

Modulationsverfahren Teil 6

In diesem Teil der Artikelserie wird auf die Modulationsverfahren eingegangen, die mit einem pulsförmigen Trägersignal arbeiten. Nach der Beschreibung der Pulsamplituden-, Pulsfrequenz-, Pulsphasen- und Pulsdauer-Modulation erfolgt abschließend die Erläuterung zur in der digitalen Nachrichtenübertragung weit verbreiteten Pulscodierung (PCM).

Allgemeines

Allen bisher vorgestellten Modulationsverfahren ist die Verwendung eines sinusförmigen Trägersignales gemeinsam. Prinzipiell lassen sich die dort gewonnenen Erkenntnisse auch auf die Modulationsverfahren übertragen, die mit einem pulsförmigen Träger arbeiten. Auch hierbei ergeben sich die einzelnen Modulationsverfahren aus den veränderbaren Trägerparametern. Wie bei einem Sinusträger, lassen sich auch bei einem Pulsträger zunächst folgende Signalparameter variieren: die Amplitude, die Frequenz und die Nullphasenlage. Bei einem Puls als Träger ergibt sich gegenüber dem Sinussignal noch die Pulsdauer als zusätzlicher Beeinflussungsparameter. Die Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Pulsmodulationsverfahren in übersichtlicher Form. Die später noch genauer beschriebene Pulscodierung nimmt hier eine gewisse Sonderstellung ein, da hierbei kein Signalparameter des Pulsträgers verändert wird. Die Information des Nachrichtensignales steckt hier in per Definition festgelegten Datenpaketen, d. h. vereinfacht gesagt, in einer bestimmten Kombination von Pulsen.

Die Pulsmodulationsverfahren werden oftmals nicht als direkte Modulation empfunden, da mit diesem Wort meistens ein hochfrequenter sinusförmiger Träger assoziiert wird. Im rein technischen Verständnis ist eine Modulation jedoch, wie bereits im ersten Teil der Artikelserie („ELVjournal“ 5/98) beschrieben, eine Maßnahme, um das Nachrichtensignal in optimierter Weise an den Übertragungskanal anzupassen.

Die Pulsmodulation von Nachrichtensignalen wird üblicherweise bei leitungsgeführten Übertragungsverfahren eingesetzt.

Hier ist es dann auch einfach möglich, durch die Verwendung des Zeitmultiplex-Verfahrens, mehrere Nachrichtensignale zusammen auf einem Übertragungskanal zu übertragen. Dabei wird dann jedem Nachrichtenkanal ein bestimmtes Zeitfenster zugeordnet, in dem der informationstragende Puls liegt.

Wie aus obiger Aufzählung der Pulsmodulationsverfahren hervorgeht, können auch bei einem Puls alle wesentlichen Signalparameter beeinflusst werden, um darin die Information des Nachrichtensignales zu verschlüsseln. In der Elektrotechnik finden sich alle Arten der Pulsmodulation, ggf. in leicht abgewandelter Form, wieder. Wobei viele Varianten der Pulsmodulation in der reinen Nachrichtentechnik, d. h. bei der direkten Übertragung eines Signales von A nach B, so nicht zur Anwendung kommen. Im folgenden werden wir die einzelnen Verfahren näher betrachten und auch einige Anwendungsgebiete aufzeigen.

Da eine mathematische Betrachtung dieser Modulationsverfahren Kenntnisse in der Signaltheorie voraussetzt, werden wir uns hier auf einfache plausible Erklärungen beschränken. Der interessierte Leser kann bei Bedarf die Formeln herleiten, indem alle bisher erarbeiteten Formeln der Amplitudenmodulation, der Frequenz- und Phasenmodulation auf die Pulsmodulation übertragen werden. Hierbei muß nur der Term des sinusförmigen Trägers durch einen Ausdruck für den rechteckförmigen Träger ersetzt werden. Dabei läßt sich ein Rechtecksignal $s(t)$, so wie es beispielsweise in Abbildung 28 a dargestellt ist, mit dem mathematischen Hilfsmittel der Fourier-Reihenentwicklung in eine Addition einzelner Sinusschwingungen zerlegen und sich ganz allgemein wie folgt darstellen:

$$s(t) = \frac{s}{2} + \frac{2 \cdot s}{\pi} \left[\cos(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t) + \frac{1}{3} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot f_0 \cdot t) + \frac{1}{5} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot f_0 \cdot t) + \dots \right] \quad (\text{Gl. 60})$$

