

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Digital - überall

1. Was heißt "digital"

1.1 Das analoge Signal

Jede hochstehende Zivilisation hat das Problem, Nachrichten über große Entfernungen zu übertragen. In alten Kulturen wurden dazu materielle Träger, z. B. Knotenschnüre oder Schriftzeichen auf Tontafeln, optische oder akustische Signale benutzt. Erst durch die Entdeckung des elektrischen Stromes und die Möglichkeit, diesen mit Drähten weiterzuleiten, konnten Nachrichten mit Hilfe von elektrischen Signalen weitertransportiert werden.

Da die technischen Hilfsmittel sehr einfach waren, beschränkte sich das Signal auf das bloße Ein- und Ausschalten des Stromes. Bekannt ist das von Morse entwickelte Alphabet, das neben dem Ein- und Ausschalten des Stromes auch zwei verschiedene Zeitdauern des Stromflusses kennt, nämlich kurz und lang, wobei die Zeitabschnitte nicht in ihrer Dauer absolut vorgegeben sind, sondern sich nur signifikant unterscheiden müssen. Das Morsealphabet ist im Grunde bereits eine Anwendung digitaler Signale.

Mit der Erfindung von Mikrophon und Lautsprecher war es später möglich, mechanische Luftschwingungen und damit Sprache in elektrische Stromschwankungen umzuwandeln, über größere Strecken zu transportieren und am entfernten Ort mit Hilfe eines Lautsprechers wieder in mechanische Luftschwingungen (Sprache) umzuwandeln.

Da die Umwandlung der mechanischen Luftschwingungen in ein elektrisches Signal sowohl analog ihrer Lautstärke als auch ihrer Frequenz (Tonhöhe) geschieht, spricht man von einem analogen Signal, d.h. in jedem Augenblick entspricht das elektrische Signal dem mechanischen (s. Abb. 1).

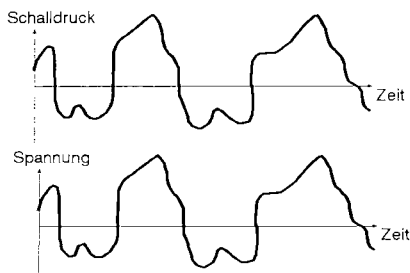


Abb. 1: Beispiel für analoge Signale

1.2 Das digitale Signal

1.2.1 Der Begriff "digital"

Der Begriff "digital" leitet sich ursprünglich aus dem lateinischen "digis - der Finger" ab, kommt aber aus dem Englischen, wo "digit" die Ziffer bedeutet. In der Nachrichtentechnik versteht man unter einem digitalen Signal, ein Signal, das so umgeformt worden ist, daß es nunmehr nur aus einer Folge der Ziffern "1" und "0" besteht, entsprechend den Schaltzuständen des Stromes "ein" oder "aus".

1.2.2 Erzeugung eines digitalen Signals

Um ein digitales Signal zu erhalten, wird aus einem analogen Signal in genau regelmäßigen Abständen eine Probe entnommen (siehe Abb. 2). Diese Probe wird durch einen sog. Codierer bewertet, d.h. die Signalgröße wird in die ihr entsprechende Klasse eingeordnet. Die Nummer dieser Klasse stellt den digitalen Wert der entnommenen Probe dar. Wie in Abb. 2 ersichtlich, wird bei der Probe Nr. 1 als Signal z.B. eine Spannung zwischen 7 und 8 mV gemessen und in die Klasse 8 eingeordnet; die Ziffer 8 wird in digitaler Schreibweise L000 geschrieben. Mit den folgenden Proben wird ebenso verfahren.

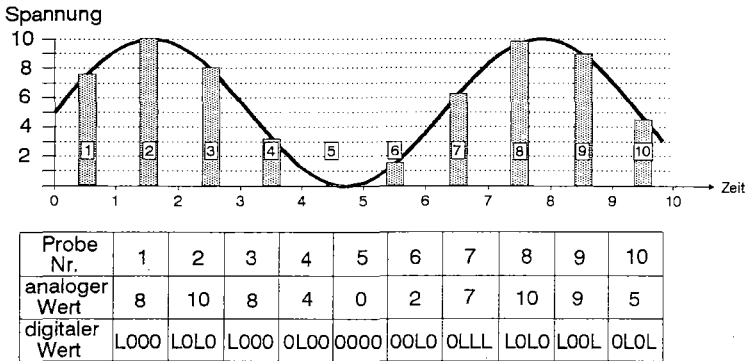


Abb. 2: Schema zur Digitalisierung eines analogen Signals

1.2.3 Codierung - Decodierung

1.2.3.1 Codierungsverfahren

Im Codierer wird die Signalprobe durch den Vergleich mit einer entsprechenden Spannung gemessen. Die kann im Prinzip auf den drei folgenden Wegen erfolgen:

- **Der Parallelcodierer:** Beim Parallelcodierverfahren wird die Signalprobe **gleichzeitig** mit so vielen Spannungsnormale verglichen wie Stufen (Klassen) im gesamten Aussteuerungsbereich vorhanden sind. Die

Größe der Spannungsnormale entspricht den einzelnen Stufen. In einem Schritt wird also festgestellt, welches Normal dem zu codierenden Signal entspricht. Das Normal, das der Signalprobe am nächsten kommt, gibt das entsprechende digitale Codewort ab. Ein Codewort aus n Bit erfordert daher 2^{n-1} Spannungsnormale, d. h. ein 8-Bit Codewort erfordert also 128 Spannungsnormale. Ein Parallelcodierer ist eine sehr

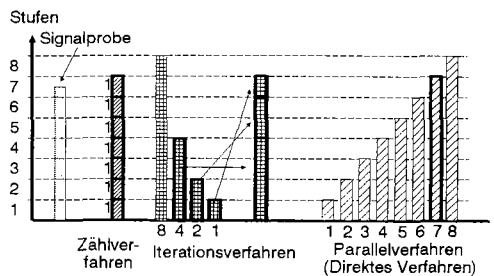


Abb. 3: Die drei wesentlichen Codierverfahren

komplexe Schaltung und in der Herstellung teuer, dafür sehr schnell. (Auf die Bedeutung der Schnelligkeit bei der Signalcodierung wird später eingegangen.)

- **Das Zählcodierverfahren:** Das Zählcodierverfahren kommt mit nur einem Normal aus. Dabei wird festgestellt, wie oft man das Normal (der kleinste geforderte Signalwert) übereinanderstapeln muß, um den Wert der Signalprobe zu erhalten. Dazu sind 2^{n-1} Schritte erforderlich. Der technische Aufwand für dieses Verfahren ist zwar gering, aber wegen der vielen Schritte sehr zeitintensiv und für eine schnelle Codierung nicht geeignet.

- **Das Wiege- oder Iterativcodierverfahren:** Beim Wiege- oder Iterativcodierverfahren sind n Normale erforderlich, die sich jeweils in ihrer Größe (Gewicht) um den Faktor 2 unterscheiden. Daraus ergibt sich also eine Stufung von $2^0, 2^1, 2^2, \dots, 2^{n-1}$. Der zu codierende Abtastwert wird nacheinander, ausgehend vom größten Normal, mit diesen Normalen verglichen. Ist der Signalwert kleiner als das gerade zum Vergleich herangezogene Normal, so wird es abgeschaltet und bleibt auch für die anderen Vergleichszyklen unberücksichtigt. Das nächstkleinere Normal hingegen wird angeschaltet. Ist der Signalwert größer als das Vergleichsnormal, so bleibt es für die nächsten Zyklen eingeschaltet und das nächstkleinere wird dazugeschaltet. Der Zyklus beginnt dann wieder von vorn. Ähnlich wie bei einer Waage wird also das Gewicht auf der Waagschale belassen bzw. es werden neue Gewichte hinzugefügt, bis das wirkliche Gewicht ermittelt ist. Das geschieht so lange, bis auch mit dem kleinsten Normal der Vergleich durchgeführt wurde und somit das Codewort vollständig gebildet ist.

Dieses Verfahren stellt also einen Kompromiß zwischen dem Parallel- und dem Zählcodierverfahren dar. Hier wird mit einem vertretbaren Aufwand an Vergleichsnormalen mit einer ausreichenden Schnelligkeit das Codewort ermittelt.

Die Umwandlung eines analogen in ein digitales Signal wird auch A/D-Wandlung genannt.

