

Kontinuierliche Digitaltechnik als völlig neues Prinzip der Digitalisierung

Horst Völz

Die Digitalisierung von Signalen – insbesondere bei Audio und Video – erfolgt im Wesentlichen unverändert seit reichlich einem halben Jahrhundert. Dabei wurde jedoch ihre Qualität gewaltig verbessert. Dennoch gibt es deutliche Schwächen, die durch ein neues Prinzip vermieden werden können, wobei gleichzeitig bessere Kennwerte zu erreichen sind. Diese jetzt entdeckte Kontinuierliche Digitaltechnik wird mit ihren vorteilhaften Eigenschaften und möglichen Problemen hier stark vereinfacht dargestellt.

Grundlagen und Probleme der üblichen Digitalisierung

Zwei Grundlagen bestimmen die Möglichkeiten und Grenzen der heutigen digitalen Techniken, nämlich das Samplingtheorem und die endlich vielen diskreten Amplitudenstufen. Vielfach werden zur nachträglichen Verringerung beider Nachteile komplizierte Kompressionsverfahren, wie MP3 benutzt. Da sie notwendigerweise auch andere Fakten berücksichtigen, ist dann die Datenrate zwar deutlich kleiner, aber zusätzlich treten Informationsverluste auf. Nur mit erheblichen Aufwand und hinreichender Datenrate lassen sie sich jedoch nahezu bis zur Unhörbarkeit vermindern.

Die wesentliche Grundlage der Digitalisierung ist das Samplingtheorem, welches CLAUDE ELWOOD SHANNON (1916 – 2001) um 1940 bewies. Dabei wird auch von Abtast- oder Nyquist-Rate gesprochen (HARRY NYQUIST, 1889 – 1976). Es besagt, dass ein Signal mit der Bandbreite B periodisch in Zeitabständen $\Delta T \leq 1/(2 \cdot B)$ abzutasten ist. Nur dann lässt sich die originale kontinuierliche (analoge) Information wieder fehlerfrei zurückgewinnen. Deshalb werden akustische Signale mit 20 kHz Bandbreite mit 44,1 kHz, teilweise auch 48 kHz gesampelt. Das geschieht (unnötigerweise) selbst dann, wenn eigentlich eine „Pause“ übertragen wird – und auch dann, wenn zeitweilig im Signal nur viel tiefere Frequenzen vorkommen. Dieser Fakt ist schematisch in **Bild 1** dargestellt. Hier liegt die erste deutliche Redundanz, ein Overhead der heutigen Technik vor.