Dabei stellt s die Amplitude des Pulses dar, während f_0 die Frequenz beschreibt. Wie leicht zu erkennen, ist das Erarbeiten der entsprechenden Formeln für die PAM, PFM und PPM durch das Einsetzen in die zugehörigen Gleichungen dann nur noch eine Fleißarbeit. Da diese für das Verständnis der verschiedenen Verfahren nur von untergeordneter Bedeutung sind, verzichten wir in diesem Artikel darauf und werden im folgenden die verschiedenen Verfahren anschaulich beschreiben.

Pulsfrequenz-Modulation

Bei der Pulsfrequenz-Modulation wird, wie es der Name schon sagt, die Frequenz der Pulse geändert, alle anderen Parameter bleiben unverändert. Beim unmodulierten Träger besitzen alle Pulse den gleichen zeitlichen Abstand T , der sich mit folgender Gleichung in die entsprechende Pulsfrequenz f_0 umrechnen läßt:

$$f_0 = \frac{1}{T} \quad (\text{Gl. 61})$$

Bei der Modulation mit dem Nachrichtensignal beeinflusst das modulierende Signal die Frequenz. Proportional zum Augenblickswert der Amplitude des modulierenden Signales ändert sich dann die Augenblicksfrequenz der Pulsfolge. Für die praktische Ausführung der Modulation ist es daher nur notwendig, einen spannungsgesteuerten Rechteckgenerator zu entwerfen. Der Steuerspannung wird dann das Modulationssignal überlagert und damit die Trägerfrequenz entsprechend beeinflusst.

Abbildung 26 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen frequenzmodulierten Rechtecksignales. Das hier dargestellte Trägersignal (26 a) wird durch das Basisbandsignal (26 b) in der Frequenz verändert und es entsteht das Ergebnis der Modu-

Tabelle 1: Übersicht der verschiedenen Pulsmodulationsverfahren

Parameter	Modulationsverfahren	Kurzbezeichnung
Amplitude	Pulsamplituden-Modulation	PAM
Frequenz	Pulsfrequenz-Modulation	PFM
Phase	Pulsphasen-Modulation	PPM
Dauer	Pulsdauer-Modulation	PDM
Codierung	Pulscodierung	PCM

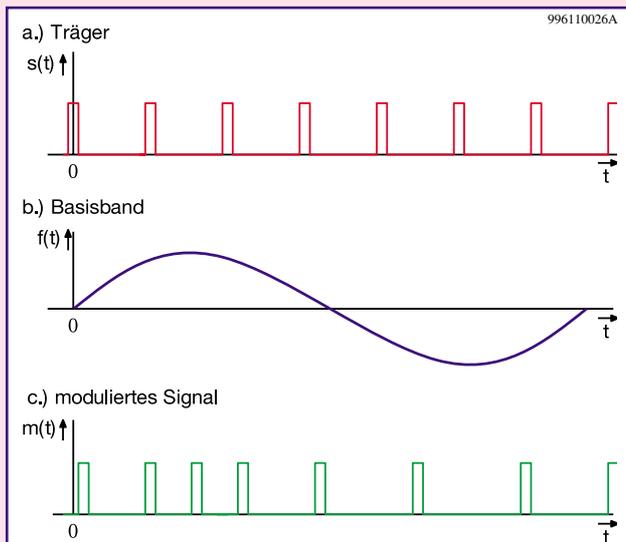


Bild 26:
Prinzip einer Pulsfrequenz-Modulation (PFM)