1.2.3.2 Decodierung des digitalen Signals

Bei der Umwandlung eines digitalen in ein analoges Signal - D/A-Wandlung genannt - wird umgekehrt wie bei der A/D-Wandlung vorgegangen. Es werden im Prinzip auch ähnliche Schaltungsarten verwendet. Beim Parallelcodierer z.B. heißt dies, daß gemäß dem anliegenden Codewort ein Impuls entsprechender Höhe abgegeben wird.

1.2.3.3 Grenzfrequenz

Wie aus Abb. 2 ersichtlich, wird aus dem analogen Signal nur während einer sehr kurzen Zeitspanne eine Signalprobe entnommen. In der Zeit zwischen den Proben können Signaländerungen nicht registriert werden. Es ist nun offensichtlich, daß solche Änderungen umso eher registriert werden, je öfter man Proben entnimmt. Natürlich bedeutet dies einen größeren schaltungstechnischen Aufwand und, was viel gravierender ist, eine enorme Ausweitung des zu übertragenden Frequenzspektrums. Es ist also notwendig, einen Kompromiß zwischen der notwendigen Signaltreue und dem schaltungs- und übertragungstechni-

schen Aufwand zu finden. Wenn man ein Signal mit der Frequenz f_g digital übertragen will, so muß man es mindestens mit der doppelten Frequenz $2 \cdot f_g$ abtasten, was bereits der Informatiktheoretiker Shannon bewiesen hat.

Es gilt also für die Abtastfrequenz $f(a) \geq 2 \cdot f_g$. Man nennt f_g auch die Grenzfrequenz des zu übertragenden Signals. In der Praxis bedeutet dies, wenn man alle Töne, die der Mensch wahrnehmen kann (bis ca. 20 kHz), digital auf eine CD (Compact Disk) aufzeichnen will, so muß man mindestens mit 40 kHz abtasten. Anders ausgedrückt, man muß alle 1/40 000 Sekunde eine Signalprobe entnehmen.

1.2.3.4 Quantisierung

Wie aus Abb. 3 ersichtlich, wird bei der Zuordnung der Amplitudenprobe des analogen Signals zu einer bestimmten Stufe, man spricht hier von einer **Quantisierungsstufe**, ein Fehler gemacht. Das analoge Signal kann sowohl an der unteren als auch an der oberen Grenze der Quantisierungsstufe liegen und wird doch in das gleiche Codewort umgewandelt.

Es ist klar, daß dieser Quantisierungsfehler um so geringer wird, je feiner man die Quantisierungsstufen wählt. Eine Vielzahl von Quantisierungsstufen bedeutet aber einen entsprechend höheren, schaltungstechnischen Aufwand bei den A/D- bzw. D/A-Wandlern, eine Verlängerung der Codierzeit oder des Codewortes je nach Wandlertyp und damit auch eine Verlängerung der Übertragungszeit. Es ist also auch hier ein Kompromiß zwischen der noch tolerierbaren Signalverfälschung und dem technischen und damit finanziellen Aufwand notwendig. Diese bei der Quantisierung und bei der Rückumwandlung in ein analoges Signal auftretenden Fehler sind von ihrer Natur her im höherfrequenten Teil des Signals enthalten und werden deshalb auch Quantisierungsrauschen genannt.

Bei jeder Umwandlung eines analogen in ein digitales Signal und umgekehrt wird also das Signal verfälscht und diese Verfälschung ist nicht mehr aus dem Signal eliminierbar. Deshalb muß man die Anzahl der A/D- bzw. D/A-Wandlungen möglichst gering halten.

Nun kann man sich bei der Quantisierung von akustischen Signalen der physiologischen Eigenschaften des Ohres bedienen, daß laute Töne leise überdecken und daß bei leisen Tönen noch kleinste Störungen besonders stark empfunden werden. Außerdem kann man lauten Töne kaum voneinander unterscheiden. Diese Tatsache macht man sich bei der Quantisierung zunutze. Man quantisiert leise Töne sehr viel feiner als laute, kommt so zu einer nichtlinearen Quantisierungskennlinie und spart letztlich Quantisierungsstufen ein.

