

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Band: 44 (1966)

Heft: 6

Artikel: Grundlegende Eigenschaften der Pulsmodulation = Caractéristiques de la modulation par impulsions codées

Autor: Weber, Heinrich

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874575>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 13.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Grundlegende Eigenschaften der Pulscodemodulation

Caractéristiques de la modulation par impulsions codées

Zusammenfassung. Die grundlegenden Eigenschaften der PCM werden besprochen. Die Quantisierung der Amplitude der amplitudenmodulierten Impulse der einzelnen Kanäle sowie die Codierung wird erörtert. Die durch die Quantisierung entstehende Verzerrung wird definiert und Massnahmen angegeben, um sie klein zu halten. Das von W. Bleickardt vorgeschlagene Verfahren, die logarithmische Unterteilung der Amplitude durch eine stückweise lineare Approximation zu verwirklichen, wird besprochen und die Verzerrungen für eine Näherung durch drei lineare Teilstücke angegeben. Die Übertragungseigenschaften und die Anfälligkeit des Systems gegenüber äusseren Störungen werden umschrieben.

Résumé. Les caractéristiques de la modulation par impulsions codées sont décrites. La quantification de l'amplitude des impulsions modulées en amplitude des différents canaux est traitée ainsi que le codage. Les distorsions propres au système dues à la quantification sont définies ainsi que les moyens d'en maintenir la valeur petite. L'approximation de la subdivision logarithmique de la plage des amplitudes par des sections linéaires est décrite. La proposition de W. Bleickardt de faire l'approximation par trois sections linéaires est analysée et les distorsions établies. Les caractéristiques de transmission du système PCM sont déterminées ainsi que sa sensibilité par rapport à des perturbations extérieures.

Riassunto. Vengono descritte le caratteristiche fondamentali della modulazione a codice d'impulsi (PCM). La quantizzazione dell'ampiezza degli impulsi modulati in ampiezza dei singoli canali viene trattata, come pure la codificazione. Le distorsioni dovute alla quantizzazione vengono definite e i provvedimenti per mantenerle a un livello minimo sono indicati. Viene discusso il metodo proposto da W. Bleickardt consistente nel realizzare la suddivisione logaritmica dell'ampiezza con un'approssimazione a tratti lineare; le distorsioni per un'approssimazione in tre tratti lineari vengono indicate. Sono infine descritte le caratteristiche di trasmissione e la vulnerabilità del sistema rispetto alle perturbazioni esteriori.

1. Einleitung

Wenn man heute über die Pulscodemodulation spricht, so meint man damit ein neues Modulationssystem, mit dessen Hilfe Sprache, Musik, Bild usw. übertragen wird. In der Messtechnik ist die Pulscodemodulation als Übertragungsmittel schon länger bekannt. So wurden beispielsweise Wasserstandsmeldungen in den dreissiger Jahren durch Impulse, das heisst digital über Telephonleitungen übermittelt. Vor 25 Jahren wurde dann vorgeschlagen, dieses digitale Übertragungssystem auch für Sprache und

1. Introduction

La modulation par impulsions codées (PCM) est un système moderne de modulation permettant la transmission de la parole, de la musique et de l'image. La technique des mesures à distance connaissait déjà depuis assez longtemps la modulation par impulsions codées comme moyen de transmission. Ainsi, faisait-on déjà usage d'impulsions dans les années trente pour la retransmission de niveaux d'eau par lignes téléphoniques. Il y a environ 25 ans que l'on proposa d'appliquer cette méthode digitale à la transmission

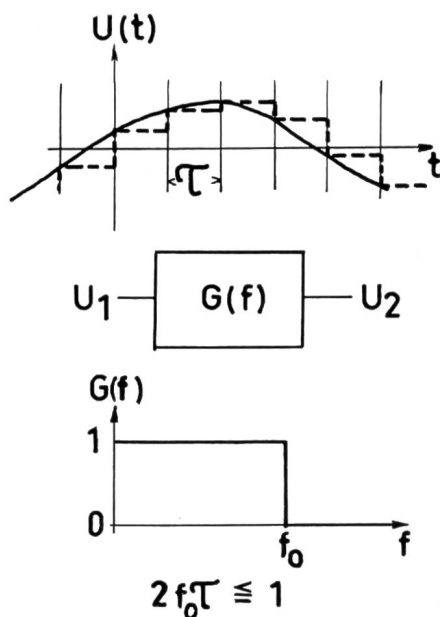


Fig. 1

Abtasttheorem
Théorème de l'échantillonnage

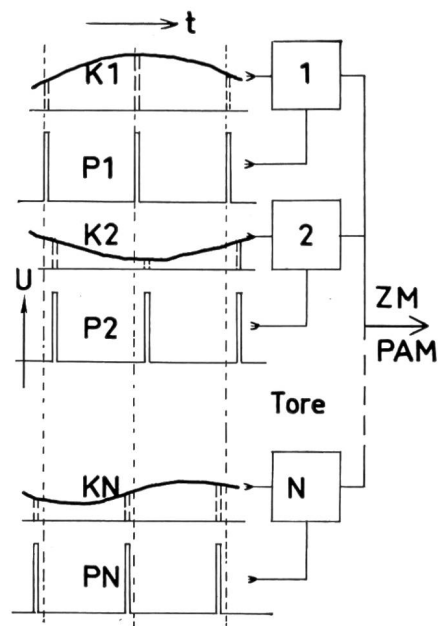


Fig. 2

Zeitmultiplex Amplitudenmodulation (ZM PAM)
Multiplexage dans le temps des impulsions modulées en amplitude

andere zeitliche Vorgänge zu verwenden. Da das Verfahren etwas aufwendig ist, lohnt es sich nur, wenn mit demselben Verfahren mehrere Nachrichtenkanäle zugleich auf derselben Leitung übertragen werden können. Als Vorstufe dient die sogenannte Quantisierung in der Zeit. Anlässlich einer früheren Schweizerischen Tagung für Elektrische Nachrichtentechnik (STEN) hatte der Vortragende Gelegenheit, die Quantisierung in der Zeit zu erklären. Das Prinzip sei hier kurz erläutert.

In *Figur 1* ist eine zeitliche Funktion der Eingangsspannung als analoge, stetige Funktion (ausgezogen) und als Treppenkurve (gestrichelt) wiedergegeben. Werden die beiden zeitlichen Vorgänge durch ein bandbegrenztes Übertragungssystem (idealer Tiefpass) übermittelt, dessen Bandgrenze mit der zeitlichen Folge der Stufen eine bestimmte Ungleichung erfüllt, dann wird der Empfänger am Ausgang keinen Unterschied feststellen können. Infolgedessen genügt es, wenn der Amplitudenwert jeder Stufe mit einem sehr kurzen Impuls übertragen wird.

Die Zusammenfassung von vielen Nachrichtenkanälen im Zeitmultiplexverfahren ist durch die *Figur 2* dargestellt. Die Abtastung der einzelnen Signale geschieht zu verschiedener Zeit. Sämtliche N Kanäle müssen innerhalb der Abtastzeit, die der Bandbreite des einzelnen Kanals entspricht, abgetastet werden. Man erhält damit ein in der Zeit verschachteltes pulsamplitudenmoduliertes System aller N Kanäle.

