



Digitalisierung und Delta-Sigma-Technik

Delta-Sigma-Wandler, auch Bitstream-Wandler genannt, werden in der Audiowelt heute nahezu ausschließlich verwendet, sind sie doch bei überzeugenden klanglichen Qualitäten auch noch preiswert herzustellen. Hohe Abtastraten bei gleichzeitig hoher Quantisierung sind preislich nur mit Bitstreamwandlern realisierbar. Im folgenden werden die Grundlagen der Digitalisierung und die daraus folgende Technik der Delta-Sigma-Wandlung erläutert.

Grundlagen

Vor jeder digitalen Signalverarbeitung steht die Digitalisierung der analogen Signale selbst. Analoge Signale sind zeit- und wertkontinuierlich, haben also sowohl in ihrem zeitlichen Verlauf und in ihrem Amplitudenverlauf keine „Lücke“. Um ein solches Signal in eine binäre Zahlenfolge umzuwandeln (Digitalisierung), müssen dem Signal zunächst periodisch „Proben“ entnommen werden, es wird abgetastet. Dies geschieht prinzipiell durch die Faltung des Signals mit einer periodischen Folge von Dirac-Impulsen (Puls Code Modulation - PCM). Das Signal ist damit zeitdiskret, d.h. es ist nur zu bestimmten Zeitpunkten, die der Abtastperiode entsprechen, definiert (siehe Bild 1). Die Wiederholfrequenz der Impulse nennt man auch Abtast- oder Samplingfrequenz. Sie muß dabei mindestens den doppelte Betrag der Bandbreite des abzutastenden Signals haben (Shannon'sches Abtasttheorem). Wird gegen dieses Abtasttheorem verstoßen, werden die „Proben“ falsch interpretiert: sind bspw. die Frequenz des abzutastenden Signals und die Samplingfrequenz gleich, haben alle Abtastwerte den gleichen Wert und werden so als Stützstellen einer Gleichspannung angesehen. Ist die Abtastfrequenz kleiner als die doppelte Signalfrequenz, entsprechen die Abtastwerte einer anderen, kleineren Frequenz als die des ursprünglichen Signals, es entsteht Aliasing. Daher wird jedes Analogsignal vor der Digitalisierung auf die maximal zulässige Bandbreite (Nyquistfrequenz) durch einen Tiefpaß (Antialiasfilter) begrenzt.

Entsprechend muß für die binäre Zahlendarstellung mit der Amplitude des Signals Verfahren werden, auch hier wird aus dem wertkontinuierlichen Signal ein wertdiskretes, so daß die Amplitude nur noch ganz bestimmte Werte annehmen kann (Quantisierung). Der Amplitudenbereich wird dazu in Stufen aufgeteilt (siehe Bild 1). bei 16 binären Stellen (16 bit) bit entspricht die Auflösung $2^{16} = 65536$ Stufen, bei 24 bit hat man bereits $2^{24} = 16777216$ Stufen. Damit ist die maximalen Genauigkeit der Quantisierung gegeben: alle Amplitudenwerte des Analogsignals, die zwischen diese Quantisierungsstufen fallen, werden an die nächstmögliche Stufe angenähert, es entsteht also ein Fehler. Dieser sogenannte Quantisierungsfehler ist aber nur maximal so groß wie die Hälfte einer Quantisierungsstufe, da eine weiterreichende Abweichung von einer Quantisierungsstufe bereits durch die nächste angenähert wird. In dem Fall, daß die Amplitude des Eingangssignals groß gegenüber dem Quantisierungsfehler ist, also deutlich oberhalb von einem bit liegt, macht sich der Fehler als über dem Frequenzbereich gleichmäßig verteiltes Rauschen bemerkbar (Quantisierungsrauschen). D.h., der Rauschspannungsabstand eines Analog/Digital-Wandlers und damit die maximale Dynamik korrespondiert mit der Quantisierung. Pro bit verbessert sich die nutzbare Dynamik um die doppelte Amplitude, also um 6 dB. Ein 16bit Wandler hat somit eine theoretische Dynamik von 96 dB.