1.2.4 Eigenschaften des digitalen Signals

1.2.4.1 Arten des digitalen Signals

Wie bereits erwähnt, besteht ein digitales Signal aus zwei Zuständen nämlich "0" und "1". Physikalisch kann das z. B. durch "kein Strom fließt" bzw. "Strom fließt" dargestellt werden. Im folgenden sollen nun einige grundsätzliche Signaldarstellungen besprochen werden:

- Das binäre, unipolare Signal

Beim binären, unipolaren Signal fließt bei der "1" der Strom immer in ein und dieselbe

Richtung (unipolar), bei der "0" fließt kein Strom. Da zwei Schaltzustände existieren, spricht man von einem binären Signal. Man unterscheidet zwischen "NRZ"- (No-Return-to-Zero) und "RZ"- (Return-to-Zero) Signalen. Beim NRZ-Signal bleibt der Strom über die gesamte Impulsdauer der "1" eingeschaltet. Beim RZ-Signal wird der Strom nach einer gewissen Zeit abgeschaltet und bei einer darauf folgenden "1" erneut eingeschaltet (s. Abb. 4).

- Das AMI-Signal

Das AMI-Signal ist ein sog. bipolares, pseudoternäres Signal. Hier wird für die "1" abwechselnd ein positiver bzw. negativer Strom erzeugt (bipolar). Es werden also für die Darstellung von zwei Signalelementen drei physikalische Zustände verwendet. Die Abkürzung AMI steht für "Alternate Mark Inversion" (s. Abb. 4).

- Das CMI-Signal

Bei diesem Signal werden ähnlich wie beim AMI-Signal die binäre "1" mit alternierender Polarität (d. h. mit verschiedenen Stromrichtungen) übertragen. Die binäre "0" wird in ein Signal umgesetzt, das in der ersten Bithälfte negativ und in der zweiten positiv ist, also in der Bitmitte eine aufsteigende Flanke besitzt (s. Abb. 4).

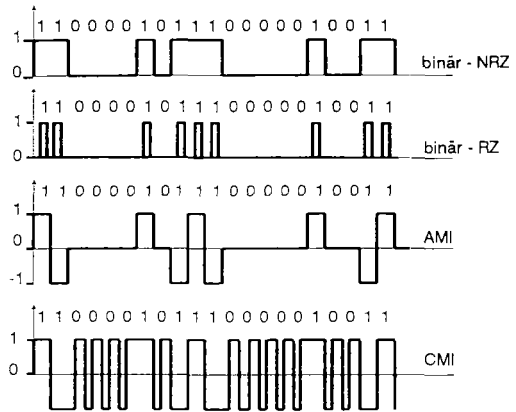


Abb. 4: Darstellung digitaler Signale (Codearten)

1.2.4.2 Übertragungstechnische Eigenschaften

Wie aus den Darstellungen aus Bild 4 unschwer zu erkennen ist, haben die beiden Signale "NRZ" und "RZ", die schaltungstechnisch sehr leicht zu realisieren sind, einen hohen Gleichstromanteil im Signal. Da aber in der Praxis Signale über große Entfernungen übertragen werden sollen, müssen sie auf ihrem Weg verstärkt werden. Aus übertragungstechnischen Gründen kann das aber nur bei Wechselströmen mit vertretbarem technischen Aufwand durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden aus den "NRZ"- bzw. "RZ"-Signalen die gleichstromfreien AMI- und CMI-Signale erzeugt.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, daß die eintreffenden Impulse auf der Empfängerseite in der richtigen Art und Weise umgewandelt werden müssen. Dazu ist es notwendig, den Abtasttakt, der bei der Generierung des Signals zugrunde gelegt wurde, möglichst genau aus dem empfangenen Signal zurückzugewinnen. Wenn allerdings eine längere Folge von "0"-Signalen gesendet wird, so läßt sich das Taktsignal nicht rückgewinnen. Am sichersten ist der Takt aus dem CMI-Signal zu gewinnen, wie in Abb. 4 zu erkennen ist.

Ein zusätzliches Problem stellt das Frequenzspektrum des zu übertragenden Signals dar. Je breiter das Frequenzspektrum ist, desto größer muß der Aufwand bei seiner Übertragung sein bzw. desto weniger Signale können gleichzeitig auf einer Leitung übertragen werden.

Nun haben leider rechteckige Signale einen großen Anteil an hohen Frequenzen. Um diese zu vermeiden, verwendet man als elektrische Impulse "sinus"-Halbwellen oder noch besser "cos²"-Halbwellen (s. Abb. 5).

Natürlich beeinflusst auch die Abtast- bzw. die Taktfrequenz ganz wesentlich das erforderliche Frequenzspektrum. Um diese zu verringern, werden nach der Gewinnung des digitalen Signals spezielle Codieralgorithmen angewandt.