2. Quantisierung der Amplitude

Unter der Voraussetzung, dass nur positive Pulsamplituden im Zeitmultiplex vorkommen, und dass

de la parole et d'autres fonctions du temps. Le procédé étant onéreux, il ne se justifie que s'il permet la transmission simultanée de plusieurs canaux d'information. Préalablement, il y a lieu de procéder à la quantification dans le temps. Le soussigné a eu l'occasion d'en traiter le principe au cours d'une «Journée Suisse de la Technique des Télécommunications». Il est en bref le suivant :

La *figure 1* représente un signal électrique donné sous forme d'une fonction analogue continue (ligne entière) et comme fonction en échelons (ligne interrompue). Donnons les deux signaux sur un système de transmission limitant la bande passante (filtre passe-bas idéal), dont la fréquence de coupure est liée par une certaine relation à la séquence du signal, alors le récepteur ne révélera pas de différences entre les deux signaux à la sortie. Il en résulte qu'il suffira de transmettre la valeur de l'amplitude de chaque échelon par une impulsion de durée très courte.

La *figure 2* représente le multiplexage de plusieurs canaux d'information dans le temps. Le balayage de chaque signal s'effectue à des temps différents. Les N canaux doivent être balayés dans l'intervalle de temps correspondant à la largeur de la bande passante de chaque canal particulier. On obtient ainsi le système d'impulsions des N canaux modulés en amplitude et emboîtés les uns dans les autres par rapport au temps.

2. La quantification de l'amplitude

A la condition de n'avoir que des impulsions multiplexées dans le temps de valeur positive et qu'il soit possible d'en limiter les amplitudes entre une valeur maximale et une valeur minimale, il nous sera alors facile d'en diviser la plage en m parties. La *figure 3* en démontre le principe. U_1 est l'amplitude d'une impulsion particulière, elle est donnée dans le codeur C . Ce dernier communique dans quelle division se trouve l'amplitude de l'impulsion considérée. Le récepteur contient un décodeur DC qui restaure la tension U_2 . Cette tension U_2 sera fixée et restera invariable dans sa grandeur aussi longtemps que l'amplitude de l'impulsion à l'entrée du codeur restera à l'intérieur de la subdivision correspondante. Nous reviendrons plus loin sur la conséquence des petites différences entre les tensions d'entrée et de sortie. Voyons d'abord comment il est possible de transmettre l'ordre de la plage d'amplitude dans laquelle se trouve l'impulsion d'entrée. Nous connaissons de nombreuses solutions. Le cas est semblable à celui de la transmission des 26 lettres de l'alphabet, plus les 10 chiffres ainsi que les signes de ponctuation. Le problème a été résolu depuis longtemps par l'alphabet Morse (point, trait, pause = code ternaire) ou par le téléscripteur (Baudot, code binaire à 5 éléments). Nous employons également dans notre système PCM un code binaire pour la transmission de nos m valeurs d'amplitudes. Nous pouvons désigner ainsi avec 5 éléments 32 valeurs, avec 6 éléments 64 et avec 7 éléments 128 valeurs différentes. Le cas $m=128$, donc

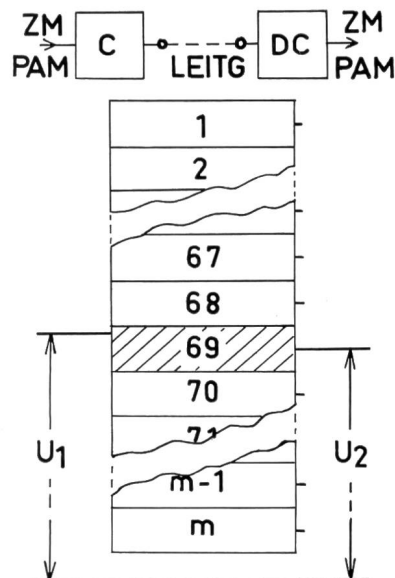


Fig. 3

Amplitudenquantisierung
Quantification de l'amplitude

- U_1 Eingangsimpuls - Impulsion d'entrée
- U_2 Ausgangsimpuls - Impulsion de sortie
- C Coder - Codeur
- DC Decoder - Décodeur

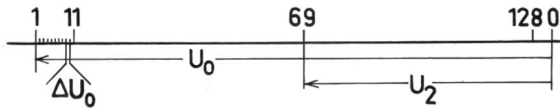


Fig. 5

Bildungsgesetz der Ausgangsgröße beim binären natürlichen Code
 $U_2 = U_0 - 68 \Delta U_0$; $68 = 2^6 + 2^2$
 an 1. + 5. Stelle ein Impuls

Formation du signal de sortie dans le code binaire naturel
 $U_2 = U_0 - 68 \Delta U_0$; $68 = 2^6 + 2^2$
 Une impulsion à la 1^{re} et à la 5^e place

U_0 Vorspannung - Polarisation

wir den Amplitudenbereich begrenzen können zwischen einer Minimal- und einer Maximal-Amplitude, bleibt es uns unbenommen, diesen Bereich in m Teilbereiche zu unterteilen. Ein entsprechendes Schema zeigt *Figur 3*. U_1 ist die Amplitude eines einzelnen Impulses, diese wird einem Coder C zugeführt. Der Coder teilt dem Empfänger über die Leitung mit, in welchem Bereich die Eingangsamplitude des Einzelimpulses liegt. Der Empfänger enthält eine Einrichtung, den Decoder DC , die wieder eine Spannung U_2 herstellt. Allerdings ist diese Spannung U_2 fixiert und unveränderlich, solange die Pulsamplitude am Eingang im gleichen Teilbereich liegt. Auf die sich ergebenden kleinen Unterschiede zwischen der Ausgangspulsspannung und der Eingangspulsspannung werden wir später eingehen. Zunächst wenden wir uns der Frage zu, auf welche Weise die Mitteilung des Teilbereiches, in dem der Eingangsimpuls liegt, vorgenommen wird. Hier stehen der Technik viele Lösungen offen. Das Problem ist verwandt mit der Aufgabe, die 26 Buchstaben der Sprache plus 10 Ziffern plus Satzzeichen zu übermitteln. Diese Aufgabe ist beim Telegraphen schon längst gelöst mit Hilfe des Morse-Codes (Punkt, Strich, Pause = ternärer Code) oder im Fernschreiber (Baudot, binärer Code mit 5 Stellen). Für die Mitteilung unserer m Teilbereiche benutzen wir ebenfalls einen binären Code, wobei wir mit 5 Stellen 32, mit 6 Stellen 64, mit 7 Stellen 128 usw. Teilbereiche bezeichnen können. Der Fall von $m=128$, also ein 7stelliger binärer Code, ist in *Figur 4* dargestellt, wobei das Bildungsgesetz, das zur Herstellung der Ausgangsspannung beim Decoder dient, aus *Figur 5* hervorgeht. Hier wurde der natürliche binäre Code verwendet. Es sind aber auch andere Codierungsarten, das heisst andere Bildungsgesetze, ohne weiteres möglich und unter Umständen sogar vorteilhafter. Da wir bei der Übermittlung von Sprache nur den Wechselanteil herstellen müssen, ist beim Decoder die Wahl der Vorspannung U_0 unwichtig. Dieser 7stellige Code muss für jeden angebotenen Impuls in einer Zeit hergestellt werden, die beim Multiplexsystem der Abtastzeit τ , dividiert durch die Zahl N der Kanäle entspricht.