Bei kleinen Eingangsamplituden im Bereich des ersten bits (LSB) wird jedoch aus dem Nutzsignal eine Rechteckfolge. Diese hat ein diskretes harmonisches Obertonspektrum und es kommt so zu tonalen Artefakten (granulation noise). Um das zu vermeiden, wird das Nutzsignal absichtlich mit einem Rauschsignal überlagert, dem sog. Dither. Dieses Dithersignal ist in der Regel eine digital erzeugte Pseudozufallsfolge mit statistischer Spektralverteilung und



hat in etwa den Pegel einer Quantisierungsstufe. Dadurch werden tonale Artefakte maskiert. Neuerdings wird auch Dither verwendet, bei dem die spektrale Wahrscheinlichkeitsdichte dreieckig verteilt ist, was häufig die besten Ergebnisse bringt. Prinzipiell verschlechtert sich der Rauschabstand durch das Dithering um ca. 1 bit, so daß ein 16bit-Wandler theoretisch nur noch 90 dB Dynamik erreicht. Psychoakustisch gesehen ist dies jedoch eine Verbesserung.

Überabtastung

Der A/D-Wandler mit dem einfachsten Prinzip ist der Einschritt-Flash- bzw. Parallelwandler: er besteht eingangsseitig aus Komparatoren, deren Anzahl der Zahl der Quantisierungsstufen korrespondiert. Diese Komparatoren wechseln zum Zeitpunkt einer Abtastperiode bei Durchschreitung des jeweils eingestellten Vergleichwertes von „0“ auf „1“. Durch nachgeschaltete Logikschaltungen wird ein Ausgangswort mit einer entsprechenden Anzahl von Bitstellen gebildet. Das Problem der Einschritt-Flash-Wandler ist jedoch offensichtlich: für 16 bit benötigt man 65535 Komparatoren nebst Zusatzbeschaltungen, bei 24 bit bereits 16777215 Komparatoren (zum Vergleich: ein Pentium MMX-Prozessor verfügt „lediglich“ über 4000000 Transistoren). Daher kommen Flash-Wandler in der Audiotechnik nicht zu Einsatz. In der Vergangenheit sind hier verschiedene andere Verfahren entwickelt worden, z.B. serielle Slope-Wandler oder der Wägewandler, der sich schrittweise an das Analogsignal „annähert“. Das weitverbreitetste Verfahren, mit dem auch problemlos und preiswert hohe Quantisierungen wie z.B. 24 bit möglich sind, ist jedoch die Delta-Sigma-Wandlung.

Betrachten wir noch einmal das Quantisierungsrauschen. Dieses verteilt sich wie gesagt über den gesamten Frequenzbereich bis zur Nyquistfrequenz. Verdoppelt man nun die Abtastfrequenz, so verteilt sich dieses Quantisierungsrauschen auf ein doppelt so breites Spektrum (siehe Bild 2)! Filtert man nun mit einem digitalen Tiefpaß die Anteile oberhalb der ursprünglich benötigten Abtastfrequenz (Abtasttheorem) heraus, und wird die Abtastrate halbiert (downsampling), hat man den Rauschspannungsabstand um 6 dB gegenüber der einfachen Abtastung verbessert. Auch hier erkennt man wieder: bei der Digitalisierung spielen Abtastrate und Quantisierung immer gemeinsam Hand in Hand, was z.B. ein großes Problem bei Hörtests mit unterschiedlichen Abtastraten oder Quantisierungsstufen darstellt. Man denke z.B. an die 24bit/96kHz Diskussion. Oft wird 96 kHz- und 48 kHz-Material direkt bei gleicher Bitauflösung miteinander verglichen. In Anbetracht des Quantisierungsrauschens müßte aber das mit 48kHz abgetastete Signal für einen ehrlichen Vergleich 1 bit mehr als das mit 96 kHz abgetastete besitzen.

Halbiert sich also mit der Abtastfrequenz auch das Quantisierungsrauschen, liegt der Gedanke nahe, die Überabtastung, die sich leicht und extrem preiswert realisieren läßt, soweit zu betreiben, daß man letztendlich nur noch ein Bit für die Wandlung benutzen muß.

