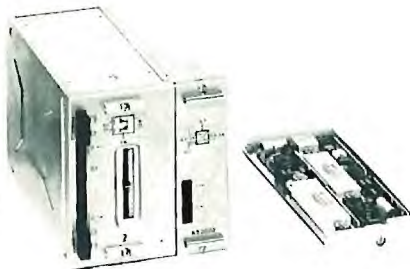




1952



1962

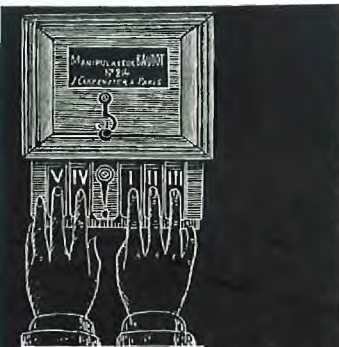


1972

B

Moderne Kommunikationsmethoden insbesondere für Sprache

A

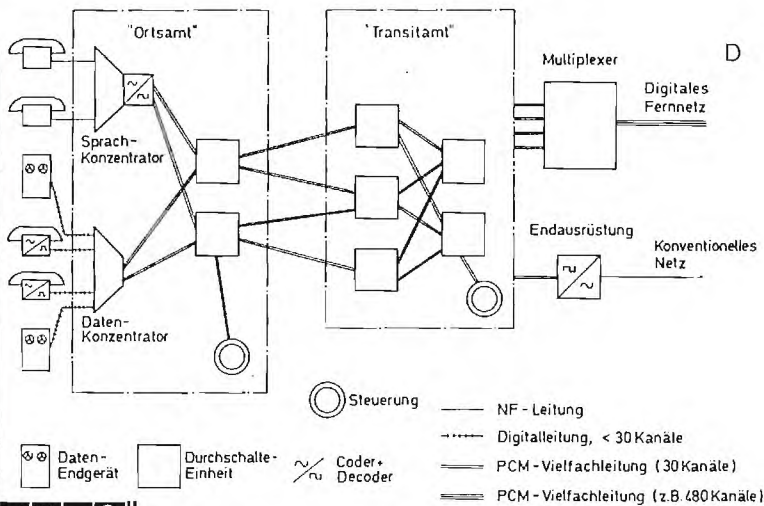


MAIN GAUCHE MAIN DROITE MAIN GAUCHE

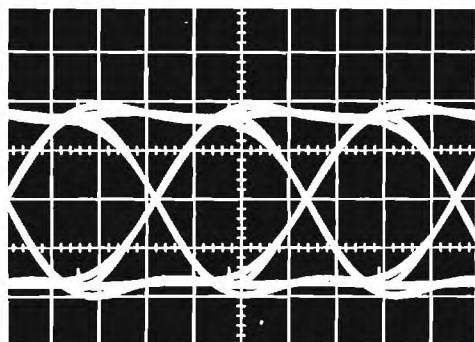
V	IV	I	II	III
A	1	⊙		
B	8	⊙		
C	9	⊙		
D	0	⊙		
E	2	⊙		
É	&	⊙		
F	'	⊙		
G	7	⊙		
H	h	⊙		
I	°	⊙		
J	6	⊙		
K	(⊙		
L	=	⊙		
M)	⊙		
N	№	⊙		
O	5	⊙		