3. Systemverzerrung

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt wurde, ist die vom Empfänger rekonstruierte Pulsamplitude im

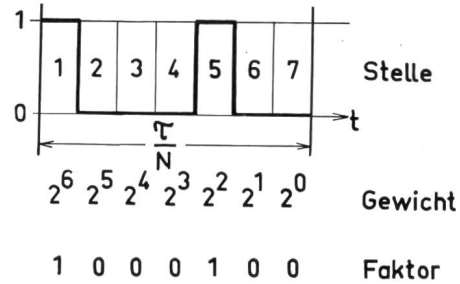


Fig. 4

Binärer, natürlicher Code
 Code binaire naturel

Stelle - Position des éléments
 Gewicht - Poids
 Faktor - Facteur

celui d'un code binaire à 7 éléments, est représenté à la *figure 4*. La *figure 5* illustre la relation qui permet au décodeur de reconstituer la tension de sortie. Ici, nous avons fait usage d'un code binaire naturel. Cependant, il est également possible d'utiliser d'autres codes qui peuvent même être plus avantageux. La polarisation U_0 dans le décodeur ne joue pas de rôle, car nous n'avons qu'à transmettre des variations de tension. Les 7 éléments de notre code doivent être formés dans un intervalle de temps égal au temps de balayage τ du système divisé par le nombre N des canaux.

3. Les distorsions du système

Nous avons démontré plus haut qu'il existait en général une petite différence entre l'amplitude des impulsions régénérées par le décodeur et celles à l'entrée du codeur (*fig. 6*). Pour en illustrer l'effet, nous choisissons un système dont la plage des amplitudes possibles est divisée en 8 parties seulement (code binaire à 3 éléments). La tension U_1 représente la tension d'entrée. Le décodeur reproduit une impulsion d'amplitude U_2 . Formons la tension en échelons à partir de ces impulsions. Nous obtiendrons alors à la sortie du filtre passe-bas le signal continu représenté par la courbe pointillée de la *fig. 6*. La différence de la tension U_2 par rapport à la tension U_1 est une perturbation ou une distorsion propre à notre système. Les conséquences de cette distorsion ainsi que les moyens d'en réduire la valeur sont les suivants :

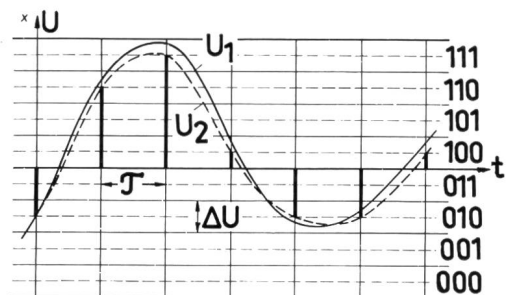


Fig. 6

Systemeigene Verzerrung
 Distorsion propre au système

allgemeinen nicht ganz dieselbe wie die Pulsamplitude am Eingang des Coders. *Figur 6* illustriert dies. Um den Effekt deutlich zu zeigen, sind nur acht Bereiche gewählt worden, mit den entsprechenden Codebezeichnungen (dreistelliger binärer Code). Die Spannung U_1 sei das Eingangssignal. Durch den Decoder werden die Spannungspulse U_2 reproduziert. Erweitert man diese Impulse zur Treppenkurve, so werden wir nach dem Begrenzungsfiler ein stetiges Signal erhalten, das durch die gestrichelte Kurve in *Figur 6* dargestellt ist. Die Differenz der Kurve U_2 gegenüber der Kurve U_1 ist eine Störspannung oder auch eine systemeigene Verzerrung. Wie diese Verzerrung sich auswirkt und auf welche Weise versucht wird, diese Verzerrung unmerkbar zu machen, soll im folgenden dargestellt werden.

Bisher haben wir eine lineare Unterteilung des gesamten zu übertragenden Amplitudenbereiches betrachtet. Eine solche lineare Unterteilung ist z. B. zur Übertragung von Messwerten durchaus richtig, weil der grösste entstehende Fehler auf die maximale Amplitude bezogen wird (Endausschlag des Instrumentes). Für viele Anwendungen und besonders zur Übermittlung von Sprache ist eine ungleichmässige Unterteilung des gesamten Amplitudenbereiches vorteilhafter, weil es mehr auf die relativen Abweichungen von Ausgang zu Eingang ankommt als auf die absoluten (*Fig. 7*). Man muss deshalb entweder das Eingangssignal komprimieren oder im Coder die entsprechenden ungleichmässigen Teilbereiche codieren. In *Figur 8* sind diese beiden Möglichkeiten dargestellt, wobei natürlich auf der Empfängerseite eine entsprechende Expandierung stattfinden muss. Solche momentan wirkenden Kompressoren und Expander können durch Dioden-Widerstands-Netzwerke verwirklicht werden. Im zweiten Fall muss der Coder beziehungsweise der Decoder eine entsprechende Einrichtung haben, um den gleichen Effekt zu erzielen.

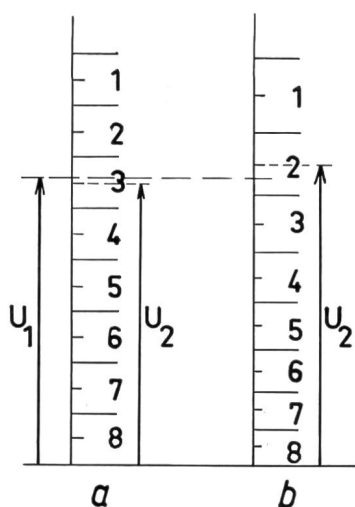


Fig. 7

Lineare (a) und nichtlineare (b) Unterteilung des Amplitudenbereiches

Division linéaire (a) et non linéaire (b) de la plage des amplitudes

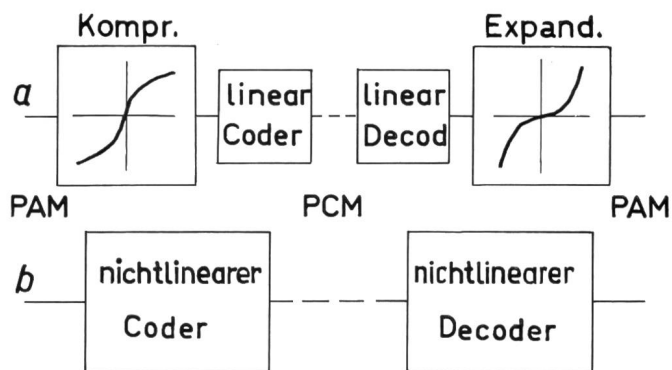


Fig. 8

Übertragungssysteme mit nichtlinearer Unterteilung: a mit momentan wirkenden nichtlinearen Netzwerken; b mit Coder und Decoder, bei denen die Nichtlinearität in den logischen Schaltungen enthalten ist

Système de transmission à division non linéaire: a réalisé à l'aide de réseaux non linéaires à action momentanée; b avec codeur et décodeur réalisant la non-linéarité dans la partie logique

Kompressor – Compresseur
Linearer Coder – Codeur à action linéaire
Expander – Expansieur

Nous avons choisi jusqu'ici une subdivision linéaire de la plage des amplitudes à transmettre. Une pareille division est parfaitement adaptée par exemple à la transmission de mesures, car la plus grande erreur produite sera mise en rapport à la valeur maximale de l'amplitude (déviations maximale d'un instrument). Dans beaucoup de cas, en particulier pour la transmission de la parole, une subdivision non linéaire de la plage des amplitudes sera mieux adaptée, car ce seront les fautes relatives et non les fautes absolues qui entreront en ligne de compte (*fig. 7*). Il faudra alors, soit comprimer la tension d'entrée, soit choisir dans le codeur une loi de subdivision correspondante. La *figure 8* illustre ces deux possibilités. Le récepteur devra dans tous les cas produire l'expansion nécessaire. De pareils compresseurs et expansieurs à action momentanée se réalisent facilement à l'aide de diodes et de résistances. Pour obtenir le même résultat, le codeur et le décodeur devront être munis dans le deuxième cas de caractéristiques correspondantes.