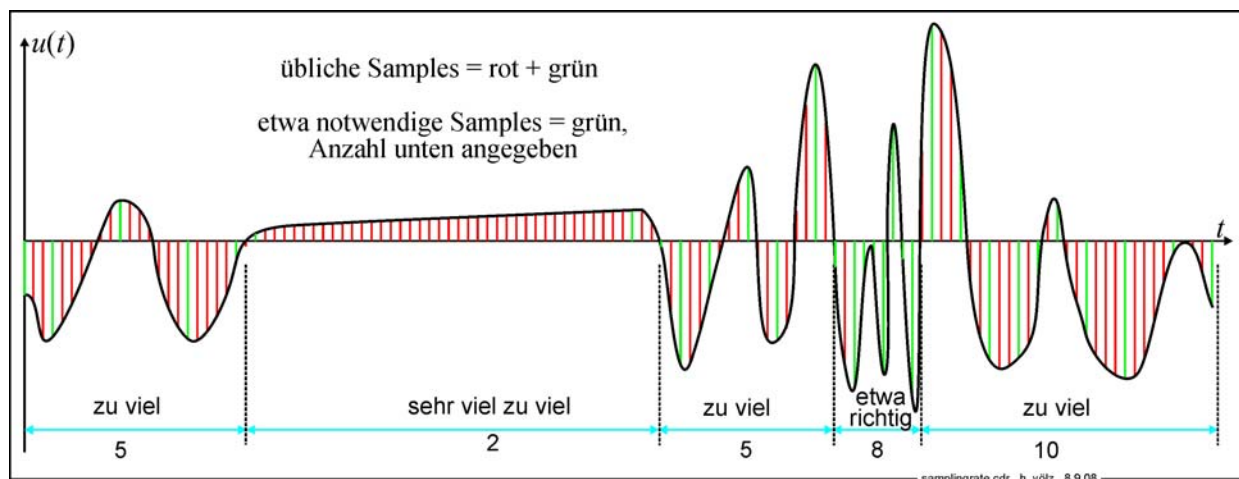


Bild 1. Schematische Darstellung der Abtastung einer Schwingung. Für den Bereich „etwa richtig“ ist die die Abtastfrequenz festgelegt. In allen anderen Bereichen werden unnötig viele Proben (rot gezeichnet) genommen. Im Bereich „sehr viel zu viel“ ist das Verhältnis der gewonnenen zu den notwendigen Proben – hier genügen etwa 2 – besonders extrem.

Zur Übertragung bzw. Speicherung muss jeder Abtastwert auf eine bestimmte diskrete Amplitude festgelegt werden. Denn digitale Zahlenwerte können nur einer fest vorgegebenen Anzahl genau festgelegter Amplituden zugeordnet werden. Dieser Anzahl entspricht die

benutzte Bit-Tiefe. Bei der CD sind 16 Bit mit $2^{16} = 65\,536$ Stufen üblich. In Studios usw. und auch bei der SA-CD werden sogar 24 Bit, d.h. $16\,777\,216$ Stufen verwendet. Andererseits ist aus der Physiologie bekannt, dass wir höchstens um 300 Lautstärken unterscheiden können. Warum benötigt die Technik also so viel mehr Amplitudenstufen? Bei der üblichen Digitalisierung müssen alle Stufen den gleichen Abstand besitzen. Unser Gehör unterscheidet dagegen nur relative Änderungen. Dieser Zusammenhang ist das Weber-Fechnersche Gesetz gemäß $W \sim \log(R)$; (ERNST HEINRICH WEBER, 1795 – 1878, GUSTAV THEODOR FECHNER 1801 – 1887). Darin bedeuten R die Energie der Reizes, also z.B. des Schalls oder der Lichthelligkeit und W die subjektiv wahrgenommene Intensität. Die Wahrnehmung ist also dem Logarithmus der Reizintensität proportional. Schematisch zeigt dies **Bild 2** in einer logarithmischen Darstellung für die Lautstärke. Dabei fällt auf, dass die Stufen beim Gehör – und auch beim alten analogen Tonbandgerät – über den ganzen Lautstärkebereich etwa gleich große Abstände besitzen. Bei der CD werden sie dagegen infolge ihrer linearen Abstufung nach oben immer dichter. Die Folge hiervon ist besonders deutlich in den etwas übertriebenen, vergrößerten Ausschnitten von Bild 2b bis d sichtbar. Bei geringen Lautstärken besitzt die CD vergleichsweise zu wenig Amplitudenstufen. Dies bewirkt das zuweilen erheblich störende Samplingrauschen. Deshalb werden noch feinere Stufen bei SA-CD und im Studio benutzt. Bei großen Lautstärken liegen dagegen – infolge der linearen Abstufung bei der Digitalisierung – für die CD viel zu viele und damit unnötige feine Stufen vor. Der Vergleich mit dem analogen Tonbandgerät zeigt deutlich, dass es trotz der nur etwa 100 Stufen subjektiv eine so gute Qualität besitzt. Seine Stufen sind zwar etwas größer als es das Gehör verlangt, aber ihm angepasst logarithmisch abgestuft.

