Split-Situation: Rechner kontrolliert, DSP verarbeitet

—————→ Berechenbarkeit: - Immer flüssige Darstellung
- Genug Ressourcen
- DSP nur Audiosignalverarbeitung

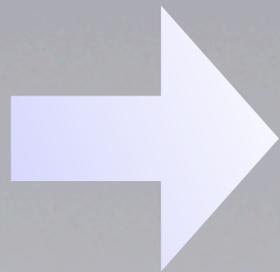


Digital Audio Workstations

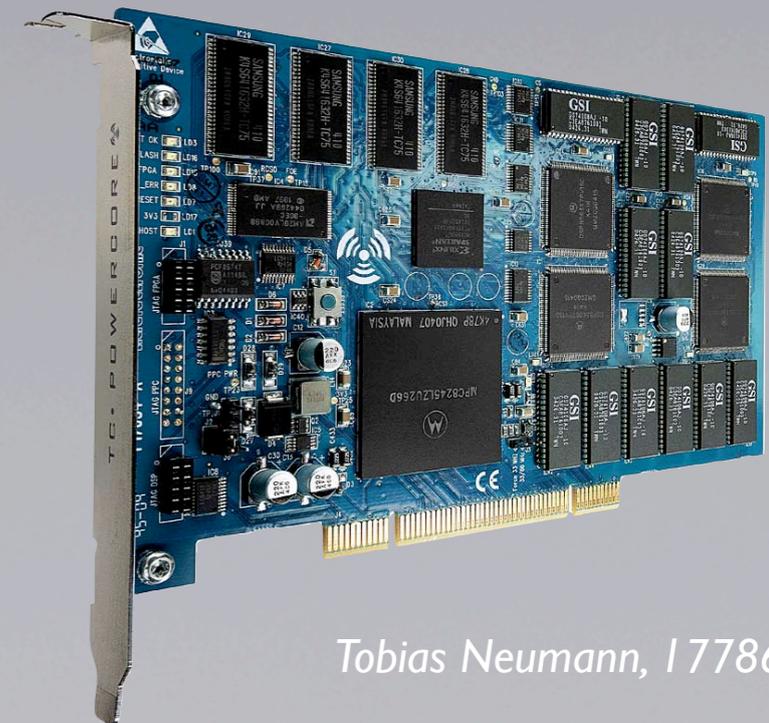
Nativ vs. DSP:

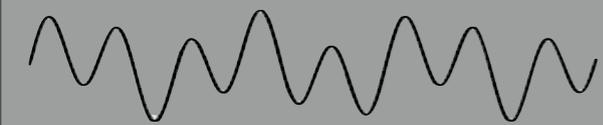
DSP: Effekte durch DSPs begrenzt

Zuverlässigkeit der DSP auf Native Systeme übertragen



TC PowerCore, Universal Audio UAD-1





Digital Audio Workstations

Nativ vs. DSP:

DSPs langsamer als CPU:

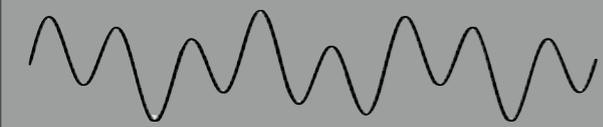
DSP: 100 MHz Bereich
CPU: GHz Bereich

Multitasking: Geschwindigkeit der CPU variiert

Wartezeit in Cycles → Nativ: bis 100 Cycles

DSP: immer 1 Cycle Antwortzeit

Auch durch MAC-Befehle & Spezialisierung auf Audio ⇒ DSP genauso,
wenn nicht sogar schneller



Digital Audio Workstations

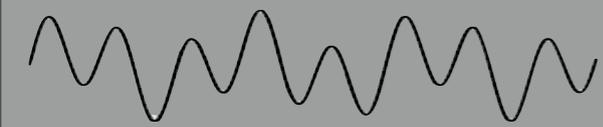
Nativ vs. DSP: Fix oder Float?