La *figure 9* nous montre la façon de déterminer les distorsions. Le schéma n'est cependant valable que pour les distorsions momentanées qui seront différentes pour chaque valeur de l'impulsion d'entrée. La valeur momentanée de la distorsion relative est particulièrement importante. Pour la transmission de signaux alternatifs tels que ceux de la parole ou de la musique, il suffit de mettre en rapport cette distorsion à la valeur de l'amplitude du signal. Il existe une valeur momentanée maximale de la distorsion relative pour chaque valeur momentanée du signal. Elle est définie par le rapport de la demi-largeur de l'intervalle à l'amplitude de l'impulsion. Nous pouvons exprimer la distorsion relative aussi bien par rapport à la valeur de l'impulsion d'entrée que par rapport à la valeur de l'impulsion de sortie. Si la largeur de l'inter-

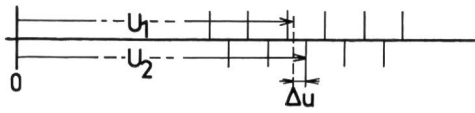


Fig. 9

Definition der Systemverzerrung

$$\Delta u = U_2 - U_1; \frac{\Delta u}{U_1} : \text{momentane relative Verzerrung;}$$

$$\frac{\Delta u_0}{2U_1} : \text{maximale momentane relative Verzerrung}$$

Définition de la distorsion propre au système

$$\Delta u = U_2 - U_1; \frac{\Delta u}{U_1} : \text{distorsion relative momentanée}$$

$$\frac{\Delta u_0}{2U_1} : \text{distorsion relative momentanée maximale}$$

In *Figur 9* ist dargestellt, wie die Verzerrung berechnet werden kann. Das Schema gilt allerdings nur für die momentane Verzerrung, die für jeden Eingangsimpuls wieder anders sein wird. Wichtig für die weitere Betrachtung ist der Ausdruck der momentanen relativen Verzerrung. Bei der Übermittlung von reinen Wechselstromsignalen, wie Sprache und Musik, muss diese Verzerrung nur auf die Wechselamplitude bezogen werden. Für jeden Momentanwert gibt es eine maximale, momentane, relative Verzerrung. Sie ist gegeben durch das Verhältnis der halben Breite des Teilbereiches zur Amplitude des Pulses. Solange die Breite des Teilbereiches klein ist gegen die Amplitude, ist es gleichgültig, ob wir die relative Verzerrung mit der Eingangs- oder Ausgangspulsamplitude berechnen. Übertragen wir zum Beispiel irgendwelche rechteckförmigen Signale mit statistisch gleich verteilter Amplitude, so würde in einem Teilbereich für eine bestimmte maximale Amplitude die Abweichung durch einen Mittelwert, nämlich den Effektivwert Δu_{eff} ausdrückbar, der in Beziehung mit dem Effektivwert der Ausgangsspannung gebracht wird. (Bei rechteckförmigem Signal mit kleiner Amplitudenvariation ist der Effektivwert sehr wenig vom Mittelwert verschieden.) Man kann damit von einem verallgemeinerten Klirrfaktor sprechen und dieser würde dann für eine rechteckförmige Signalspannung lauten:

$$D = \frac{100 \Delta u_0}{2\sqrt{3} U_2} [\%]$$

Wählen wir eine lineare Unterteilung, so ist Δu_0 konstant. Der Klirrfaktor nimmt reziprok mit der Ausgangsspannung zu, das heisst: bei kleinen Amplituden grosser Klirrfaktor, bei grossen Amplituden kleiner Klirrfaktor. Wählen wir eine logarithmische Bereichsunterteilung, so wird das Verhältnis von Δu_0 zu U_2 konstant. Der Klirrfaktor wäre damit im Bereich der logarithmischen Unterteilung konstant.

4. Bereichsunterteilung zur Übermittlung von Sprach- und Musiksignalen

Betrachtet man die Eigenschaften des Ohres, so findet man, dass bei Anwesenheit starker Signale, schwache Signale nicht mehr wahrgenommen werden.

valle est petite par rapport à l'amplitude, le résultat sera pratiquement le même. Transmettons p. ex. un signal rectangulaire quelconque dont l'amplitude varie statistiquement. Nous pouvons alors exprimer pour une amplitude maximale l'erreur par sa valeur moyenne, c'est-à-dire sa valeur effective ΔU_{eff} qui sera mise en rapport avec la valeur effective de la tension de sortie. (La valeur effective ne différera que très peu de la valeur moyenne pour des signaux rectangulaires dont l'amplitude ne varie que faiblement.) Il sera donc possible de définir un facteur généralisé de distorsion dont la valeur sera, pour des signaux de forme rectangulaire:

$$D = \frac{100 \Delta u_0}{2\sqrt{3} U_2} [\%]$$

Δu_0 est constant pour une subdivision linéaire. Le facteur de distorsion augmente dans ce cas inversement à la tension de sortie, c'est-à-dire qu'il sera grand pour une tension de sortie petite et qu'il sera petit pour une tension de sortie grande. En choisissant une subdivision logarithmique, nous obtenons un rapport de Δu_0 par U_2 constant, le facteur de distorsion le sera également.

4. Subdivision nécessaire à la transmission de la parole et de la musique

En considérant les caractéristiques de l'oreille, on constate qu'elle ne perçoit plus des signaux faibles s'il sont reçus simultanément avec des signaux forts. Il s'agit de l'effet de masque. L'analyse du spectre de la parole nous montre que les voyelles sont riches en énergie, mais que leur forme est en général plus simple. Les consonnes sont en revanche moins riches en énergie, mais ont un spectre très compliqué et riche en fréquences élevées. La parole ne produit jamais de consonnes et de voyelles simultanément. Les distorsions n'altèrent que peu les consonnes. L'oreille ne percevra donc pas les distorsions de la parole produites par le système si nous les maintenons petites et indépendantes de l'amplitude du signal. Il nous faut par conséquent faire usage d'une division logarithmique de la plage des amplitudes avec une subdivision suffisamment fine pour assurer une transmission excellente (*fig. 10*).

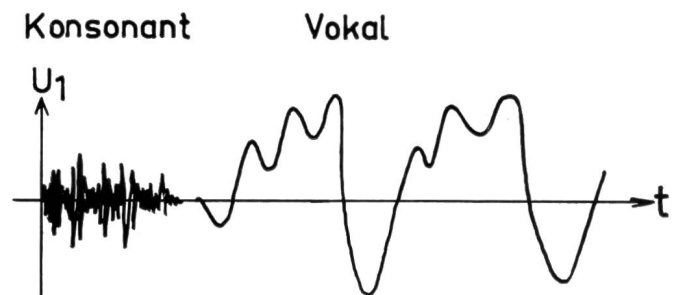


Fig. 10

Oszillogramm der Sprache
Oscillogramme de la parole

Konsonant - Consonne
Vokal - Voyelle

Man nennt dies «Verdeckung». Analysiert man das Oszillogramm der Sprachlaute, so bemerkt man, dass Vokale recht energiereich sind, dass sie aber im allgemeinen einfachere Formen aufweisen. Die Konsonanten sind weniger energiereich, haben aber ein sehr kompliziertes Oszillogramm mit vielen hohen Frequenzanteilen. In der Sprache kommen Konsonanten und Vokale zeitlich nie miteinander vor. Ausserdem werden die Konsonanten bezüglich ihrer Wiedergabe von Verzerrungen wenig beeinflusst. Wenn wir deshalb dafür sorgen, dass die maximale momentane Verzerrung eine gewisse Grenze nicht überschreitet, unabhängig von der Amplitude des Signals, dann wird das Ohr, während man spricht, die durch das System entstehenden Verzerrungen nicht wahrnehmen. Wir müssen deshalb eine logarithmische Unterteilung des Amplitudenbereiches vornehmen, mit genügend vielen Bereichen, um eine vorzügliche Wiedergabe zu erhalten (Fig. 10).