tisch bewiesen. Auf den Beweis wollen wir an dieser Stelle verzichten und die enge Verwandtschaft nur graphisch zeigen: Die nähere Betrachtung der in den Abbildungen 26 c und 27 c dargestellten Modulationsprodukte ergibt, daß diese beiden Signale nur zeitlich gegeneinander verschoben sind. Diese Verschiebung ergibt sich aus dem im Beispiel verwendeten Nachrichtensignal. Der sich dahinter verborgende allgemeine Zusammenhang ist die Integration des modulierenden Signales: Ein Nachrichtensignal, das nach Integration einer PPM zugeführt wird, erzeugt dasselbe Modulationsergebnis, wie eine PFM ohne vorherige Integration.

Pulsdauer-Modulation

Das einzige Pulsmodulationsverfahren, das kein entsprechendes Gegenstück in der Sinusträger-Modulation besitzt, ist die Pulsdauer-Modulation (PDM), die auch als Pulsweiten-Modulation (PWM) bezeichnet wird. Hier bleiben sowohl Amplitude als auch Frequenz und Phasenlage konstant, nur die Breite des Pulses wird in Abhängigkeit vom modulierenden Signal verändert. Dabei steckt die Information über die Amplitude in der Pulsbreite, d. h. das Tastverhältnis trägt die Information.

Die technische Realisierung ist dabei relativ einfach: Die Augenblicksamplitude des modulierenden Signales wird ständig mittels Komparator mit der Signalamplitude eines Rampensignales verglichen. Solange die Rampenspannung kleiner ist als der Amplitudenwert, ist der Ausgang des Komparators auf High-Potential. Erreicht der Rampenwert den Amplitudenwert, so schaltet der Komparator bis zum Beginn des nächsten Vergleichszyklus auf „Low“. Das so erzeugte modulierte Signal entspricht prinzipiell einer PDM. Dieses Verfahren wird sehr oft in der Steuerungs- und Regelungstechnik verwendet. So arbeiten beispielsweise viele Schaltnetzteile

lation (26 c). Anhand dieser Abbildung ist die Funktionsweise leicht nachvollziehbar: Ist das Basisbandsignal gleich Null, d. h. im Nulldurchgang, so ist die Frequenz des modulierten Signales gleich der Trägerfrequenz. Steigt die Amplitude des Basisbandsignales an, so erhöht sich auch die Frequenz wie in 26 c dargestellt. Erreicht das NF-Signal seinen maximalen Amplitudenwert, so ist auch die Frequenzabweichung des Trägers am größten. Sinkt umgekehrt die Amplitude des modulierenden Signales, so wird auch die Frequenz des Trägers kleiner. Im Minimum hat dann das FM-Signal seine kleinste Augenblicksfrequenz.

Wie leicht zu erkennen ist, ist die Frequenzabweichung des Trägers proportional zur Amplitude des NF-Signales, d. h. die Information des augenblicklichen Amplitudenwertes steckt im Frequenzhub, d. h. in der Abweichung zwischen Augenblicksfrequenz und unmodulierter Trägerfrequenz. Die Frequenz des Basisbandsignales läßt sich im zeitlichen Abstand zwischen den Frequenzminima im PFM-Signal wiederfinden, d. h. die Anzahl der maximalen positiven oder negativen Frequenzhübe pro Zeiteinheit ergibt die Frequenz des NF-Signales. Genauso wie die Frequenz- und Phasenmodulation sind auch die Pulsfrequenz- und Pulsphasen-Modulation sehr eng miteinander verwandt.