Theorie:

Floating-Point Zahl: Voller Dynamikumfang, unabhängig vom aktuellen Spitzenpegel

Fix-Point Zahl: Voller Dynamikumfang nur beim höchstmöglichen Pegel \longrightarrow 0dBFS

Unabhängig vom Aufnahmepegel bei Float-Systemen immer voller Dynamikumfang



Digital Audio Workstations

Nativ vs. DSP: Fix oder Float?

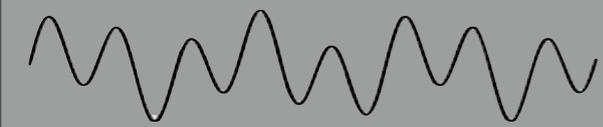
Praxis:

Multiplikation verursacht durch endliche Repräsentation der Zahlen
Rauschen (Rundungsfehler)

Fix-Point: Rauschen bleibt relativ unabhängig vom Eingangspegel auf
selbem Pegel (z.B. -106 dBFS)

Floating-Point: Rauschen bewegt sich dynamisch mit Signalpegel mit
→ bewegender Rauschteppich

Wird vom Ohr stärker wahrgenommen!



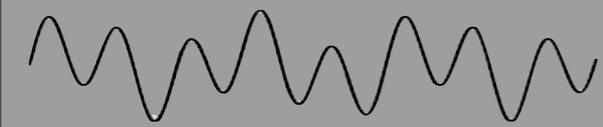
Digitale Summierung

Vorhergehende Probleme vergrößern sich durch Aufsummierung:

- Intermodulationsverzerrungen
- Klirrfaktor

Einflüsse auf die Summe:

- Faderstellung (Fix-Point- und Floating-Point-Systemen)
- Reihenfolge der Kanäle (Floating-Point-Systeme)



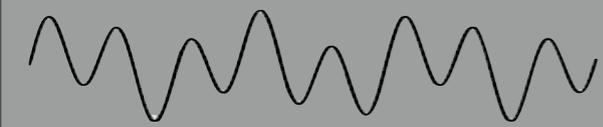
Digitale Summierung

Einfluss der Faderstellung auf die Auflösung in der Summe:

24 Bit Signal - 4 Bit Eigenrauschen (Preamps, Mics, Wandler) -
30 dB Pegelabsenkung (6dB = 1 Bit) = 15 Bit

—————> Wertebereich von 16,7 Mio. auf 32768 Werte gesunken
Genauigkeit um 2^9 verschlechtert
Größerer Klirrfaktor

Je leiser ein Signal in die Mischung gefahren wird, desto größer wird der
dadurch entstehende Klirrfaktor



Digitale Summierung

Verdopplung der Kanäle:

- Bei unterschiedlichen Signalen: + 3dB auf Summenbus
- Bei gleichen Signalen: + 6dB auf Summenbus

Bsp.: 64 Spur-Mixer:

64 Signale \Rightarrow + 18 dB Ausgangspegel = Übersteuerung!

Faderabsenkung um - 18dB \Rightarrow Nur noch 21 Bit Signale

Probleme summieren sich auf und werden dadurch deutlich hörbar



Digitale Summierung

Mögliche Lösung:

Pro Kanalverdopplung zusätzliches Bit benötigt:

- Gegen Detailverlust bei kleinen Pegeln & für genügend Headroom \longrightarrow 128 Kanäle = 7 Bits oberhalb 0dBFS

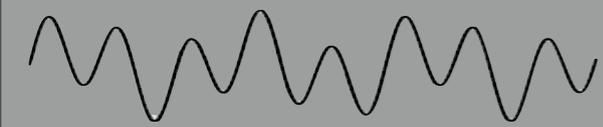
Zusätzliches Bit für Faderstellung über „0dB“

