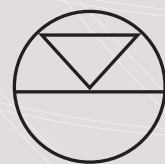


Digitale Audioaufzeichnung am Beispiel der CD und das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem

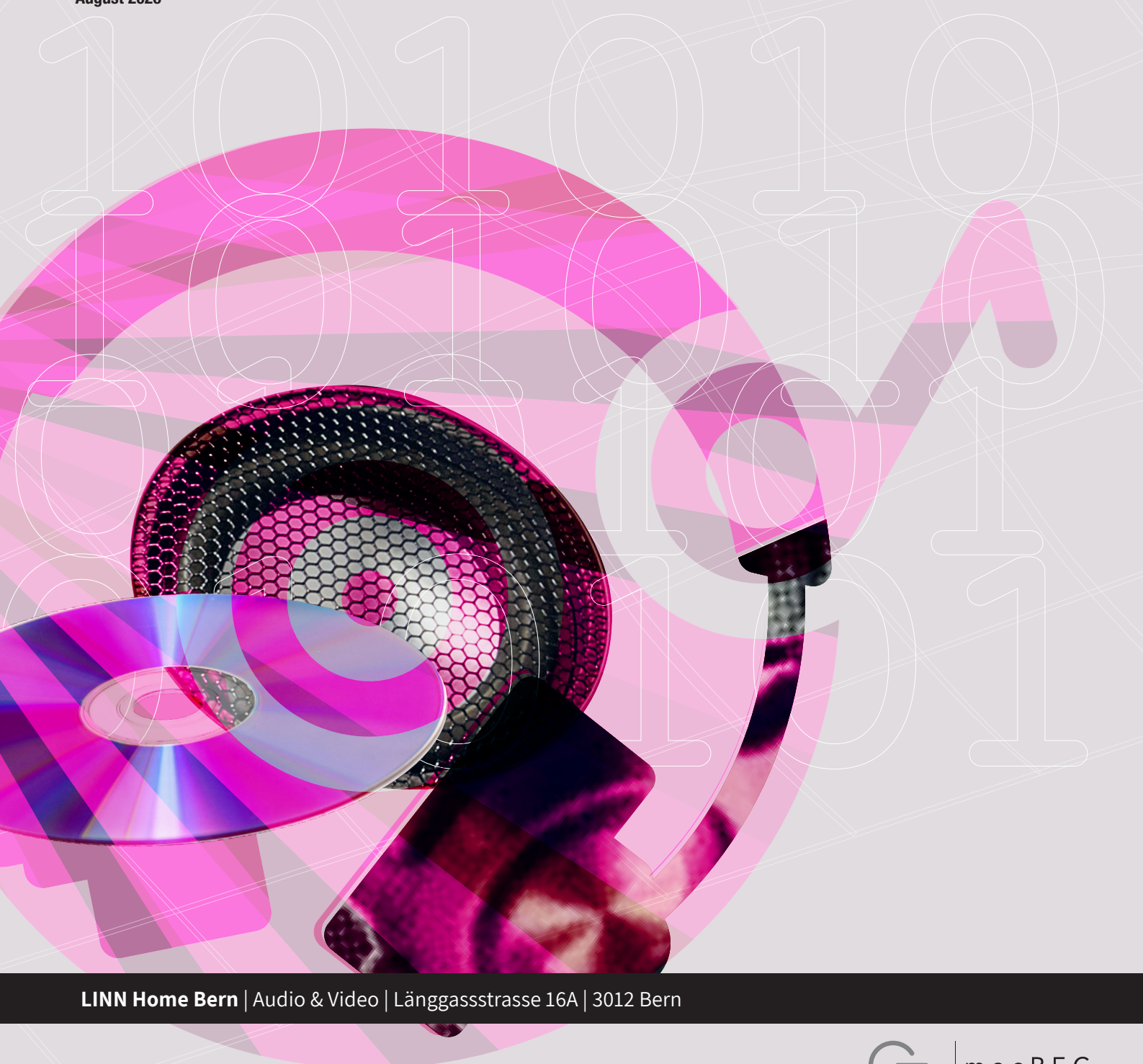


LINN

Emi Huber

Stephan Husen

August 2026



LINN Home Bern | Audio & Video | Länggassstrasse 16A | 3012 Bern



macREC
support & consulting



Digitale Audioaufzeichnung am Beispiel der CD und das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem



Fixe Abtastrate und äquidistante Abstände

Digitales Audio, wie es auf einer Audio-CD vorliegt, wird mit einer festen Abtastrate aufgezeichnet. Die CD verwendet 44,1 kHz, das heisst pro Sekunde liegen exakt 44'100 Abtastwerte vor, gleichmässig verteilt auf der Zeitachse. Der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Samples ist somit konstant und beträgt

$$T_s = \frac{1}{44\,100\text{ Hz}} \approx 22,68\text{ }\mu\text{s}$$

Diese Gleichmässigkeit ist keine Näherung, sondern Definition: ein Taktgeber hält diese Periodendauer ein, und weder Abstand noch Rate verändern sich in der Zeit. Neben dieser zeitlichen Abtastung wurde bei jedem Abtastschritt ein Wert für die entsprechende Amplitude abgespeichert.

Die konstante Abtastrate ist die Voraussetzung für das klassische Abtasttheorem. Der Fall nicht-äquidistanter Abtastung (non-uniform sampling) ist zwar theoretisch behandelbar, wird bei der CD jedoch nicht angewendet.

Das Abtasttheorem und die *sinc*-Rekonstruktion

Das theoretische Fundament für die digitale Audioaufzeichnung liefert das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem. Es besagt, dass ein analoges Signal aus seinen Abtastwerten exakt rekonstruierbar ist, wenn es bandbegrenzt ist – es also keine Frequenzanteile oberhalb einer Grenzfrequenz $f_{\max}$ enthält – und die Abtastfrequenz f_s die Bedingung

$$f_s > 2 f_{\max}$$

erfüllt. Die Bedingung ist als strikte Ungleichung zu lesen: bei exakt $f_s = 2 f_{\max}$ ist die Rekonstruktion im Allgemeinen nicht mehr eindeutig – ein Sinus genau bei $f_{\max}$ könnte in seinen Nulldurchgängen abgetastet werden und ginge verloren^[4]. Bei der CD liegt $f_{\max}$ bei etwa 20 kHz (der oberen Hörgrenze des menschlichen Gehörs), womit $f_s = 44,1\text{ kHz} > 2 \times 20\text{ kHz}$ die Bedingung erfüllt. Ist $f_s < 2 f_{\max}$ entsteht **Aliasing**, bei dem höhere Frequenzen als niedrigere «gespiegelt» werden und das Originalsignal nicht mehr eindeutig aus den Abtastwerten zurückgewonnen werden kann.

Ist die obige Bedingung hingegen erfüllt, so kann das ursprüngliche analoge Signal zum Zeitpunkt t mit der folgenden Formel rekonstruiert werden:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x[n] \cdot \text{sinc}\left(\frac{t - n T_s}{T_s}\right)$$

wobei

$$\text{sinc}(u) = \frac{\sin(\pi u)}{\pi u}$$

und $x[n]$ der n -te Abtastwert ist.



Digitale Audioaufzeichnung am Beispiel der CD und das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem



Jeder Abtastwert wird hierbei mit einer *sinc*-Funktion gewichtet, die über die gesamte Zeitachse ausgedehnt ist und nur mit $1/t$ abklingt. Die *sinc*-Funktion hat die Eigenschaft, an allen anderen Abtaststellen jeweils null zu sein – deshalb stimmt die Rekonstruktion an den Abtastpunkten exakt mit den Originalwerten überein, und dazwischen wird das Signal korrekt interpoliert.