Pulsphasen-Modulation

Bei der Pulsphasen-Modulation erfolgt eine Änderung der Phasenlage des Pulses. In der Praxis heißt dies, daß der Puls innerhalb der Periodendauer verschoben wird, diese Verschiebung entspricht einer Phasenänderung. Abbildung 27 zeigt eine solche PPM, wobei der Nullphasenwinkel des Trägers im Modulationsergebnis (27 c) zum besseren Verständnis durch die gestrichelten Linien kenntlich gemacht ist. Der Phasenwinkel des Modulationsproduktes (27 c) weicht vom Phasenwinkel des Trä-

gers (27 a) um einen Betrag ab, der proportional zum Augenblickswert der Amplitude des modulierenden Signales (27 b) ist.

Am Beispiel des gezeichneten Sinussignales heißt dies: Im Nulldurchgang des Basisbandsignales kommt es zu keiner Beeinflussung, die Phasenwinkel von Träger und moduliertem Signal sind identisch. Mit steigender Amplitude des Basisbandsignales verändert sich die Phasenlage des modulierten Signales, es kommt zum Voreilen des Pulses. Wenn das Nachrichtensignal eine negative Amplitude besitzt, so wird der Puls um einen definierten Wert nacheilen. Bei allen Amplituden, die zwischen diesen Extremwerten liegen, ergibt sich eine entsprechende Phasenänderung zwischen diesen Maximalwerten.

Bei analogen Basisbandsignalen ergibt sich bei der Pulsphasen-Modulation eine kontinuierliche Änderung des Phasenwinkels, was prinzipiell einer Veränderung der Frequenz gleichkommt. Bereits beim Vergleich zwischen der Frequenz- und Phasenmodulation („ELVjournal“ 1/99 und 2/99) haben wir auf diesen Zusammenhang hingewiesen und ihn auch mathema-

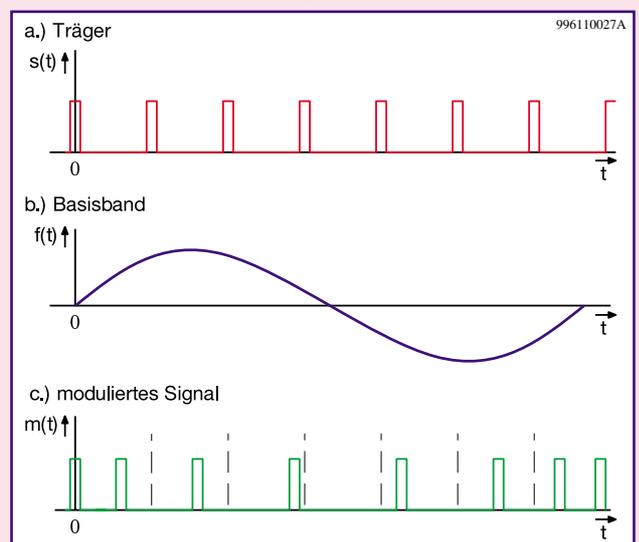


Bild 27:
Prinzip einer Pulsphasen-Modulation (PPM)

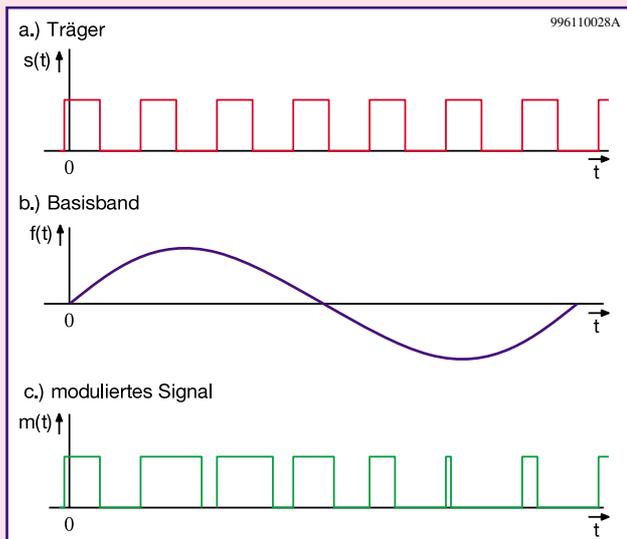


Bild 28:
Prinzip einer Pulsdauer-Modulation (PDM)

nach diesem Prinzip, man spricht dann von PWM-Reglern.