= 32 Bit

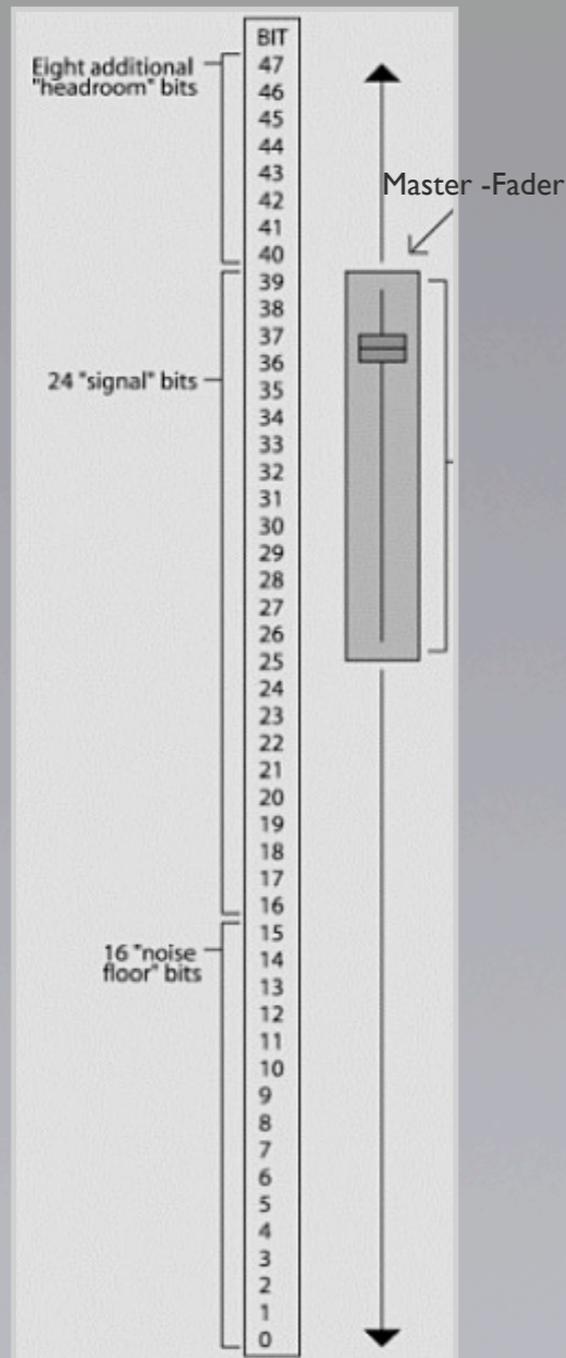
Fader auch nach unten verschiebbar (z.B. bis - 30dB):

- Erhalt der Low-Level-Information \longrightarrow 5 Bits

\Rightarrow 37 Bit



Digitale Summierung in Pro Tools

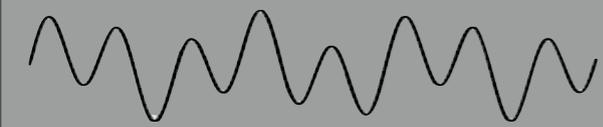


48-Bit Mix-Bus: Festkommaverarbeitung

Summierung von 128 Kanälen bei max. Gain ohne Übersteuerung

Master-Fader: Arbeitsbereich eines 24 Bit Ausgabegeräts anpassen

Obere 8 Bit: Aussteuerungsreserve
Mittlere 24 Bit: 144 dB Dynamikumfang
Untere 16 Bit: Verhindern Verlust von Audio-Daten bei Pegelabsenkung



Digitale Summierung

Beispiel für digitale Summierung im nativen System:

Spur 1: BassDrum

Spur 2: Bass

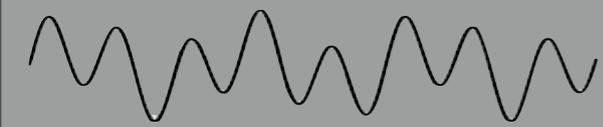
Spur 3: Synthie-Fläche Links

Spur 4: Synthie-Fläche Rechts

$$L = \text{Spur1} * 0,707 + \text{Spur2} * 0,707 + \text{Spur3}$$

$$R = \text{Spur1} * 0,707 + \text{Spur2} * 0,707 + \text{Spur4}$$

(0,707 = Abschwächung durch Panoramaregler um - 3dB)