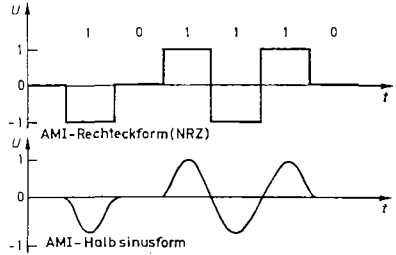


Abb. 5: Rechteck- und halbsinusförmige Signale

1.2.5 Das Zeitmultiplexsignal

Wie vorher gezeigt, werden in bestimmten Zeitabständen aus dem analogen Signal Amplitudenproben entnommen und in ein Codewort umgewandelt. Dieses Codewort wird als digitale Impulsfolge auf den Übertragungsweg geschickt. Wenn man nun diese Impulsfolgen möglichst kurz faßt, erhält man Zeitzwischenräume, in denen man die Codewörter anderer Nutzsingale übertragen kann.

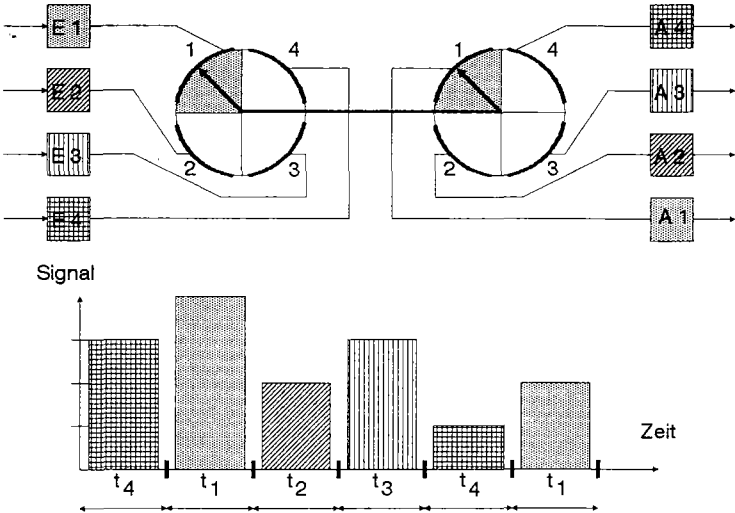


Abb. 6: Schema zur Erzeugung des Zeitmultiplexsignals

Man nennt dieses Verfahren der Mehrfachausnutzung des Übertragungsweges auch Zeitmultiplexverfahren. Eine Prinzipschaltung ist in Bild 6 dargestellt.

Es werden in fester Reihenfolge die Signale 1 - 4 von einem Schalter an die Übertragungsleitung angelegt und auf der Empfangsseite wieder mit einem Schalter auf die einzelnen Leitungen aufgeteilt. Wesentlich dabei ist, daß die beiden Schalter absolut synchron laufen, da sonst die Nutzsignale auf die falschen Leitungen geschaltet werden. Auf dieses Zeitmultiplexverfahren wird später noch näher eingegangen.

Ein Beispiel mit 3 Nutzsignalen und einer Quantisierung mit 7 Stufen (3-Bit-Wort) wird in Bild 7 gezeigt.

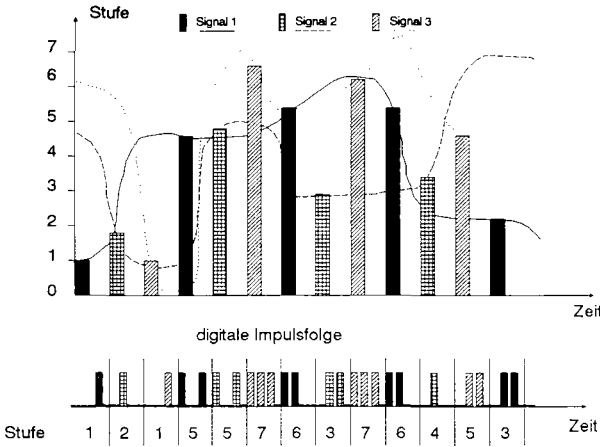


Abb. 7: Zeitmultiplexverfahren mit 3 Nutzsignalen und einer Quantisierung mit 7 Stufen.