Die grafische Darstellung dieser Modulationsart zeigt Abbildung 28. Das unmodulierte Trägersignal (28 a) besitzt eine definierte Pulsdauer. Wird dieses pulsförmige Trägersignal einer PDM mit dem in Abbildung 28 b dargestellten Nachrichtensignal unterzogen, so entsteht das in Abbildung 28 c gezeigte Modulationsergebnis. Im Nulldurchgang des Quellensignales stellt sich die gleiche „Einschaltdauer“ ein, wie beim unmodulierten Träger. Positive Signalanteile im Nachrichtensignal führen dann dazu, daß sich die Pulsdauer vergrößert, negative Anteile sorgen für eine Verkleinerung der Pulsdauer. D. h. je positiver das Nachrichtensignal, desto länger dauert der Puls und umgekehrt.

Bei diesem Modulationsverfahren lassen sich die Auswirkungen einer Übermodulation sehr schön erkennen. Hier existieren zwei Extreme: Wenn das Nachrichtensignal einen extrem negativen Wert annimmt, wird sich kein Impuls ausbilden können - die Folge ist eine Null-Linie. Bei einem extrem großen Wert stellt sich demgegenüber ein fester Gleichspannungspegel mit dem Wert der Pulsamplitude ein. Beide Extreme lassen nicht mehr demodulieren, d. h., das Nachrichtensignal kann nicht zurückgewonnen werden. Hier ist ein großer Unterschied zu den anderen Verfahren zu sehen, da dort bei einer Übermodulation die Demodulation, wenn auch mit nichtlinearen Verzerrungen, möglich ist.

Pulsamplituden-Modulation

Die letzte hier beschriebene Art der Pulsmodulationsverfahren ist die PAM. Dieses Verfahren findet sein Einsatzgebiet hauptsächlich als Vorstufe zur Pulscode-Modulation. Bei der Pulsamplituden-Modulation wird der Träger in seiner Amplitude durch das Nachrichtensignal beeinflusst. Abbildung 29 zeigt ein PAM-Signal. Ohne

Modulation besitzt der Pulsträger (29 a) eine mittlere Amplitude (symmetrische Aussteuerung vorausgesetzt). Bei steigender Amplitude des Nachrichtensignales steigt auch die Trägeramplitude. Dementsprechend sorgt dann die negative Auslenkung des Quellensignales für eine Verkleinerung des Trägers.

Im einfachsten und am häufigsten zu findenden Fall erfolgt aber nur eine Abtastung des Quellensignales, d. h., das Signal wird im Takt des Pulsträgers auf den Modulatorausgang geschaltet. Im Ergebnis sieht dies dann so aus, daß der Träger für die Dauer des Pulses die Amplitude des modulierenden Signales annimmt, d. h., es werden in definierten Abständen Amplitudenproben aus dem Quellensignal genommen. In der Literatur erfolgt die Abhandlung dieses Verfahrens unter dem Stichwort Abtastung.

In diesem Zusammenhang erfolgt nun die auch für die bisher beschriebenen Pulsmodulationsarten geltende kurze Beschreibung der zu beachtenden Parameter. Der wichtigste Faktor ist dabei die Wahl der Abtastfrequenz f_T , auch Abtastrate r genannt, d. h., die Festlegung des zeitlichen Abstandes zwischen den die Information

tragenden Pulsen. Wie man beispielsweise leicht aus dem Bild der PAM (Abbildung 29) erkennen kann, würde ein Puls pro Periodendauer des Quellensignales nicht ausreichen, um daraus später die ursprüngliche Kurvenform rekonstruieren zu können. Das Signal unterliegt dann einer sogenannten Unterabtastung. Im anderen Extrem ist die Rückgewinnung des Quellensignales bei sehr vielen Abtastungen wohl sehr einfach, man hat aber auch extrem viele Abtastimpulse zu bearbeiten, man spricht dann von einer Überabtastung. Bei der Festlegung der optimalen Abtastfrequenz ist die maximale Frequenz des zu übertragenden Nachrichtensignales von grundlegender Bedeutung.