Digitale Summierung

3 Summenbusse A, B & C

$$A: \text{Spur 1 (Pan)}: + 4,12 * 10^1 = + 41,2$$

$$B: \text{Spur 2 (Pan)}: - 4,13 * 10^1 = - 41,3$$

$$C: \text{Spur 3 (Pan)}: + 8,32 * 10^{-1} = + 0,832$$

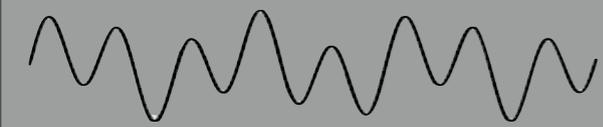
Fließkomma-Rechnung:

$$1.) (A+B) = - 0,1 = - 1,0 * 10^{-1}$$

$$+ C = 0,732 = \underline{7,32 * 10^{-1}}$$

$$2.) (B+C) = - 40,5 = - 4,05 * 10^1$$

$$+ A = 0,7 = \underline{7,00 * 10^0}$$



Digitale Summierung

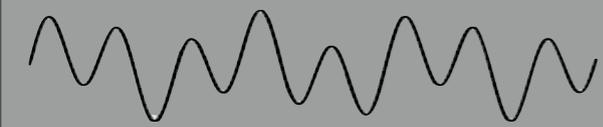
1.) $7,32 * 10^{-1}$

2.) $7,00 * 10^1$

Rundungsfehler \Rightarrow Reihenfolge entscheidend!

Unterschiedliche Ergebnisse bei anderer Kanalreihenfolge

Aber: Mit 32 Bit werden alle Signale in allen Lautstärken dargestellt!



Digitale Summierung

Vergleich zur Festkommadarstellung:

$$A = + 41,200$$

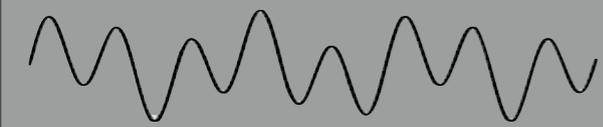
$$B = - 41,300$$

$$C = + 00,832$$

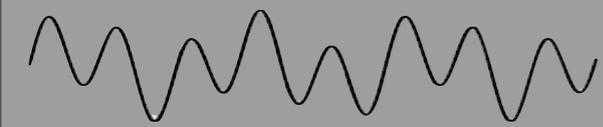
$$(A+B)+C = 00,732$$

$$A+(B+C) = 00,732$$

Hier: Größerer Wertebereich nötig \Rightarrow mehr Rechenleistung



Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit!



Quellen:

Print:

- Daniel Ch. von Grünigen: Digitale Signalverarbeitung, Fachbuchverlag Leipzig
- Bernhard Krieg: Digitale Audiotechnik, Franzis-Verlag
- Udo Zölzer: Digitale Audiosignalverarbeitung, Teubner Verlag
- Studio Magazin Special 2002: Digitale Audioworkstations
- Studio Magazin Spezial 2004: DAW Peripherie

Web:

- Digidesign White Paper: „Mischen in Pro Tools“
<http://www.tso.ch/mischen%20in%20protools.pdf>
- PC & Musik 04/2007: Digitale Summierung
http://www.synthax.de/media/4257/tsm-pc-musik_4-2007.pdf
- SAE Magazin 1/2006: Summing
http://www.sae-magazin.de/download/sae_magazin_1_2006.pdf
- Skript: Digitale Audiosignalverarbeitung, Universität Hamburg, Norman Hendrich
- www.wikipedia.de (Signalverarbeitung, DSP, DAW, Pro Tools Mixer)
- <http://www.jens-rudolph.de/proseminar/dsp.htm>
- <http://www.kgw.tu-berlin.de/Studio/ProTools/index.html>