1.3 Rückgewinnung des analogen Signals

1.3.1 Regenerierung des digitalen Signals

Bevor aus dem digitalen Signal das analoge Signal gewonnen werden kann, muß erst das digitale Signal in seiner korrekten Form vorliegen. Auf dem Übertragungsweg wird das digitale Signal, bedingt durch vielfältige Einflüsse, stark verfälscht. Es muß daher auf der Empfangsseite erst wieder regeneriert werden.

Dazu sind im Prinzip die in Abb. 8 schematisch dargestellten drei Aufgaben zu erfüllen:

- Die Amplitude des Impulssignals muß entsprechend der Kabeldämpfung entzerrt und verstärkt werden. (Die Dämpfung auf Kabeln steigt mit der Höhe der Frequenz).
- Aus dem Signal muß sicher ein "1"- oder "0"-Signal erkannt werden.
- Die erkannten Impulse müssen in ihrer ursprünglichen Form (Impulsamplitude und Impulsdauer) wiederhergestellt werden (s. Abb. 8).

In der Zeile 1 sieht man das Ausgangssignal, ein AMI-Halbsinus-Signal. In Zeile 2 ist das Empfangssignal dargestellt. Man kann praktisch das Nutzsignal nicht mehr erkennen. In der Zeile 3 wird das nunmehr entzerrte und verstärkte Empfangssignal gezeigt, wobei die Entscheidungsschwellen, bei denen von der Entscheiderschaltung sicher ein "1"- oder

"0"-Signal erkannt wird, gestrichelt eingezeichnet sind. In der Zeile 4 sind die Impulse dargestellt, wie sie von der Entscheiderschaltung entsprechend dem Empfangssignal abgegeben werden. Es ist erkennbar, daß die Impulse verschiedene Impulsdauern haben. Um nun auch dieses Problem zu lösen, muß zunächst in einer speziellen Schaltung (Differenzierschaltung) aus dem Empfangssignal das ursprüngliche Taktsignal der Digitalisierung gewonnen werden. Das Taktsignal ist in Zeile 5 dargestellt. Mit Hilfe einer Torschaltung wird nun überprüft, ob zum Zeitpunkt des Taktes ein Empfangsimpuls vorliegt, und wenn ja, wird bis zum nächsten Takt ein Impuls definierter Höhe abgegeben. Damit liegt das ursprüngliche digitale Signal vor und kann entsprechend weiterverarbeitet werden (Zeile 6). Es kann z. B. wieder in ein AMI-Halbsinussignal umgewandelt und auf einem anderen Kabelabschnitt weitergeleitet werden (Zeile 7).

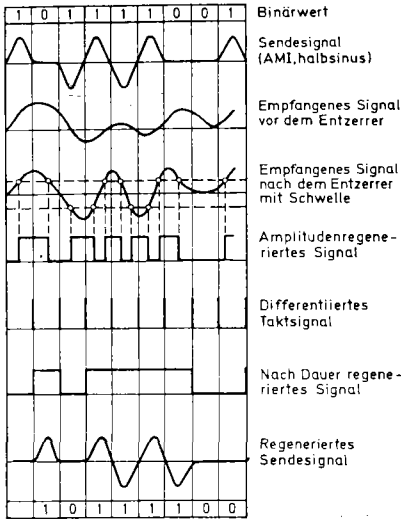


Abb. 8: Regenerierung des digitalen Signals

1.3.2 Rückgewinnung des analogen Signals

Zur Rückgewinnung des analogen Signals aus dem digitalen benützt man einen Tiefpaß, bestehend aus in Serie geschaltetem Widerstand und Kondensator. Die Ausgangsspannung wird am Kondensator abgegriffen. Der Tiefpaß erlaubt nur den Durchgang von Gleichstrom und niederfrequentem Wechselstrom.

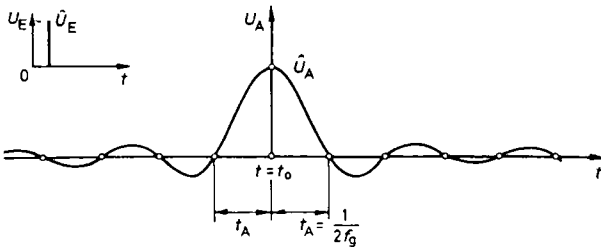


Abb. 9: Impulsantwort eines Tiefpasses auf den links oben gezeigten Impuls

Die Amplitude der Impulsantwort ist von der Amplitude des Eingangsimpulses abhängig und das zeitliche Verhalten im wesentlichen von der Dimensionierung des Tiefpasses.