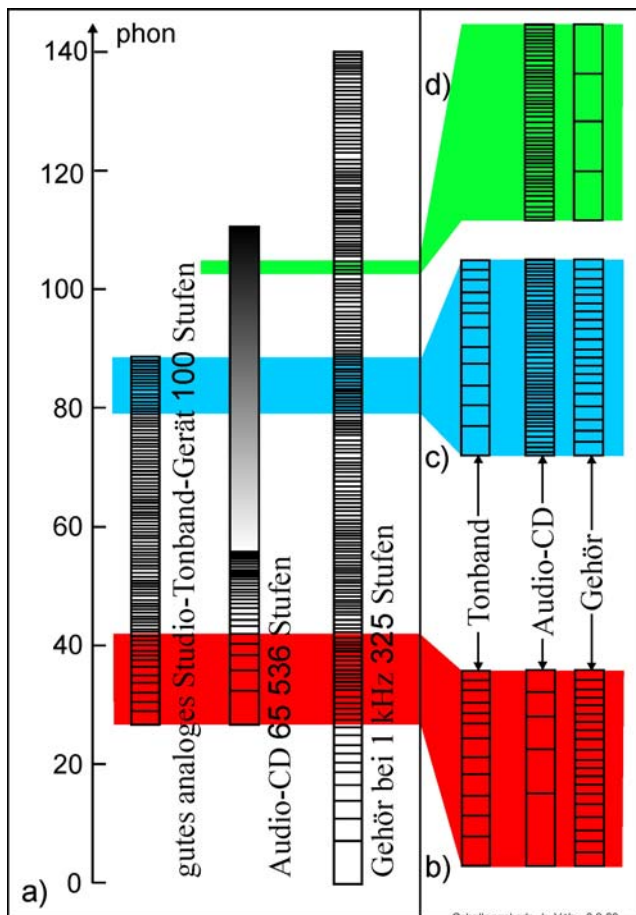


Bild 2. Vergleich der Amplitudenstufen beim analogen Tonbandgerät, der Audio-CD und dem Gehör. Die Ausschnitte in den Teilbildern b), c) und d) im Original a) sind zur besseren Darstellung unterschiedlich groß gewählt. Im unteren Lautstärkebereich (rot) besitzt die Audio-CD wesentlich weniger Stufen als es das Gehör verlangt. Das Tonbandgerät ist hier deutlich besser angepasst. Bereits mit mittlerem Bereich (blau) besitzt die CD unnötig viele Stufen. Auch hier ist das Tonbandgerät relativ gut dem Gehör angepasst. Extrem zu viele Stufen besitzt die CD im oberen Lautstärkebereich (grün).

Reduzierung der Signalanzahl

Entsprechend dem bisher Gesagten benutzt die heutige Digitalisierung gleichmäßig getakte Abtastwerte. Sie sind durch senkrechte rote Linien in **Bild 3a** dargestellt. Anschließend werden

diese Abtastwerte (rote Kreise) auf feste Amplitudenstufen (blaue waagrechte Linien und schwarze Quadrate) festgelegt. Die neue Methode legt dagegen entsprechend Bild 3b um das Signal eines bestimmten Zeitintervalls einen zulässigen, nicht hörbaren Toleranzbereich Δu , Δt von etwa 5 % und 2 ms fest. So ergibt sich der in Bild 3b gelb dargestellte Bereich. In ihm wird eine möglichst einfache mathematische Funktion – rot gezeichnetes Ausgleichssignal – gesucht. Hierfür stehen die mathematischen Operationen der Approximation zur Verfügung. Die mathematische Funktion kann genormt werden, z.B. mittels Tschebyscheff-Polynome. Dann sind für dieses Intervall nur noch die Koeffizienten zu speichern oder zu übertragen. Die Vielzahl der für das Intervall sonst erforderlichen getakteten Proben wird so durch nur wenige Koeffizienten ersetzt. Dabei entsteht ein deutlich geringerer Datenstrom. Bei der Wiedergabe wird aus den Koeffizienten wieder der kontinuierliche Funktionsverlauf erzeugt. Mittels eines Sägezongenerators wird damit ein kontinuierliches Signal erzeugt. Es entspricht sehr genau dem Original-Signal. Insbesondere können dabei weder ein Samplingrauschen noch andere Fehler, wie Phasenverzerrungen auftreten. Im Prinzip wird hier etwas indirekt benutzt, das schon lange aus der Analytik bekannt ist. Für alle kontinuierlichen Punkte eines Kreises genügen nämlich die Kreisgleichung und drei Punkte. Genauso genügen hier für ein Zeitintervall die wenigen Koeffizienten.