Die zwei Idealannahmen: Bandbegrenzung und unendliche Summe

Die beiden obigen Formeln gelten nur unter den zwei folgenden Annahmen:

- 1. Bandbegrenzung (minimale Dichte).** Das Signal darf keine Frequenzanteile über f_{max} enthalten, und die Abtastrate muss mindestens das Doppelte davon betragen. Diese Bedingung sichert die eindeutige Rekonstruierbarkeit und verhindert Aliasing. Sie entspricht einer minimalen Abtastdichte, ohne die das Verfahren prinzipiell versagt.
- 2. Unendlich viele Abtastwerte.** Die Summe in der 3. Formel bei der Rekonstruktion läuft von $n = -\infty$ bis $+\infty$. Das bedeutet: jeder Abtastwert – auch weit in der Vergangenheit oder in der Zukunft liegende – trägt zu jedem Zeitpunkt t der Rekonstruktion bei, wenn auch mit immer kleiner werdendem Gewicht. Erst mit unendlich vielen Werten in beide Richtungen der Zeitachse ergibt sich das Original exakt.

Transienten und das Bandbegrenzungs-Paradoxon

Bisher wurde stillschweigend angenommen, das abzutastende Signal sei bandbegrenzt – es enthalte keine Frequenzanteile oberhalb von f_{max} . Genau hier betritt ein Signalmerkmal die Bühne, das diese Annahme auf eine harte Probe stellt:

Transienten. Darunter versteht man kurze, steile, impulsartige Ereignisse – der Anschlag eines Schlagzeugs, der Knall eines Pops am Mikrofon, der Zungenschlag einer Bläsernote. Ein Transient ist durch einen sehr schnellen, nahezu sprunghaften Anstieg der Amplitude gekennzeichnet.

Gerade solche steilen Flanken sind es, die das Abtasttheorem vor ein konzeptionelles Problem stellen. Der Grund ist ein mathematischer Sachverhalt, der als **Paley-Wiener-Theorem** bekannt ist und in einer Form besagt: Ein Signal kann nicht gleichzeitig zeitbegrenzt und bandbegrenzt sein. Ein zeitlich endliches Signal – eines, das ausserhalb eines endlichen Zeitintervalls exakt null ist – hat zwingend ein unbegrenztes Spektrum, und umgekehrt hat ein streng bandbegrenzt Signal unendliche Ausdehnung in der Zeit.

Ein idealer Transient – ein unendlich steiler Sprung, ein Dirac-Impuls – hat ein unendlich breites Spektrum; eine endliche Bandbreite genügt ihm nicht. Umgekehrt ist ein streng bandbegrenzt Signal in der Zeit unendlich ausgedehnt und kann keinen plötzlichen Sprung enthalten. Ein reales, endliches Audiosignal ist daher niemals streng bandbegrenzt – die Annahme des Abtasttheorems ist eine Idealisierung, die für echte Musik nur näherungsweise gilt.

Antialiasing-Filter als Kompromiss

Die Konsequenz ist, dass das Signal vor der Abtastung künstlich bandbegrenzt werden muss – durch ein analoges Anti-aliasing-Filter, das alle Anteile oberhalb der halben Abtastrate unterdrückt. In der CD-Ära war dies ein anspruchsvolles analoges Tiefpassfilter mit steiler Flanke, das hörbare Nebenwirkungen (Phasendrehungen, leichtes Einbrechen im oberen Frequenzbereich) haben konnte. Spätere Verfahren wie Oversampling mit digitalen Vorfiltern entlasteten das analoge Filter, beseitigten aber nicht das Grundproblem: dass steile Transienten nicht vollständig durch ein endliches Band hindurchpassen. Der Transient wird vom Filter abgerundet, leicht in der Zeit verschmiert – der Preis dafür, dass das verbleibende Signal die Nyquist-Bedingung erfüllt.



Digitale Audioaufzeichnung am Beispiel der CD und das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem



Ringings: das Zeitdenkmal der Bandbegrenzung

Sobald ein Transient durch ein bandbegrenzendes System – sei es das Antialiasing-Filter bei der Aufnahme oder das Rekonstruktionsfilter im DAC – geschickt wird, entsteht ein charakteristisches Artefakt: **Ringings** (Gibbs-Phänomen). Die Bandbegrenzung zwingt dem Signal eine endliche Anstiegszeit auf, und das System reagiert auf den schnellen Sprung mit einem Einschwingen – einer oszillierenden Welle vor und/oder nach dem Transienten.