Vom Decodierer werden Impulse unterschiedlicher Amplituden geliefert, die in kurzen, dem Digitalisierungstakt entsprechenden Zeitabständen am Tiefpaß eintreffen. Bei einer

passenden Dimensionierung des Tiefpasses überlagern sich die Impulsantworten zu einem Ausgangssignal, das dem ursprünglichen, analogen Signal voll entspricht.

2 Warum digitalisieren?

2.1 Das Rauschen

Die Übertragung und Verarbeitung von analogen Signalen erfordert immer aktive Elemente, wie z.B. Verstärker, die aufgrund thermischer und anderer, hier nicht näher erläuteter Effekte, statistische Schwankungen dem Nutzsignal überlagern. Betreibt man einen Verstärker bei offenem Eingang und voller Lautstärke, so sind diese Schwankungen als Rauschen direkt zu hören. Sie werden daher unter dem Begriff Rauschen zusammengefaßt.

Das Rauschen stellt einen nichteliminierbaren Anteil des Nutzsignals dar. Müssen bei besonders kleinem Nutzsignal, wie es z.B. am Ausgang von Antennen vorliegt, mehrstufige Verstärker verwendet werden, so wird zwar pro Verstärkerstufe das Rauschen des Eingangssignals im gleichen Maß verstärkt wie das Signal. Allerdings überlagert sich dem so verstärkten Signal das Eigenrauschen der jeweiligen Stufe, so daß das Rauschsignal insgesamt stärker anwächst als das Nutzsignal. Dies kann so weit führen, daß das Nutzsignal am Ausgang im Rauschen nicht mehr erkennbar ist. Damit es sich doch noch vom Rauschsignal am Ausgang unterscheidet, muß vor allem in der Eingangsstufe eines Verstärkers der Rauschanteil extrem klein sein. Hierzu werden besonders rauscharme Transistoren und Dioden entwickelt, wie sie heute vor allem in den Eingangsstufen von Satellitenempfangsanlagen oder Tunern eingesetzt werden.

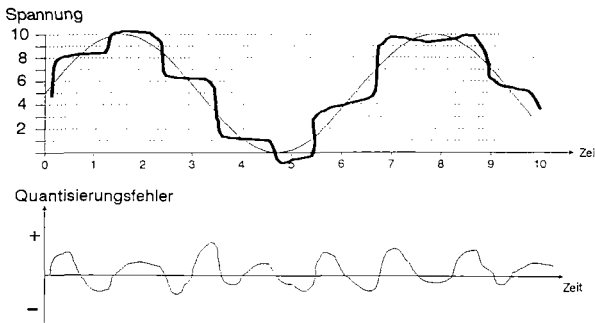


Abb. 9: Verfälschung eines Signals durch Quantisierung

in Abschnitt 1.3 gezeigt, ist es relativ einfach, ein "verrauschetes" digitales Signal vollständig und fehlerfrei zu regenerieren. Bei der Verarbeitung von digitalen Signalen stört somit das mit der Verarbeitung verbundene Rauschen nicht, da es nur auf die Information "Signal" oder "kein Signal" ankommt. Eine digital vorliegende Signalfolge kann daher beliebig oft

Ein weitaus eleganterer und vor allem kostengünstiger Weg ist, das analoge Signal sofort nach der ersten Verstärkerstufe in ein digitales umzuwandeln und das digitale Signal weiterzuverarbeiten (zu übertragen). Erst am Ende der Verstärkerkette wird das digitale Signal in das entsprechende, analoge Signal zurückgewandelt. Wie

verstärkt werden. Die einzigen Fehlerquellen bei der digitalen Signalverarbeitung sind noch das Quantisierungsrauschen und Störungen auf dem Übertragungsweg. Wie bereits unter 1.2.3.4 gezeigt, tritt bei der A/D- bzw. D/A-Wandlung ein Fehler auf, der zwar durch geeignete Maßnahmen gering gehalten werden kann, aber insgesamt nicht zu vernachlässigen ist. Daher bleibt ein Restfehler übrig, der sich letztlich als Rauschen im Signal, dem sogenannten **Quantisierungsrauschen** bemerkbar macht (s. Abb. 9).