Die maximale relative Verzerrung soll nicht mehr als 5% betragen. Das ergäbe für Rechteckschwingungen einen verallgemeinerten Klirrfaktor von rund 3% und eine relative Bereichsbreite von 0,1. In Figur 11 ist als Abszisse im logarithmischen Massstab die Ausgangsspannung U_2 aufgetragen, als Ordinate rechts das Verhältnis der Signalleistung zur Stör-

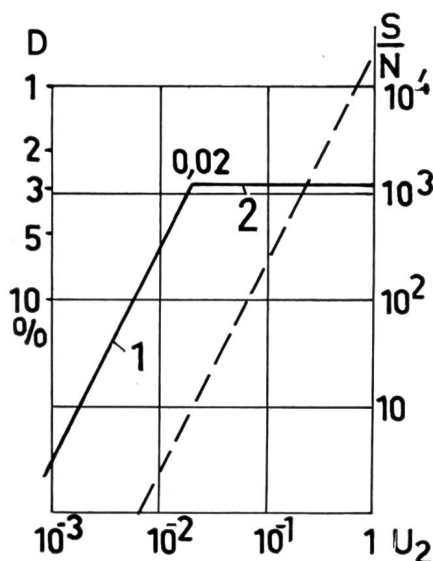


Fig. 11

Verzerrung des PCM-Systems

— mit kombinierter linearer und logarithmischer Bereichsunterteilung
 1 linear: 24 Bereiche, 0,83 mV; 2 logarithmisch: 40 Bereiche, $\frac{\Delta u}{U_2} = 0,10$

- - - mit linearer Bereichsunterteilung: 64 Bereiche zu 1/64 V

Distorsion du système PCM

— subdivision combinée linéaire et logarithmique
 1 linéaire: 24 subdivisions de 0,83 mV; 2 logarithmique: 40 subdivisions, $\frac{\Delta u}{U_2} = 0,10$

- - - subdivision linéaire 64 divisions de 1/64 V

D Klirrfaktor - Facteur de distorsion
 U_2 Ausgangsspannung - Tension de sortie

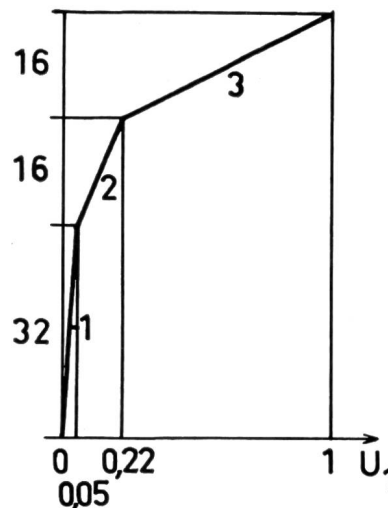


Fig. 12

Stückweise lineare Unterteilung mit drei Bereichen
 (Vorschlag W. Bleickardt)

Approximation par 3 sections linéaires
 (proposée par W. Bleickardt)

$$1 \Delta u_0 = 1,55 \cdot 10^{-3}; 2 \Delta u_0 = 0,011 \cdot 10^{-3}; 3 \Delta u_0 = 0,049 \cdot 10^{-3}$$

La distorsion relative maximale ne doit pas excéder 5%. Pour un signal de forme rectangulaire, cette valeur nous livrerait un facteur généralisé de distorsion d'environ 3% et une largeur relative de la subdivision de 0,1. La figure 11 représente sur sa partie droite le rapport de la puissance du signal à celle du bruit produit par le système PCM, l'abscisse étant la tension de sortie U_2 en échelle logarithmique. L'ordonnée gauche porte le facteur de distorsion D pour un signal de forme rectangulaire. La courbe interrompue représente le cas d'une subdivision linéaire en 64 parties, la largeur Δu_0 étant constante et égale à 1/64 volt. La courbe en trait plein représente une combinaison entre une subdivision linéaire (partie 1) et une division logarithmique (partie 2). Une largeur relative de 0,104 en divisions logarithmiques correspond à un facteur de distorsion de 3%. A notre exemple correspond donc une largeur constante de 0,83 mV dans la partie linéaire 1. Nous obtenons ainsi un facteur de distorsion bien plus favorable dans la partie 2, qui ne peut excéder 3%, correspondant à une dynamique de 36 dB. Nous pouvons descendre 45 dB en dessous de l'amplitude maximale et obtenir une distorsion n'excédant pas 10%, c'est-à-dire que le bruit produit par le système y est encore de 20 dB inférieur. Ce dernier sera donc 65 dB en dessous de l'amplitude maximale du signal de sortie. Cet écart entre signal et bruit correspond à peu près à celui que donnent les méthodes actuelles de transmission. Il serait donc peu judicieux de diminuer le bruit propre au système en dessous de la valeur fournie par les autres parties de la chaîne de transmission. En l'absence d'un signal utile dans le récepteur, nous obtiendrions ainsi un bruit d'environ 70 dB inférieur au signal maximum.

La réalisation d'un codeur et d'un décodeur conformément à la figure 11 serait très compliquée. On se contentera donc d'une approximation de la subdi-

leistung, die durch das PCM-System entsteht. An der linken Ordinate ist der Klirrfaktor D für rechteckförmige Signale angegeben. Die gestrichelte Kurve zeigt den Zusammenhang bei einer linearen Bereichsunterteilung mit 64 Bereichen. Die Breite Δu_0 ist konstant und beträgt $1/64$ V. Die ausgezogene Charakteristik stellt eine Kombination zwischen linearer Teilung (Bereich 1) und einer logarithmischen Teilung (Bereich 2) dar. Einem gewählten Klirrfaktor von 3% entspricht die relative Breite 0,104 im logarithmischen Bereich. Im linearen Bereich 1 ist die Bereichsbreite konstant und beträgt im Beispiel 0,83 mV. Man sieht, dass wir einen bedeutend günstigeren Klirrfaktor bekommen, da dieser im Bereich 2, der einer Dynamik von 36 dB entspricht, nie grösser als 3% ist. Wir können bereits auf etwa 45 dB tiefer gehen als die maximale Amplitude und bekommen dann immer noch eine Verzerrung, die nicht grösser ist als 10%, das heisst beim Pegel -45 dB ist das Geräusch, das durch das System entsteht, immer noch 20 dB tiefer, so dass das entstehende Geräusch 65 dB unterhalb des maximalen Ausgangspegels liegt. Dieser Geräuschabstand entspricht aber etwa der im allgemeinen gewährleisteten Dynamik bisheriger Übertragungsmethoden. Es hätte deshalb keinen Sinn, das Systemgeräusch wesentlich niedriger zu halten als das in den übrigen Teilen der Gesamtübertragung entstehende Geräusch. Ist beim Empfänger kein Nutzsignal vorhanden, so wird das Systemgeräusch etwa 70 dB kleiner sein als das maximale Signal.