Eine Abtastung ist, im Frequenzbereich betrachtet, eine, wie schon bei anderen Modulationsverfahren kennengelernt, Verschiebung des Basisbandes (Nachrichtensignal) in einen höheren Frequenzbereich. Dabei legt die Abtastrate fest, wohin das Nachrichtensignal im Frequenzspektrum verschoben wird. Ein Gedankenexperiment mit dem in Abbildung 30 a dargestellten Spektrum einer „normalen“ Abtastung, führt dann auf nichtmathematische Weise zur Festlegung der minimal notwendigen Abtastrate r : das grün dargestellte Basisband besitzt die obere Grenzfrequenz f_g , d. h., es besitzt keine Signalanteile mit höheren Frequenzen. Die Abtastung verschiebt dieses Basisbandspektrum u. a. an die Stelle f_T (rot dargestellt). Die Lücke zwischen den beiden Spektren zeigt, daß sie sich nicht gegenseitig beeinflussen.

Eine Verkleinerung der Abtastfrequenz (-rate) f_T hat zur Folge, daß diese Lücke immer kleiner wird. Dabei ist zunächst der in Abbildung 30 b dargestellte Sonderfall zu betrachten. Hier schließen die beiden Spektren direkt aneinander an. In diesem Fall ist die Abtastfrequenz gleich der doppelten maximalen Signalfrequenz, man spricht dann von einer Abtastung mit Nyquist-Rate:

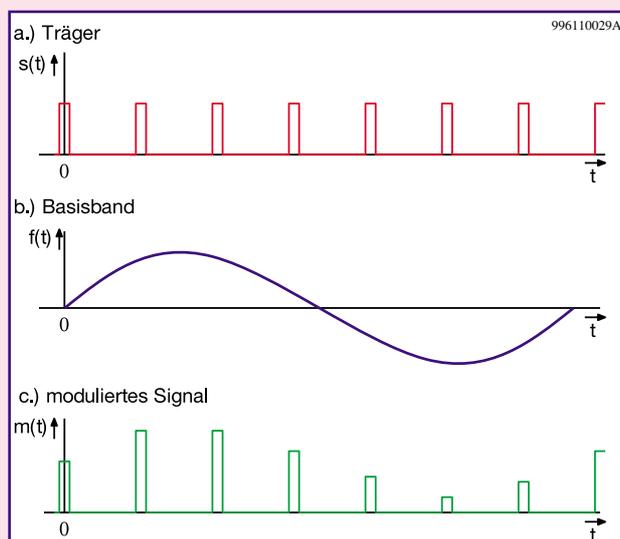


Bild 29:
Prinzip einer Pulsamplituden-Modulation (PAM)