Dieses Ringing ist nicht zufällig, sondern die direkte Zeitdomain-Antwort auf die Frequenzbereich-Begrenzung. Die *sinc*-Funktion selbst, die im Idealfall das Original rekonstruiert, ist die Impulsantwort des idealen Tiefpasses – sie klingt mit $1/t$ ab und oszilliert zu beiden Seiten des Impulses. Genau das ist die mathematische Form des Ringings. Es ist nicht ein «Fehler» der Rekonstruktion, sondern die legitime Konsequenz einer Bandbegrenzung: wer das Spektrum abschneidet, bezahlt in der Zeitform mit Oszillationen.

Linear-Phase vs. Minimum-Phase: wo wird das Ringing platziert?

Reale DACs approximieren die unendliche *sinc*-Summe durch endliche Filter (FIR-Filter), und der Entwickler muss entscheiden, wo das unvermeidliche Ringing platziert wird. Drei verbreitete Strategien (Filtertypen) zeigen den Kompromiss:

Filtertyp	Pre-Ringing	Post-Ringing	Phasenverhalten	Charakteristik
Linear-Phase (symmetrisch)	ja	ja	linear, harmonisch erhalten	flache Frequenzantwort, aber Anschlag wird in der Zeit verschmiert
Minimum-Phase (kausal)	nein	ja (verstärkt)	Phasendrehung, frequenzabhängige Verzögerung	scharfer Anschlag, aber harmonische Struktur verschoben
Apodizing / lange Filter	reduziert	reduziert	variabel	bessere Frequenzselektivität, aber jedes Sample hängt an mehr Nachbarn – Zeitgrenzen verschwimmen

Linear-Phase-Filter verteilen das Ringing symmetrisch vor und nach dem Transienten. Die Phasenbeziehung der harmonischen Schwingung bleibt mathematisch korrekt, aber Energie erscheint vor dem Ereignis – ein physikalisch unmöglicher «Vorklang», der den Anschlag subtil weichzeichnet.

Minimum-Phase-Filter beseitigen das Pre-Ringing vollständig, verschieben aber alle Energie hinter den Transienten. Das klingt intuitiv richtig (nichts kommt vor dem Ereignis), aber der Preis ist eine frequenzabhängige Gruppenlaufzeit: hohe und tiefere Harmonische kommen leicht zeitlich versetzt an, was die innere Struktur des Klangs verändert.

Längere Filter mit mehr Tap-Anzahl verbessern die Frequenzselektion, berücksichtigen aber dafür ein grösseres Fenster von Samples – jedes rekonstruierte Sample hängt an mehr Nachbarn in der Zeit. Das verschärft paradoxerweise das Verschmieren: Der Beginn einer Note trägt eine Spur des Vorherigen, das Ende geht in das Folgende über.



Digitale Audioaufzeichnung am Beispiel der CD und das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem



Höhere Auflösung: was mehr Hertz und mehr Bits bringen

Musik in CD-Qualität verwendet eine Abtastfrequenz von 44,1 kHz und eine Auflösung von 16 Bit für die Amplitude. Damit stehen für die Amplitude 2^{16} Quantisierungsstufen (rund $\pm 32'768$) zur Verfügung. Hi-Res-Audio hebt beide Werte an: gängige Formate sind 24 Bit/96 kHz oder 24 Bit/192 kHz.

Nach den Vorgaben von Audio Engineering Society, Consumer Technology Association und Japan Audio Society gilt 24 Bit/96 kHz als Minimum für den Hi-Res-Standard; die Spezifikation geht auf eine JEITA-Definition von 2014 zurück, und das «Hi-Res AUDIO»-Logo wird von der Japan Audio Society vergeben^[3]. Viele aktuelle DAC-Bausteine verarbeiten intern noch höhere Raten wie 384 kHz oder 768 kHz.