Die Realisierung eines Coders und Decoders nach Figur 11 wäre sehr aufwendig. Man versucht deshalb, die logarithmische Unterteilung anzunähern mit stückweise linearer Unterteilung. Diese wählt man so, dass die stückweise linearen Bereiche gerade so viele Teilbereiche umfassen, als man durch Potenzen von 2 mit ganzzahligen Exponenten erreichen kann. Dies erleichtert die Realisierung der logischen Schaltung beim Coder und Decoder. Ein Beispiel einer solchen Codierung, wie sie *W. Bleickardt*¹ vorgeschlagen hat, ist in *Figur 12* wiedergegeben. Es werden für die Sprachcodierung insgesamt 128 Bereiche vorgesehen, wovon 64 für positive und 64 für negative Wechselamplituden. Für den Absolutwert der Amplitude stehen 32 Teilbereiche für kleine Amplituden, weitere 16 Teilbereiche für mittlere Amplituden und noch einmal 16 Teilbereiche bis zur maximalen Aussteuerung zur Verfügung. In *Figur 12* sind die entsprechenden Bereichsbreiten angegeben. Die kleinsten Verzerrungen treten immer bei der maximalen Amplitude des entsprechenden Bereiches auf. Die maximalen Verzerrungen befinden sich am untern Ende der linearen Teilbereiche. Die Abhängigkeit des Klirrfaktors von der Ausgangsspannung ist für die von *Bleickardt* vorgeschlagene Lösung in *Figur 13* dargestellt. Die punktierte sägezahnförmige Funktion

vision logarithmique par une suite de sections linéaires. Chaque section comprendra un nombre de subdivisions correspondant à 2^n , n étant un nombre entier. Ainsi sera simplifiée la partie logique du codeur et du décodeur. Une codification basée sur ce principe a été proposée par *W. Bleickardt*¹. La réalisation en est donnée à la *figure 12*. La codification de la parole se fait par 128 subdivisions dont 64 pour les amplitudes positives et 64 pour les amplitudes négatives. La valeur absolue de l'amplitude se répartit sur 32 subdivisions pour les petites amplitudes, sur 16 pour les amplitudes moyennes et sur 16 pour les amplitudes les plus grandes, jusqu'à la valeur maximale. La fig. 12 illustre la répartition des amplitudes. Les plus petites distorsions se produisent pour la

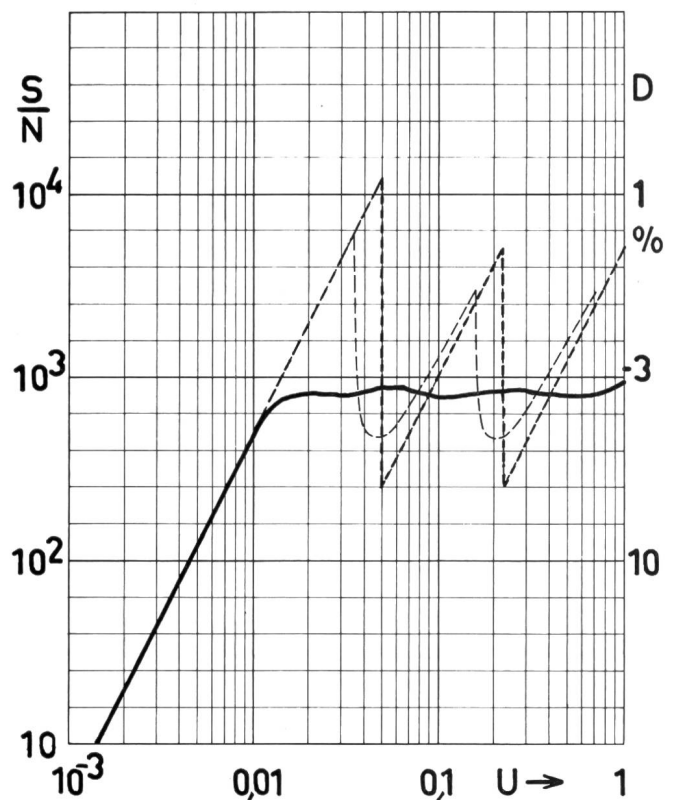


Fig. 13

- Linearer Coder mit drei Teilstücken
Verzerrungen bei einer Unterteilung nach *Figur 12*
- mittlere momentane Verzerrung
 - mittlere Verzerrung bei sinusförmiger Eingangsspannung
 - mittlere Verzerrung bei Sprachsignalen
- Code linéaire à 3 sections
Distorsions pour la subdivision représentée à la *figure 12*
- distorsion moyenne momentanée
 - distorsion moyenne pour une tension d'entrée sinusoïdale
 - distorsion moyenne de la parole
- U Effektive Ausgangsspannung - Tension effective de sortie
 S Nutzleistung - Puissance utile
 N Störleistung - Puissance du bruit

¹ Der Einfluss der Quantisierung in PCM-Systemen, Dissertation an der ETH von *W. Bleickardt* 1963.

Siehe auch: NTZ 18 (1965), S. 331 u. f.

¹ Der Einfluss der Quantisierung in PCM-Systemen, Dissertation an der ETH von *W. Bleickardt* 1963. Voir aussi: NTZ 18 (1965), p. 331 et ss.

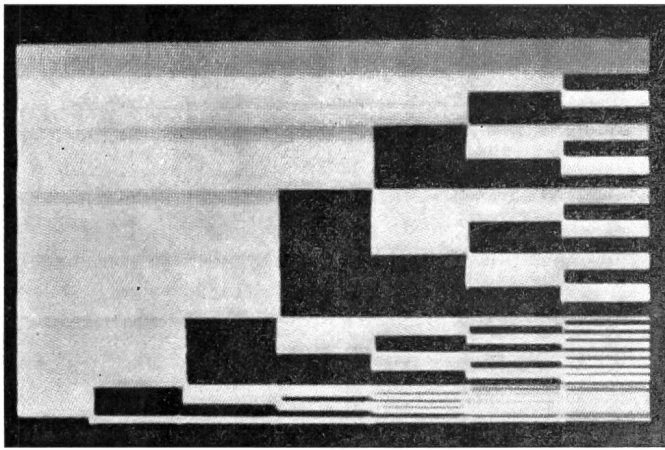


Fig. 14

Codebild eines den halben Amplitudenbereich (positive oder negative Amplituden) überstreichenden stetigen Signals. Abszisse synchronisiert mit dem Zeitabschnitt des siebenstelligen Codes, Ordinate proportional zum Eingangssignal
Weiss entspricht 0, schwarz L

Composition du code d'un signal continu de grandeur égale à la demi-plage des amplitudes (amplitude positive ou négative). Abscisse synchronisée avec l'unité de temps du code à 7 éléments
Ordonnée proportionnelle au signal d'entrée
Blanc = 0, noir = L

gibt den Klirrfaktor beziehungsweise das Verhältnis Signal- zu Geräuschleistung wieder. Da wir es aber bei der Sprache mit stark wechselnden Amplituden zu tun haben, wird die tatsächlich empfundene und auch messbare Systemverzerrung einen stark ausgeglichenen Charakter aufweisen, was die ausgezogene Kurve der Figur 13 zeigt. In der Abszisse ist der Effektivwert des gesamten empfangenen Signals, in der Ordinate das Verhältnis Nutzleistung zu Störleistung aufgetragen. Die Zwischenkurve, fein gestrichelt, gilt für sinusförmige Signale. Eine Demonstration des Zusammenhanges Code und Amplitude bei dieser 3teiligen linearen Codierung zeigt Figur 14. Vertikal ist die absolute Amplitude linear dargestellt; horizontal von links nach rechts sind sieben Codestellen weiss oder schwarz aufgetragen. Bei einer bestimmten gewählten Amplitude brauchen wir einen horizontalen Strich von links nach rechts zu ziehen und können den Code ablesen, weiss bedeutet kein Impuls, schwarz bedeutet ein Impuls. Dieses Bild entsteht auf einem Kathodenstrahloszillographen, wenn wir die horizontale Ablenkung mit der Codierung synchronisieren, ein Wechselsignal mit maximaler Amplitude auf den Coder geben und die entstandenen PCM-Signale benutzen, um die Helligkeit des Kathodenstrahls zu steuern.