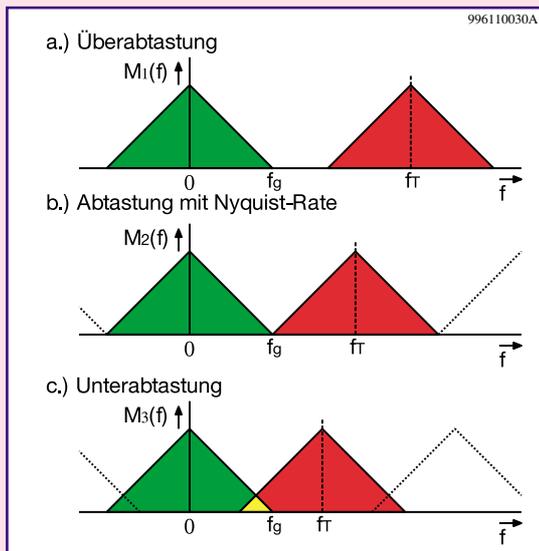


Bild 30: Darstellung der Abtastung im Frequenzspektrum

$$r = f_r = 2 \cdot f_g \quad (\text{Gl. 62})$$

Wird die Abtastrate weiter verkleinert, so kommt es zu der in 30 c dargestellten Überlappung der Spektren (gelb), die eine Verzerrung des Quellensignales zur Folge hat. Man spricht dann von einer Unterabtastung und Aliasing. Eine korrekte Abtastung ist daher nur bei Abtastraten zu erreichen, die folgender Gleichung genügen:

$$r = f_r \geq 2 \cdot f_g \quad (\text{Gl. 63})$$

Umgekehrt kann man natürlich auch eine Abtastrate vorgeben. Hier muß dann die Bandbreite des Quellensignales eingeschränkt werden, d. h. mittels Tiefpaßfilterung auf einen Wert f_g beschränkt werden. Ein solcher Filter wird dann Anti-Aliasing-Filter genannt, da genau das in Abbildung 30 c dargestellte Aliasing verhindert wird.

In der Audio-CD-Technik finden sich die beiden hier erläuterten Parameter und Zusammenhänge auch wieder: Die obere Grenzfrequenz des Audiosignales ist auf 20 kHz begrenzt und die Abtastrate auf 44,1 kHz festgelegt. Somit wird die, eine korrekte Abtastung beschreibende Gleichung, Gl. 63 erfüllt. Hier ist die Abtastung jedoch nur ein Zwischenschritt der dort zur Anwendung kommenden Pulscode-Modulation.

Pulscode-Modulation

Die Pulscode-Modulation besteht aus

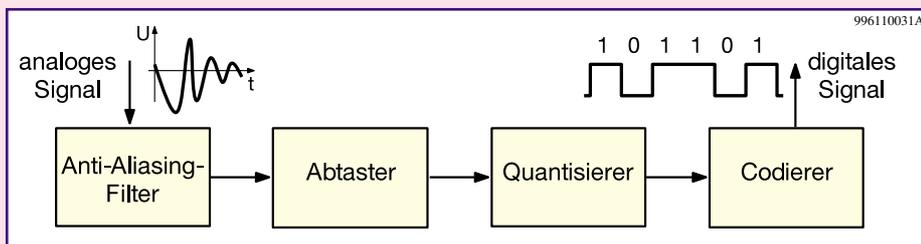


Bild 31: Schema einer Pulscode-Modulation (PCM)

mehreren Schritten: der Abtastung, der Quantisierung und der Codierung. Ziel ist es dabei, aus einem analogen, d. h. zeitkontinuierlichen und wertkontinuierlichen Quellensignal, ein zeit- und wertdiskretes Signal zu bilden. Simplifiziert heißt dies aus einem analogen Signal eine Folge von Nullen und Einsen zu machen.

Die prinzipielle Abfolge zeigt dabei Abbildung 31. Dabei entsprechen Anti-Aliasing-Filterung und Abtastung dem im Abschnitt PAM beschriebenen Verfahren. Das Ergebnis dieser Abtastung ist ein Signal, das zeitdiskret und wertkontinuierlich ist: Es ist nur zu bestimmten Zeitpunkten vorhanden, kann aber jeden beliebigen (Amplituden-)Wert im Aussteuerungsbereich annehmen.

Soll jetzt für eine Übertragung nicht der Amplitudenwert an sich, sondern ein Codewort, das diesen Wert repräsentiert, gesendet werden, so wären unendlich viele Codewörter notwendig, da alle Amplitudenwerte innerhalb des Aussteuerungsbereichs vorhanden sind. Um eine in der Praxis brauchbare Übertragung zu erreichen, muß eine Einschränkung der Anzahl der Codewörter und dementsprechend eine Einschränkung der Amplitudenwerte erfolgen. Dieses liefert eine Quantisierung.