Dass höhere Abtastraten hörbar höher auflösende Frequenzen wiedergeben, ist im strengen Sinne nicht der entscheidende Punkt – das menschliche Gehör hört bis etwa 20 kHz, und das ist bei 44,1 kHz bereits abgedeckt. Der eigentliche Vorteil liegt vielmehr in der Entlastung der Filter:

Höhere Abtastrate → höhere Nyquist-Frequenz → sanftere Filterflanken.

Bei 44,1 kHz muss das Antialiasing-Filter zwischen 20 kHz und 22,05 kHz extrem steil abschneiden – das ist ein schmaler Übergangsbereich, der steile Filter mit allen beschriebenen Nebenwirkungen erzwingt (Phasendrehungen, Ringing). Bei 96 kHz liegt die Nyquist-Frequenz bei 48 kHz, bei 192 kHz bei 96 kHz. Das Filter kann nun einen viel breiteren Übergangsbereich nutzen und sanfter abfallen^[2]. Das reduziert Phasenverzerrungen im hörbaren Bereich und schwächt das Ringing ab, was zu einer präziseren Transientenwiedergabe führt. Die daraus resultierende sauberere Phasen- und Impulswiedergabe im Hochtonbereich wird von vielen Hörern als mehr «Luft» und Offenheit beschrieben – unabhängig davon, ob der eigentliche Ultraschallinhalt hörbar ist.

Zusammengefasst: der Nutzen höherer Abtastraten liegt weniger in der Erfassung höherer Frequenzen als vielmehr in einer besseren Approximation der Bandbegrenzungsbedingung – mit weniger aggressiven Filtern, weniger Ringing und besserer Transientenintegrität im hörbaren Bereich.

Mehr Bits → grössere Dynamikauflösung. 16 Bit bieten eine theoretische Dynamik von etwa 96 dB (als maximales Signal-Rausch-Verhältnis gerechnet rund 98 dB); 24 Bit erreichen etwa 144 dB (bzw. 146 dB)^[1]. Der praktische Nutzen ist nicht, dass man 144 dB tatsächlich ausnutzt – kein Lautsprecher und kein Raum vertragen das – sondern dass die Quantisierungsstufen so fein werden, dass das Quantisierungsrauschen weit unterhalb des analogen Grundrauschens der Elektronik liegt. Bei 24 Bit ist das Rauschen des Wandlers selbst immer lauter als das theoretische digitale Rauschen, weshalb auf Dithering verzichtet werden kann^[1]. Das bedeutet: in der praktischen Abhörpraxis ist der Dynamikgewinn von 24 Bit meist nicht als solcher hörbar, aber die Bearbeitungs- und Verarbeitungsreserven in der Studioproduktion sind deutlich grösser – Rundungsfehler bei DSP-Operationen fallen weniger ins Gewicht.

Parameter	CD (16/44,1)	Hi-Res (24/96 oder 24/192)	Effekt
Abtastrate	44,1 kHz	96–192 kHz +	Nyquist-Frequenz steigt, Filterflanken werden sanfter → weniger Phasendrehung, weniger Ringing, bessere Transienten ^[2]
Wortbreite	16 Bit	24 Bit	Dynamikreserve von ~96 dB auf ~144 dB; Quantisierungsrauschen verschwindet im analogen Grundrauschen ^[1]
Filteraufwand	Steile analoge / digitale Filter nötig	Sanftere Filter möglich, mehr Spielraum im Übergangsbereich ^[2]	



Digitale Audioaufzeichnung am Beispiel der CD und das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem



Warum ein DAC mit mehr Rechenleistung und intelligenteren Filtern besser klingen kann

Die Diskussion der letzten Abschnitte macht deutlich, dass der Digital-Analog-Wandler nicht bloss ein «Übersetzer» ist, sondern eine aktive Rekonstruktionsmaschine, deren Qualität massgeblich davon abhängt, wie gut sie die unendliche *sinc*-Summe approximiert. Genau hier setzen DACs mit mehr Rechenleistung und ausgefeilteren Filtern an.