Bitstream-AD-Wandlung

Tatsächlich arbeitet ein moderner Delta-Sigma-Wandler mit mindestens 64facher Überabtastung ($\approx 3\text{Mhz}$) und einer Auflösung von einem Bit. Er besteht aus zwei Blöcken: einem analogen Modulator und einem digitalen Filter. Der Modulator ist dabei prinzipiell nur ein analoger Komparator (Delta), dem ein Tiefpaß als Integrierer (Sigma) vorgeschaltet ist. Gleichzeitig wird von der Eingangsspannung das durch einen 1bit DA-Wandler rückgewandelte Ausgangssignal wieder abgezogen (Differenzverstärker, siehe Bild 3), so daß der Komparator jedesmal wieder zurückgesetzt wird. Dadurch entsteht ein 1bit Datenstrom,



der Bitstream: steigt die Amplitude des Analogsignals an, überwiegt am Ausgang des Komparators „1“. Fällt sie, überwiegt „0“. Ist die Amplitude konstant, halten sich „0“ und „1“ die Waage.

Das analoge Signal könnte nun unmittelbar durch Integration, also durch einen einfachen Tiefpaß, wiedergewonnen werden. Dieses Konzept verfolgen Sony und Philips mit der SACD (Super Audio CD), bei der das Signal (DSD) eines mit 2,82 MHz getakteten Bitstreamwandlers prinzipiell direkt auf einen DVD-Datenträger (aber nicht kompatibel zur DVD Video/Audio) aufgezeichnet wird. Allerdings wäre ohne Zusatzmaßnahmen der Rauschabstand sehr schlecht, rein rechnerisch ergibt sich bei 64facher Überabtastung eine Dynamik von nur 24,08 dB. Da diese Dynamik für Audioanwendungen indiskutabel ist, wird sie durch einen Trick, dem Noise Shaping verbessert. Vereinfacht gesagt, wird beim Noise Shaping das Rauschspektrum, das durch den 64fachen Bitstreamwandler erzeugt wird, zu hohen Frequenzen außerhalb des Hörbereiches „verschoben“. Dies geschieht bereits durch den analogen Integrierer, der dem Eingangs-Differenzverstärker nachgeschaltet ist (Bild 3). Dieser dämpft die Frequenzanteile, die spektral weit von der Abtastfrequenz und ihren Vielfachen liegen. Das Resultat ist ein deutlich vermindertes Quantisierungsrauschen, das zu hohen Frequenzen jedoch exponentiell ansteigt. Ein 18bit Delta-Sigma Wandler erreicht 110dB Rauschspannungsabstand bei 100 Hz, bei 20 kHz beträgt er aber „nur“ noch 90 dB und bei 50 kHz nur noch 80 dB.

Anschließend erfolgt für die herkömmlichen PCM-Aufzeichnung das angesprochene Downsampling auf Standard-Datenwörter mit z.B. 44.1 kHz und 16 bit durch ein mittelwertbildenes, steiflankiges Digitalfilter.