Aus den bisherigen Ausführungen kann entnommen werden, dass die richtige Bereichsunterteilung eine zentrale Bedeutung besitzt.

5. Übertragungseigenschaften des PCM-Signals

Das Signal, das wir über die Leitung oder als Mikrowellensignal durch den Raum senden, hat die

valeur la plus grande de l'amplitude. Les distorsions les plus grandes s'obtiennent dans la partie inférieure de la section linéaire. Le facteur de distorsion est représenté à la figure 13 en fonction de la tension de sortie pour la solution proposée par Bleickardt. La fonction pointillée en forme de dents de scie représente le facteur de distorsion respectivement le rapport du signal au bruit. Comme la parole présente une forte variation de l'amplitude, les distorsions perceptibles du système ont une allure fortement égalisée, conformément à la courbe pleine de la figure 13. L'abscisse est donnée par la valeur effective de la tension de sortie, l'ordonnée par le rapport du signal au bruit. La courbe pointillée fine se rapporte à un signal sinusoïdal. La figure 14 illustre la relation entre le code et l'amplitude pour un codage réalisé par 3 sections linéaires. La verticale représente la valeur absolue de l'amplitude en échelle linéaire. L'horizontale porte de gauche à droite les 7 positions des éléments du code représentées en noir et blanc. Pour obtenir un certain code, il suffit de tracer une horizontale de gauche à droite à la hauteur correspondant à l'amplitude du signal: blanc signifiera pas d'impulsion, noir, une impulsion. L'image est fournie par un oscillographe cathodique dont le balayage horizontal est synchronisé avec le codage. Un signal périodique d'amplitude maximale est donné sur le codeur dont le signal PCM commande l'intensité du rayon cathodique. Nous relevons donc l'importance capitale d'un choix judicieux de la subdivision.

5. Les caractéristiques de transmission du signal PCM

Le signal que nous transmettons par ligne ou que nous envoyons par micro-ondes dans l'espace n'aura en tout instant que deux valeurs possibles: une impulsion sera présente ou ne le sera pas. Le récepteur pourra donc rétablir le signal initial pour autant qu'il soit en mesure de décider si à chaque instant donné il existe une impulsion ou non. Considérons un système de transmission à bande passante limitée. La figure 15 nous montre comment on établit la réponse distordue du système, partant de sa fonction de transfert et d'un signal d'entrée égal à l'échelon

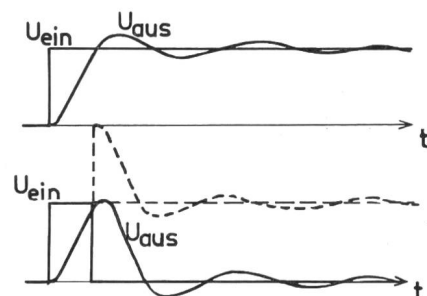


Fig. 15

Verzerrung eines Impulses bei frequenzbandbegrenzter Übertragung

Distorsion d'une impulsion transmise avec limitation de la bande passante

Eigenschaft, zu jedem Zeitpunkt nur zwei Werte annehmen zu können, es ist da oder nicht da. Mit anderen Worten: Solange der Empfänger entscheiden kann, ob das Signal zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhanden ist oder nicht, kann er das ursprüngliche Signal wieder herstellen. Betrachten wir ein frequenzbandbegrenztes Übertragungssystem: In *Figur 15* wird gezeigt, wie das verzerrte Signal eines Impulses aus der Übergangsfunktion des Systems bei einem plötzlichen Spannungssprung am Eingang konstruiert wird. Wenn wir die Sprungantwort kennen, so können wir durch Beifügen eines negativen Sprunges am Eingang und der Sprungantwort am Ausgang die Zeitfunktion am Ausgang des Systems erhalten, wenn wir am Eingang einen Einzelimpuls hineinsenden. Folgen sich einzelne solche Impulse mit Pausen, die ein Codewort bilden, so können wir die Antwort des Systems als Superposition der Antwortfunktion eines einzelnen Impulses auffassen und demgemäss die Antwort des Systems konstruieren (*Fig. 16*). Wir führen am Empfangsort eine Amplitudengrenze ein, oberhalb der bei bestimmter Wahl der Zeiten geschlossen werden kann, ob ein Impuls am Eingang vorhanden war. Liegt dagegen der Wert zu bestimmten Zeiten unterhalb dieser Grenze, dann war kein Impuls vorhanden. Die Abfragezeiten sind in *Figur 16* gestrichelt angegeben. Man erkennt, dass mit einer Zeitverschiebung das Codewort wieder vollständig rekonstruiert werden kann. Da nun bei der Pulscode-modulation die Codeworte verschiedener Nachrichtenkanäle unmittelbar aufeinander folgen, gilt diese Rekonstruierbarkeit auch bezüglich der Beurteilung des Übersprechens. Solange jeder Puls am Ausgang des Systems richtig bewertet wird, findet keine gegenseitige Störung statt. Vergleicht man die Situation mit jener bei Puls-Amplituden-Modulation, so erkennt man, dass die Puls-Amplituden-Modulation mit derselben Kanalzahl und bei derselben Charakteristik des Übertragungssystems ein starkes, verständliches Übersprechen aufweisen würde.

Man sieht ferner sofort ein, dass am Empfangsort die Impulse auch dann rekonstruiert werden können, wenn im System selbst ein relativ starkes Geräusch vorhanden ist. Der Geräuschabstand bezüglich der maximalen Pulsamplitude braucht nicht grösser als etwa 15 dB zu sein, das heisst, die maximale Geräuschamplitude darf bis zu einem Drittel der Impulsamplitude betragen. Das Übersprechen von zwei Leitungen, betrieben mit PCM in gleicher Richtung, wird deshalb nie zu Störungen Anlass geben. Die notwendigen Zwischenverstärker auf Leitungen mit PCM-Betrieb brauchen nur die Impulse zu regenerieren. Die Anzahl der Verstärker, die hintereinander geschaltet werden können, ist praktisch unbegrenzt, das heisst, sie hat auf das am Ende der Übertragungsleitung entstehende Geräusch keinen Einfluss.