Eine Quantisierung ist im Prinzip ein Rundungsvorgang. Dabei werden die Amplitudenwerte aus der Abtastung auf einen zugelassenen Wert gerundet. Dieser Wert wird Quantisierungsstufe genannt und jedem dieser Stufen wird in der nachfolgenden Codierung ein Codewort zugeordnet. Soll das Codewort beispielsweise aus vier Bit bestehen, so ergeben sich 16 verschiedene Codewörter und dementsprechend 16 Quantisierungsstufen. Der wertkontinuierliche Abtastwert wird in der Quantisierung also auf den nächstgelegenen der 16 Werte gerundet. Übertragen wird dann anschließend das dieser Quantisierungsstufe zugeordnete Codewort, üblicherweise in binärer Form, d. h. es existieren nur die Zustände 0 und 1 auf dem Übertragungskanal.

Es ist sofort einsichtig, daß der beim Rundungsvorgang der Quantisierung ent-

standene Fehler nicht mehr rückgängig gemacht werden kann. Es ergibt sich somit ein systembedingter Fehler, der sich als Rauschen auswirkt, dem sogenannten Quantisierungsrauschen. Je kleiner der Rundungsfehler ist, desto kleiner ist auch das systembedingte Rauschen. Kleine Rundungsfehler ergeben sich nur, wenn der Aussteuerungsbereich in möglichst viele Quantisierungsstufen unterteilt wird. Dies hat aber auch zur Folge, daß ein entsprechend langes Codewort verwendet werden muß.

Der in der Übertragungstechnik wichtige Parameter des Signal-/Rauschverhältnisses ist durch die Quantisierung vorgegeben. Stehen n Bit für die Codierung zur Verfügung, so ergibt sich die Anzahl der existierenden Quantisierungsschritte mit:

$$L = 2^n \quad (\text{Gl. 64})$$

Das Signal-/Rauschverhältnis berechnet sich dann ganz einfach über:

$$S/N \approx n \cdot 6\text{dB} \quad (\text{Gl. 65})$$

Am Beispiel der Audio-CD-Technik erfolgt nun abschließend eine Zusammenfassung zur Pulscode-Modulation: Das analoge Audiosignal wird zunächst auf eine maximale obere Grenzfrequenz von 20 kHz begrenzt (Anti-Aliasing-Filterung). Anschließend erfolgt die Abtastung mit einer Abtastrate von 44,1 kHz. Das so gewonnene Signal wird einer 16Bit-Quantisierung zugeführt, d. h. es stehen lt. Gleichung 64 65535 Quantisierungsstufen zur Verfügung. Die Rundung des Abtastwertes erfolgt somit auf den nächstgelegenen Wert. Das dabei entstehende Rauschen sorgt dann dafür, daß sich nach Gleichung 65 maximal ein Signal-/Rauschabstand von 96 dB ergeben kann. Anschließend muß dann ein 16Bit-Datenwort übertragen werden, das nur noch die binären Zustände 0 und 1 kennt.

Mit diesen Betrachtungen zu den Pulsmodulationsverfahren schließen wir die Artikelserie Modulationsverfahren ab. Es gibt noch eine Vielzahl weiterer Verfahren und Varianten und fast täglich kommen neue hinzu. Viele beruhen aber prinzipiell auf eine der hier vorgestellten Arten oder ergeben sich aus deren Kombination. Beginnend mit den rein analogen Systemen der Amplituden-, Phasen- und Frequenzmodulation über die Methoden mit digitalen Nachrichtensignalen (Amplituden-, Frequenz- und Phasenumtastung) bis hin zu den Pulsmodulationsarten haben wir aber alle wesentlichen Modulationsverfahren beschrieben. Somit hat der interessierte Leser ein umfassendes und leicht verständliches Nachschlagewerk zu diesem Themengebiet.