1. Mehr Taps = bessere *sinc*-Approximation. Ein FIR-Filter besteht aus einer Kette von Multiplizierern («Taps»), die jeweils mit einem Abtastwert multiplizieren und die Ergebnisse aufsummieren. Die Anzahl der Taps bestimmt, wie viele Nachbarsamples in die Rekonstruktion eines Ausgangswerts eingehen – und damit, wie gut die unendliche *sinc*-Summe angenähert wird. Herkömmliche Oversampling-DACs nutzen Filter mit einigen hundert Taps. Ein Filter mit mehr Taps hat eine schmalere, präzisere Frequenzselektion und ein Ringing, das der idealen *sinc*-Form näher kommt – der Trade-off ist, dass mehr Taps auch mehr Samples in die Rechnung einbeziehen und eine längere Latenz erzeugen.

2. FPGAs statt fest verdrahteter DAC-Chips. Herkömmliche DAC-Chips haben fest eingebaute Filter, deren Eigenschaften vom Chip-Hersteller vorgegeben sind. Ein FPGA (Field-Programmable Gate Array) ist hingegen ein frei programmierbarer Logikbaustein, auf dem der DAC-Entwickler eigene DSP-Algorithmen und Filterstrukturen implementieren kann. Das eröffnet Freiheiten, die feste Chips nicht bieten: mehrstufige Oversampling-Kaskaden, nicht-standardisierte Fensterfunktionen, angepasste *sinc*-Varianten, die das Ringing gezielt minimieren.

Das prominenteste Beispiel ist Chord Electronics, dessen Entwickler Rob Watts auf FPGAs eigene «WTA»-Filter (Watts Transient Aligned) implementiert, die speziell auf die Transientenrekonstruktion optimiert sind. Die Filterlänge hat sich dabei über die Generationen massiv gesteigert: während der DAC64 noch 1024 Taps nutzte, verfügt der Hugo TT über 26'368 Taps und der DAVE über 164'000 Taps – verteilt auf 166 parallel arbeitende DSP-Kerne eines Xilinx-FPGA^[5]. Der M-Scaler schliesslich erreicht 1'015'808 Taps – daher das «M» für Million^[6]. Die Philosophie dahinter: je länger das Filter, desto näher kommt man der unendlichen *sinc*-Summe des Idealmodells – desto besser also die Rekonstruktion von Transienten und feinen Strukturen, die bei kurzen Filtern verschmiert werden.

3. Mehrstufiges Oversampling. Ein fortgeschrittener DAC führt das Oversampling nicht in einem Schritt durch, sondern kaskadiert mehrere Filterstufen. Chords DAVE etwa erhöht die Abtastrate zunächst achtfach, dann auf das 16-fache, danach mit einer linearen Interpolation auf das 2.048-fache der Originalrate, gefolgt von zwei weiteren Tiefpassfiltern^[5]. Das M-Scaler-Konzept geht noch weiter und erhöht die Abtastfrequenz auf 705.6 kHz, bevor die Daten überhaupt den DAC erreichen^[6]. Wichtig ist dabei die präzise Lesart: Es werden keine bei der Aufnahme «verlorenen» Informationen zurückgezaubert – das Abtasttheorem garantiert ja gerade, dass die vollständige Information bereits in den 44,1-kHz-Samples steckt. Zurückgewonnen wird vielmehr das, was sonst erst bei der Wiedergabe verloren ginge: die Zwischenwerte, die nur eine (nahezu) vollständige *sinc*-Summe korrekt rekonstruieren kann. Der M-Scaler erledigt diese massive Rechenarbeit vorab und liefert dem DAC ein Signal, dessen Rekonstruktion bereits weitgehend vollzogen ist. Technisch gesprochen verschiebt das zudem die Filterflanken weit nach oben, wodurch die Nyquist-Bedingung mit sehr sanften, fast idealen Filtern erfüllt wird.