Die theoretisch notwendige Bandbreite des Übertragungssystems für PCM lässt sich einfach berechnen. Sie muss grösser sein als das Produkt aus Bandbreite des Nachrichtenkanals, multipliziert mit der

unité. Partant de la réponse transitoire du système, il sera également aisé de déterminer la forme de la tension de sortie pour une impulsion unique de forme rectangulaire en additionnant, à l'entrée, un échelon unité de signe négatif. Si plusieurs impulsions se succèdent à l'entrée avec des intervalles correspondant à des mots-codes complets, nous pourrons déterminer la réponse résultante du système en appliquant le principe de la superposition (*fig. 16*). Pour établir si

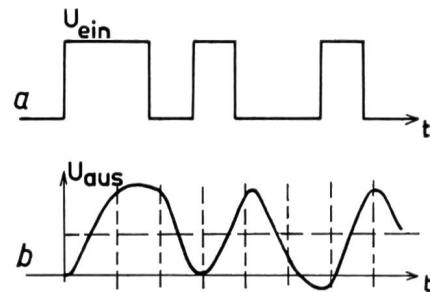


Fig. 16

Verzerrung eines Codewortes wie bei *Figur 15*
Distorsion d'un mot-code comme *fig. 15*

- a Eingangssignal – Tension d'entrée
- b Ausgangssignal – Tension de sortie

une impulsion est présente ou non, il suffit d'effectuer à l'entrée du récepteur une discrimination d'amplitude à des temps discrets bien déterminés. Si la tension à l'entrée n'atteint pas le seuil de la discrimination au moment voulu, il n'existe pas d'impulsion. Les temps de l'échantillonnage sont marqués en pointillé dans la figure 16. Nous voyons donc qu'il est possible de reconstruire, à un décalage près dans le temps, complètement les mots du code. Comme les mots-codes des différents canaux du système PCM se succèdent, il nous est possible d'évaluer la diaphonie entre différents canaux. Il n'existera pas de perturbation réciproque aussi longtemps que chaque impulsion pourra être détectée correctement. En comparant cette situation avec la modulation d'impulsion en amplitude, nous voyons que nous aurions une forte diaphonie intelligible avec cette dernière, même si les deux systèmes de transmission avaient des caractéristiques identiques et le même nombre de canaux. Relevons également que les impulsions peuvent encore être restaurées dans le récepteur même si le signal est fortement perturbé par du bruit. Le rapport de l'amplitude maximale de l'impulsion au bruit peut ne pas excéder environ 15 dB, c'est-à-dire que l'amplitude du bruit peut atteindre environ le tiers de l'amplitude de l'impulsion. La diaphonie entre deux lignes transmettant dans la même direction des signaux PCM ne pose donc pas de problèmes. Les amplificateurs intermédiaires de lignes fonctionnant en PCM n'ont qu'à restaurer les impulsions. Le nombre des amplificateurs se succédant est pratiquement illimité, autrement dit leur nombre n'a pour ainsi dire pas d'influence sur le bruit prenant naissance dans le récepteur.

Zahl der Kanäle im Zeitmultiplexsystem und multipliziert mit der Stellenzahl des binären Codes. Praktisch wird man eine Bandgrenze wählen, die mindestens das 1,5fache der theoretisch berechneten beträgt.

Erst die PCM-Technik hat es ermöglicht, dass die aufgenommenen Bilder vom Mars zur Erde übertragen werden konnten. Sie wird mehr und mehr für fernmeldetechnische Probleme auch für kurze Distanzen angewendet werden.

Adresse des Autors: Prof. H. Weber, Vorstand des Institutes für Fernmeldetechnik der ETH, Sternwartstrasse 7, 8006 Zürich.

Nous pouvons facilement déterminer la largeur de bande théorique nécessaire à une transmission PCM. Elle doit être supérieure au produit de la largeur de bande d'un canal, multiplié par le nombre des canaux multiplexés dans le temps, multiplié par le nombre de positions des éléments du code binaire. Dans la pratique, nous choisirons une valeur supérieure égale à environ 1,5 fois la valeur théorique.

Grâce à la technique PCM, il a été possible de retransmettre sur la Terre les images prises de la planète Mars. Cette technique sera utilisée de plus en plus à l'avenir pour des problèmes de télécommunications, même sur de courtes distances.

Jakob BAUER, Bern

621.376.56:621.395

Anwendungsmöglichkeiten der Pulsmodulation Possibilité d'application de la modulation par impulsions codées

Zusammenfassung. Dank der Entwicklung der Halbleitertechnik lassen sich in naher Zukunft Übertragungssysteme mit Pulsmodulation wirtschaftlich mehrfach ausnützen. Untersuchungen zeigen aber, dass das neue Verfahren nicht nur auf die eigentliche Übertragungstechnik angewendet werden kann, sondern dass sich damit auch interessante Vermittlungseinrichtungen aufbauen lassen. Die konsequente Anwendung der Pulsmodulationstechnik führt zu «integrierten» Nachrichtensystemen.

Résumé. Grâce au développement de la technique des semi-conducteurs, on pourra dans un proche avenir utiliser de façon économique des systèmes de transmission multiplex fonctionnant selon le principe de la modulation par impulsions codées. Les essais effectués montrent que l'emploi de ce nouveau procédé ne se limite pas à la transmission proprement dite, mais s'étend également à la technique de la commutation. L'utilisation systématique de la modulation par impulsions codées conduit aux systèmes de télécommunication «intégrés».

Riassunto. Possibilità d'applicazione della modulazione a codice d'impulsi. Lo sviluppo della tecnica dei semiconduttori permetterà di sfruttare economicamente in un prossimo futuro dei sistemi di trasmissione multipli a modulazione a codice d'impulsi. Le prove effettuate mostrano che questo nuovo metodo non si applica soltanto alla trasmissione propriamente detta, ma permette pure la realizzazione d'interessanti equipaggiamenti di commutazione. Il ricorso sistematico alla modulazione a codice d'impulsi conduce a sistemi di telecomunicazione «integrati».

1. Einleitung

In seinen Betrachtungen über die Beziehungen zwischen Industrie und PTT auf dem Gebiete des Fernmeldewesens anlässlich der vergangenen Generalversammlung der «Pro Telephon» befasste sich Ch. Lancoud, Direktor der Fernmeldedienste der Generaldirektion PTT, auch mit dem Problem der Entwicklung unseres ausgedehnten Nachrichtensystems¹. Unter anderem führte er aus:

«Der Fernmeldeverkehr aller Arten wird weiterhin im gleichen stürmischen Rhythmus zunehmen. Um ihn zu meistern, sind sehr grosse Anstrengungen auf allen Gebieten unseres Netzes notwendig. Neue Übertragungsarten und Übertragungsmittel, besondere Modulations- und Codierungssysteme müssen geschaffen und die Bautechnik muss überholt werden.

In nächster Zeit ist die Kapazität unserer Koaxialkabelanlagen durch Erweitern des Frequenzbandes zu erhöhen. Für die Orts- und Teilnehmerleitungen wird man ebenfalls neue, wirtschaftlich tragbare Übertragungssysteme finden müssen, mit denen sich diese Leitungen mehrfach ausnützen lassen. Man denkt dabei vor-

1. Introduction

Lors de la dernière assemblée générale de «Pro Téléphone», Ch. Lancoud, directeur du service des télécommunications des PTT suisses, parlant des relations entre l'industrie et les PTT dans le domaine des télécommunications, traita également de notre vaste système de communications¹. Il dit entre autres choses:

«Le trafic des télécommunications de tout genre augmentera ainsi au même rythme impétueux. Pour le maîtriser, de grands efforts seront nécessaires dans tous les secteurs de notre réseau. Il faudra utiliser de nouveaux milieux et modes de transmission, améliorer la technique et les équipements de modulation ou de codage, reviser les techniques de construction.

Dans un avenir prochain, la capacité des installations de câbles coaxiaux et des faisceaux hertziens devra être accrue par des élargissements de la bande de fréquence. Nous devons aussi trouver pour les réseaux ruraux et locaux de nouveaux systèmes de transmission plus économiques permettant l'utilisation multiple de leurs lignes. Il s'agit là avant tout de systèmes de modulation par impulsions codées, mais des systèmes moins coûteux à courants porteurs pourraient aussi entrer en considération».

¹ vgl. *Technische Mitteilungen PTT* Nr. 8/1965, S. 269–272 (französische Originalfassung) und *PTT-Zeitschrift* Nr. 9/1965, S. 214–217 (deutsche Übersetzung).

¹ Voir Bulletin technique PTT N° 8/1965, p. 269–272