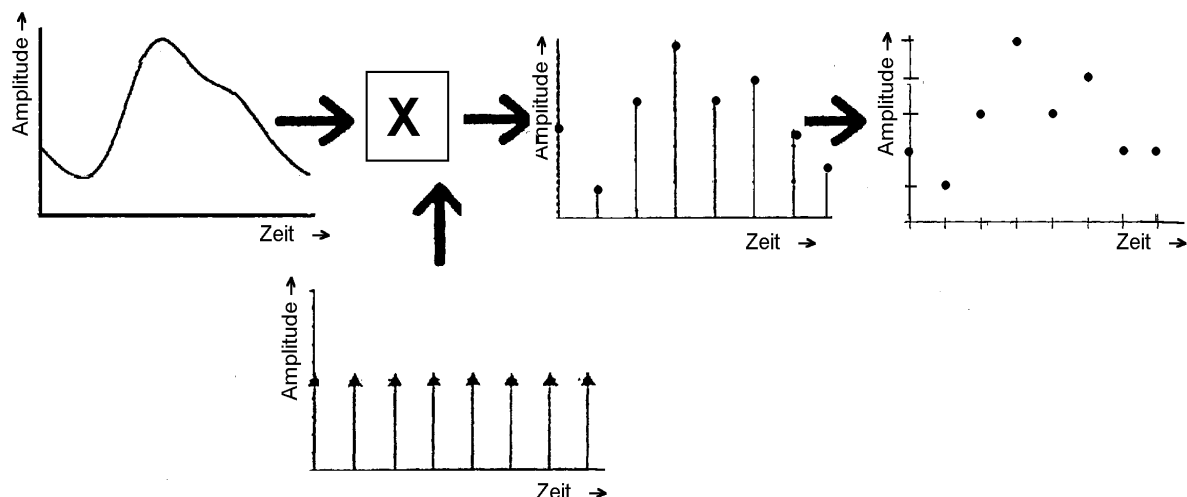


Bild 1: aus einem Zeit- und Wertediskreten Signal wird durch Faltung mit Diracimpulsen ein Zeitdiskretes und bei der Quantisierung ein Wertediskretessignal mit Quantisierungsfehlern.

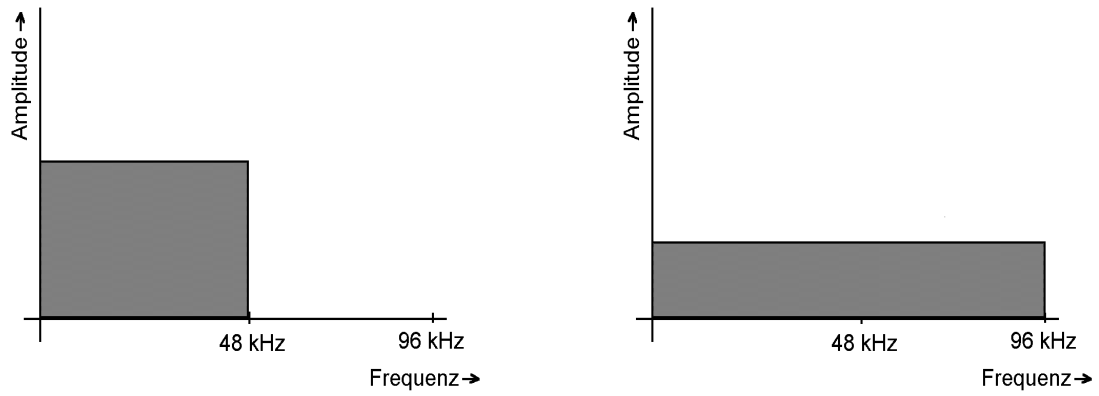


Bild 2: Einfluß der Überabtastung auf das Quantisierungsrauschen

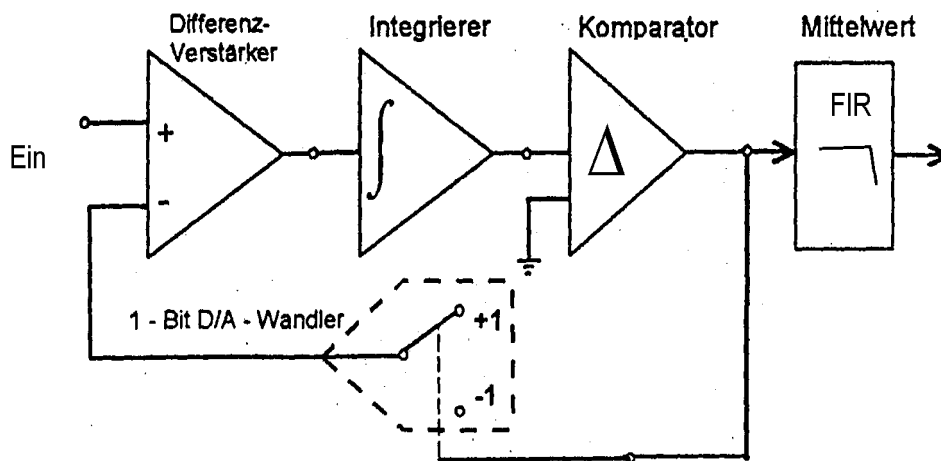


Bild 3: Funktionsschema des Delta-Sigma-Wandlers