4. Warum sich der Rechenaufwand lohnt. Das Abtasttheorem gibt der Scaler-Technologie ihr Fundament: Ist die Bandbegrenzung eingehalten, ist das Originalsignal aus den Abtastwerten theoretisch zu 100 % rekonstruierbar – sämtliche Information liegt vollständig im Datenstrom vor. Was die Theorie dafür verlangt, ist die unendliche *sinc*-Summe, also unbegrenzte Rechenzeit über unbegrenzt viele Samples. Normale DACs kürzen diese Summe radikal ab, und genau an dieser Stelle – nicht bei der Aufnahme – geht Information tatsächlich verloren: Der Fehler eines Filters mit wenigen hundert Taps ist ein echter, berechenbarer Rekonstruktionsfehler. Ein Scaler oder Streamer, der die *sinc*-Summe mit hunderttausenden bis über einer Million Taps auswertet, verkleinert diesen Fehler um Grössenordnungen und kommt dem mathematischen Ideal so nahe, wie es endliche Hardware erlaubt. Mehr Taps bedeuten dabei nachweislich einen kleineren Abstand zum Original – die Richtung des Arguments ist mathematisch eindeutig, debattiert wird lediglich, ab welcher Filterlänge der Restfehler unter die Hörschwelle fällt. Deshalb kann eine sorgfältig ausgelegte Kette aus Scaler und DAC ein objektiv originalgetreueres Resultat liefern als eine Standardrekonstruktion im DAC-Chip.



Digitale Audioaufzeichnung am Beispiel der CD und das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem



DAC-Merkmal	Standard-DAC-Chip	FPGA-basierter DAC mit langen Filtern
Filterlänge	Wenige hundert Taps (fest)	Tausende bis über eine Million Taps (programmierbar) ^[5] ^[6]
Filterdesign	Vom Chip-Hersteller vorgegeben	Vom DAC-Entwickler frei wählbar
<i>sinc</i> -Approximation	Grob	Fein, nähert sich der unendlichen Idealform an
Oversampling	Einfach, einstufig	Mehrstufig kaskadiert (z. B. $8 \times \rightarrow 16 \times \rightarrow 2048 \times$) ^[5]
Transientenrekonstruktion	Mit sichtbarem Ringing	Mit reduziertem, gezielt platziertem Ringing
Latenz	Gering	Höher (längere Filter = mehr Samples in der Pipeline)
Flexibilität	Fest	Update- und konfigurierbar

Was man daraus lernt

Transienten machen sichtbar, dass die Bandbegrenzungsannahme des Abtasttheorems nicht bloss eine akademische Idealisierung ist, sondern einen inhärenten Kompromiss darstellt: Frequenzbereichsgenauigkeit und Zeitbereichsgenauigkeit sind nicht gleichzeitig maximal zu haben. Eine scharfe, abrupte Attack – das physikalisch spannendste Merkmal vieler Instrumente – existiert im streng bandbegrenzten Modell nur als Näherung. Das bedeutet nicht, dass digitales Audio «schlecht» wäre; es bedeutet, dass der Konstrukteur eines digitalen Audiosystems andauernd zwischen spektraler Präzision und zeitlicher Genauigkeit abwägen muss – und dass genau dieses Abwägen den Klangcharakter verschiedener DACs und Filter mitprägt. Höhere Abtastraten entspannen diesen Kompromiss, indem sie den Filtern mehr Spielraum geben; intelligenter DAC-Filter mit mehr Rechenleistung nähern die ideale *sinc*-Rekonstruktion besser an. Beides sind keine Wundermittel, aber sie erklären, warum ein sorgfältig designer DAC mit guten Filtern mess- und hörbar anders klingen kann als ein simpler Standard-Chip.

Die Praxis: Approximation statt Idealfall

In einer realen Digital-Analog-Wandler-Schaltung (DAC) kann die unendliche Summe nicht umgesetzt werden – es lässt sich weder unendlich lange warten noch unendlich viel speichern. Daher wird die *sinc*-Funktion abgeschnitten (Truncation): Es werden nur eine endliche Anzahl benachbarter Abtastwerte berücksichtigt, und die *sinc*-Funktion wird durch ein endliches Filter approximiert, typischerweise ein FIR-Filter mit begrenzter Länge. Auch die Bandbegrenzung des Eingangssignals ist in der Praxis nie perfekt; sie wird durch analoge Antialiasing-Filter vor der Abtastung angenähert.