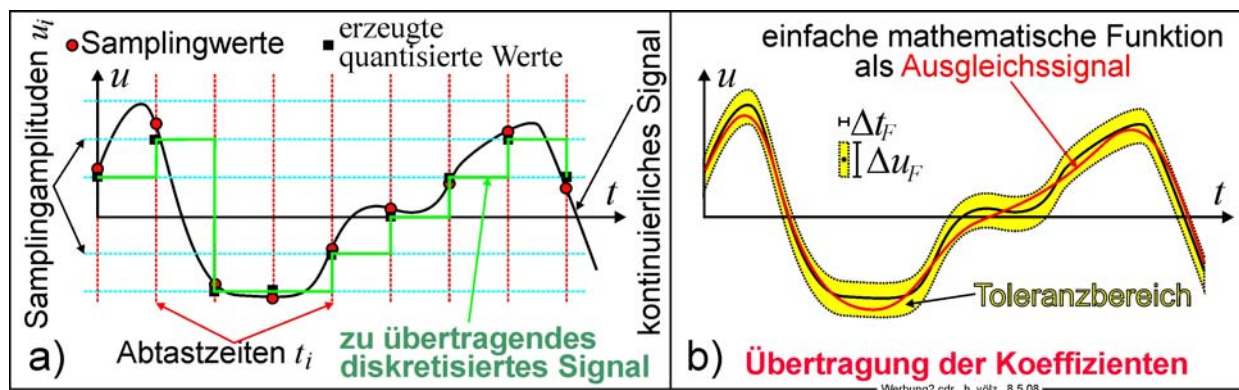


Bild 3. Vergleich von heute üblicher Digitalisierung (a) mit der neuen „Kontinuierlichen Digitaltechnik“ (b). Trotz bei besserer Kurvenanpassung – rote Kurve in b) statt grüner in a) – werden 9 Signal-Proben durch 2 Funktions-Koeffizienten ersetzt.

Die Wahl optimal verteilter Amplitudenstufen

Alle Punkte des zuvor genannten Kreises können, wenn die Kreisgleichung bekannt ist, durch die Wertepaare x_i, y_i mit $i=1$ bis 3 ersetzt werden. Genauso werden in der Kontinuierlichen Digitaltechnik ausgewählte Wertepaare u_i, t_i benötigt. Eine, von den vielen hierzu möglichen Schaltungen zeigt **Bild 4**. Entsprechend der Unterscheidbarkeit unseres Gehörs werden in dem Widerstandnetzwerk (genormt) die einzelnen etwa 300 oder weniger Amplitudenstufen festgelegt und je einem Diskriminator zugeführt. Für positive und negative Werte gibt es den Vorzeichenentscheider. Immer dann, wenn das Signal eine Amplitudenstufe erreicht, werden die Zeit und die Nummer der Stufe als Wertepaar festgehalten. Beide bilden im Rahmen der gewählten Genauigkeit ein fehlerfreies Wertepaar. Anschließend wird eine festgelegte Anzahl von Wertepaaren zu einem Intervall zusammengefasst. Sie bilden die Grundlage für die Approximation im Toleranzbereich. Die so gewonnen Koeffizienten sind die Grundlage der Speicherung bzw. Übertragung. Mit dieser Schaltung wird deutlich, dass jetzt nur wenige Amplitudenstufen für die Wertepaare genügen. So entfallen trotz höherer Qualität der Digitalisierung die Redundanzen von Bild 1 und 2 entfallen.