Die Störungen, die auf dem Übertragungsweg auftreten, kann man durch besondere Codier- und Fehlererkennungsverfahren korrigieren, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

2.2 Kostengünstige Schaltungen

Ein analoges Signal besteht in der Regel aus einem vielfältigen Frequenzgemisch, in dem die einzelnen Frequenzenanteile eine feste Zuordnung oder auch Phasenlage zueinander haben. Wird nun dieses Frequenzgemisch weiter verarbeitet, so beeinflussen dabei sowohl die passiven als auch die aktiven Bauteile den Amplitudenwert und die Phasenlage des jeweiligen Signalanteils. Will man diese Einflüsse auf das analoge Signal möglichst gering halten, so muß ein erheblicher schaltungstechnischer Aufwand betrieben werden, der kostenintensiv ist. Es müssen nämlich besonders geeignete Bauteile verwendet werden, die zudem noch durch spezielle, oft nur manuell durchführbare Arbeitsgänge optimal aufeinander abgestimmt werden müssen. Dies führt insgesamt zu einer überproportionalen Verteuerung der technisch "guten" Geräte.

Bei der digitalen Signalverarbeitung hingegen genügt es bereits, wenn das Vorliegen einer digitalen "1" oder "0" sicher erkannt werden kann. Frequenzgang und Phasenlage spielen keine entscheidende Rolle. Daher lassen sich für die digitale Signalverarbeitung viel einfachere meist hochintegrierte Halbleiterschaltungen realisieren, die in industrieller Massenfertigung hergestellt werden können. Die sehr teuren Spezialbauteile (z. B. Filter) und die Handarbeit entfallen. Dies führt heute dazu, daß bei Hi-Fi- oder Fernsehgeräten, das noch analog vorliegende Eingangssignal sofort nach der Eingangsstufe in ein digitales Signal umgewandelt wird, das dann weiterverarbeitet wird. Erst ganz am Schluß, sobald der Lautsprecher bzw. die Bildröhre angesteuert wird, benötigt man wieder ein analoges Signal, das sich über einen D/A-Wandler fast fehlerfrei zurückgewinnen läßt. Damit werden Kosten eingespart und es wird außerdem die Zuverlässigkeit der Geräte gesteigert.

2.3 Digitale Übertragungsverfahren

Durch die vielen Vorteile, die digitale Signale gegenüber analogen bieten, werden immer mehr herkömmliche analoge Speicher-, Verarbeitungs- und Übertragungsverfahren in digitale umgewandelt bzw. neue Verfahren erst ermöglicht. Hierbei ergibt sich die Schwierigkeit, daß alte (analog) und neue (digitale) Technik zusammen arbeiten müssen, was nicht so einfach zu realisieren ist. Deshalb dringt die digitale Technik vorwiegend in kommerziellen Bereichen vor, während sie in den privaten Haushalten nur langsam vorankommt. Eine gewisse Ausnahme stellen im audio-visuellen Bereich die Compact-Disc-Abspielge-

räte dar.

Am verbreitetsten ist die digitale Signalverarbeitung in den Computern und im Telefon. So werden heute bereits die überwiegende Anzahl von Ferngesprächen über Glasfaserkabel mit digitalen Signalen abgewickelt. Auch in der Vermittlungstechnik wird bereits ein erheblicher Prozentsatz der Gespräche vor der Vermittlung digitalisiert. Wie bereits erwähnt, ist es am besten, das analoge Signal bereits an der Quelle zu digitalisieren und erst ganz zum Schluß wieder umzuwandeln. Beim Telefon ist dies bereits im ISDN-Netz und beim D-Netz-Funktelefon verwirklicht.

2.4 Zusammenfassung

Die digitalen Signale bieten insgesamt folgende Vorteile:

- sie sind leicht regenerierbar;
- sie sind wenig anfällig gegen Störungen;
- fehlende Zeichen können regeneriert werden;
- sie können einfach verarbeitet werden;
- die Elektronik wird billiger;
- sie sind leichter speicherbar
- sie machen technische Innovationen erst möglich.

Diese Vorteile werden in den nächsten Jahren viele technische Neuerungen nicht nur in der Nachrichtentechnik sondern auch bei Haushaltsgeräten bewirken, über die noch zu berichten sein wird.