Digitale Audioaufzeichnung am Beispiel der CD und das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem



Diese Approximationen – endliches Filter statt unendlicher Summe, realer statt idealer Tiefpass vor der Abtastung – sind der Preis, den reale Hardware gegenüber dem mathematischen Idealmodell zahlt. Das Theorem verspricht eine perfekte Rekonstruktion nur unter genau jenen beiden Bedingungen, die in der Praxis nie vollständig erfüllt sind: exakte Bandbegrenzung und unendlich viele Abtastwerte. Transienten zeigen ausserdem, dass schon die erste Bedingung in der Natur nicht strikt erfüllbar ist, und dass die praktische Annäherung an sie in der Zeitdomain sichtbare Konsequenzen hat. Die Qualität eines digitalen Audiosystems misst sich letztlich daran, wie gut es diese unvermeidbaren Approximationen durchführt – und hier liegt der Spielraum, in dem sich Hi-Res-Formate, Oversampling und intelligente DAC-Filter von der CD-Standardrekonstruktion abheben.

Zusammenfassung

Aspekt	Theorie	Praxis (CD / DAC)	Verbesserungspotential (Hi-Res / FPGA-DAC)
Abtastrate	Fix, äquidistant	44'100 Hz, konstant	96–192 kHz + → sanftere Filter, weniger Ringing ^[2]
Wortbreite	Beliebig (ideal)	16 Bit (~96 dB Dynamik)	24 Bit (~144 dB), Rauschen im analogen Grundrauschen ^[1]
Bandbegrenzung	Exakt erforderlich	Approximiert durch steiles Antialiasing-Filter	Bei höherer Rate mit sanfterem Filter erfüllbar ^[2]
Abtastbedingung	$f_s > 2 f_{max}$	44,1 kHz > 2×20 kHz	Wird mit grösserem Sicherheitsabstand erfüllt
Rekonstruktionssumme	$n = -\infty$ bis $+\infty$	Endlich, FIR-Filter mit begrenzter Länge	FPGA-DACs mit tausenden bis über einer Million Taps nähern sich der Idealform an ^{[5] [6]}
Rekonstruktion	Exakt	Approximiert (Truncation, endliche Filterlänge)	Bessere Approximation durch längere, programmierbare Filter
Transienten	Streng bandbegrenztes Signal kann keine enthalten	Werden bandbegrenzt dargestellt – mit Ringing als Konsequenz	Höhere Rate + sanftere/längere Filter → weniger Ringing, schärferer Anschlag
Filterphilosophie	<i>sinc</i> (ideal, unendlich)	Linear-Phase, Minimum-Phase oder Apodizing – fest im Chip	Frei programmierbare, mehrstufige Filter (FPGA), auf Transienten optimiert ^[5]
Oversampling	Nicht Teil des Theorems	Einfach, einstufig	Mehrstufig kaskadiert, bis zu $2048 \times$ und mehr ^[5]



Digitale Audioaufzeichnung am Beispiel der CD und das Nyquist-Shannon- Abtasttheorem



Referenzen

- [1] Audio bit depth – Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Audio_bit_depth
- [2] Oversampling – Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Oversampling
- [3] High-resolution audio – Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/High-resolution_audio
- [4] Nyquist–Shannon sampling theorem – Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Nyquist–Shannon_sampling_theorem
- [5] Chord Electronics DAVE D/A processor (Test) – Stereophile,
www.stereophile.com/content/chord-electronics-dave-da-processor
- [6] Hugo M Scaler – Chord Electronics (Produktseite), chordelectronics.co.uk/product/hugo-mscaler

Aussagen ohne Quellenverweis geben allgemeines signaltheoretisches Grundlagenwissen bzw. die Einschätzung der Autoren wieder.