Die Schaltung nach Bild 4 scheint sehr aufwändig zu sein. Sie dürfte auch kaum so realisiert werden, hat aber den Vorteil, dass sie das Prinzip besonders übersichtlich aufzeigt. Das

Widerstandsnetzwerk kann durch eine Tabelle ersetzt werden, die vielen Komparatoren durch einen eine sequentielle Umschaltung zwischen den Amplitudenstufen. Dieser Vorgang kann zeitlich verkürzt werden, wenn eine Wägeprinzip mit iterativer Halbierung benutzt wird. Es gibt noch viele weitere Varianten. Entscheidend ist jedoch, dass für die Wertepaare immer nur die notwendigen Proben genommen werden und dass hierbei die physiologisch gerade nicht hörbar zu unterscheidenden Amplitudenstufen verwendet werden. Ein beachtlicher Aufwand bei diesen Prozessen besteht in der Approximation. Rechentechnisch stellt sie aber heute kein technisches Problem dar, zumal sie auch in Hardware integriert werden kann. Des Umfanges und der mathematischen Komplexität wegen kann hier aber nicht darauf eingegangen werden. Einen knappen Abriss dazu enthalten die Publikationen in der Zeitschrift Elektronik (s.u.). Außerdem wird in absehbarer Zeit ein Buch zu allen Grenzen und Möglichkeiten der Kontinuierlichen Digitaltechnik erscheinen.

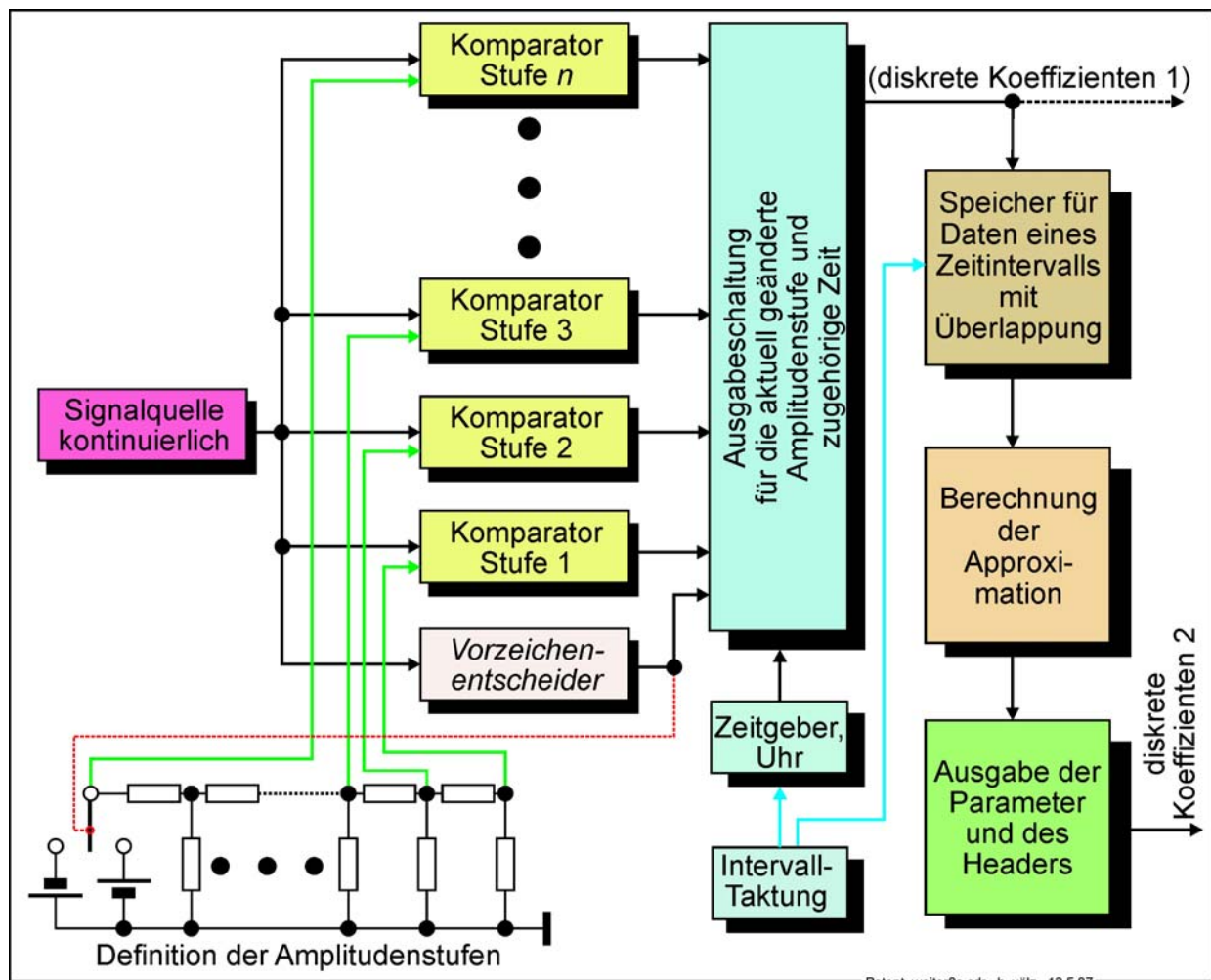


Bild 4. Eine typische Schaltung der Kontinuierlichen Digitaltechnik.

Vorteile und Nachteile

Die Kontinuierliche Digitalisierung verbindet die Vorteile der kontinuierlichen Signale für die Signalaufnehmer (z.B. Mikrofone) und für unsere Sinne mit den Vorteilen der Digitaltechnik bei der Speicherung und Übertragung der Signale, nämlich das verlustfreie und schnelle Kopieren der Daten einschließlich Fehlerkorrektur, Kryptographie usw. Erstmals ist so eine praktisch exakte Rückgewinnung des Original-Signals bei digitaler Speicherung möglich. Die zulässigen Abweichungen sind genau vorgebar oder beliebig klein zu halten. Daher treten kein Samplingrauschen, keine Phasenfehler und Nichtlinearitäten auf. Es entfällt der oft aufwändige

Tiefpass bzw. das Oversampling der heutigen Wiedergabetechnik. Die Technik kann problemlos so gestaltet werden, dass sowohl eine Hardware (Signalprozessoren) als auch das Datenformat gleichzeitig alle Forderungen von *low-end* bis *high-end* erfüllt. Die Redundanzsenkung ist beachtlich. Für die volle Dynamik von 140 dB genügen bereits 9 Bit und eine mittlere Datenrate von einigen kBit/s. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass dies Verfahren auch zusätzlich auf alle heute üblichen Signale – z.B. auch MP3 – mit Erfolg angewendet werden kann. Weitere vorteilhafte Anwendungen betreffen u.a. Bilder, Videos und Messtechnik.

Die Nachteile der Kontinuierlichen Digitaltechnik bestehen darin, dass völlig umgedacht werden muss und dass sie nur mühevoll und damit langsam die heute fest etablierte Digitaltechnik zunächst ergänzen und dann ablösen muss. Beides kann einige Jahre dauern. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass sie technisch etwas aufwändiger ist und noch keine spezifischen Verfahren der Signalbearbeitung (Cuttern usw.) erarbeitet worden sind. Doch recht bald dürften proprietäre Anwendungen, insbesondere in der Messtechnik entstehen. Hier bieten sich weitere Vorteile an, z.B. schrittweise Verbesserung und sehr schnelle Suche in großen Datenarchiven, z.B. bei Bildern.

Ergänzende Literatur

Völz, H.: Kontinuierliche Digitaltechnik. Teil 1. Mathematische Grundlagen. Elektronik 2008, H. 15, 38 – 42

* Kontinuierliche Digitaltechnik. Teil 2. Schaltungstechniken für die Spezifischen Signalabtastungen. Elektronik 2008, H. 17, 44 – 49

* Kontinuierliche Digitaltechnik. Teil 3. Ermittlung der Koeffizienten und Signalwiedergabe. Elektronik 2008, H. 19, 46 – 52