V	IV	I	II	III
P	/	⊙		
Q	/	⊙		
R	-	⊙		
S	;	⊙		
T	!	⊙		
U	4	⊙		
V	7	⊙		
W	?	⊙		
X	^	⊙		
Y	3	⊙		
Z	:	⊙		
⋈	.	⊙		
⋈	.	⊙		

BLANC de CHIFFRES
BLANC de LETTRES



von Heinrich Weber



C

Legende zum Titelblatt

- A. Klaviatur und Code zur Buchstaben- und Zeichenübertragung des Baudot-Telegraphen (siehe auch S. 17 und Abb. 6).
- B. Beispiel der technologischen Entwicklung von 1952 bis 1972. Die drei Einschübe enthalten je einen Kanalumsetzer und einen Signalempfänger für Frequenzmultiplexsysteme (siehe Abb. 5A).
- C. Augendiagramm eines linear entzerrten Leitungsabschnittes für die Übertragung binärer Pulsfolgen (PCM). Dieses Bild ergibt sich bei der Betrachtung des Empfangssignals mit einem Kathodenstrahloszilloskop, dessen Zeitablenkung mit einem Mehrfachen der Taktzeit des gesendeten binären Signals beliebiger Pulsfolgen synchronisiert ist (siehe Abb. 10 auf S. 23).
- D. Blockschema eines integrierten Fernmeldesystems (IFS), in dem alle Sprach- und Datensignale im normierten PCM-Code vermittelt werden (siehe S. 32).

NEUJAHRBLATT

herausgegeben von der

Naturforschenden Gesellschaft
in Zürich

auf das Jahr 1977

179. Stück

1977

Veröffentlichung
der
Naturforschenden Gesellschaft in Zürich
im Anschluss an den Jahrgang 121 der
Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich

Redaktion: Prof. Dr. E. A. Thomas, Fehrenstrasse 15, 8030 Zürich 7

Ausgegeben am 31. Dezember 1976

Moderne Kommunikationsmethoden

insbesondere für Sprache

Von

HEINRICH WEBER

Mit einem Titelbild, 16 Abbildungen im Text und einer Tabelle

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	7
2. Anforderungen an eine Telefonverbindung	7
2.1. Frequenzband	8
2.2. Lautstärke	8
2.3. Verzerrungen	9
3. Übertragung elektrischer Signale, allgemein, Laufzeit	10
4. Die Entwicklung der heutigen Übertragungstechnik	11
5. Frequenzmultiplex, Prinzip und Anwendung	13
5.1. Zweiseitenbandmodulation, Amplitudenmodulation	14
5.2. Einseitenbandmodulation	14
5.3. Frequenzmodulation, Phasenmodulation	16
6. Zeitmultiplex, Prinzip und Anwendung	17
6.1. Pulsamplitudenmodulation PAM	18
6.2. Pulsbreitenmodulation PDM (Pulsdauermodulation)	18
6.3. Pulsphasenmodulation PPM (Pulslagemodulation)	19
6.4. Pulsmodulation PCM	19
6.5. Pulsdeltamodulation PDM	19
6.6. Pulsfrequenzmodulation PFM	20
7. Das Abtastproblem	20
8. Das Problem der Übertragung bei Zeitmultiplex	22
9. Pulsmodulation der Sprache	24
10. Weitere Anwendungen der PCM	28
10.1. Übertragung von Musik	28
10.2. Übertragung von Bild- und Fernsehsignalen	28
11. Entwicklung der Verbindungstechnik	29
12. Integrierte Systeme	32
13. Schlusswort	34

1. Einleitung

Seit 100 Jahren ist es möglich, die Sprache mittels elektrischer Signale zu übertragen. Die damaligen Erfinder (PHIL. REIS 1861 für das Mikrophon, GRAHAM BELL 1876 für den Hörer) hatten die Schwierigkeit zu überwinden, Schallwellen in elektrische Wellen und diese wieder in Schallwellen umzuformen. Das noch heute meistverwendete Kohlemikrophon von EDISON (1878) in der Telephonstation verwendet das Prinzip von REIS: Druckabhängigkeit eines elektrischen Widerstandes. Das Mikrophon mit diesem Prinzip wirkt als Verstärker, das abgegebene elektrische Signal hat eine grössere Leistung als das akustische Signal. Es ist aber nicht reversibel, kann daher nicht als Hörer verwendet werden. GRAHAM BELL erfand den Hörer (Telephon), fussend auf dem elektromagnetischen Prinzip: Die antreibende Kraft der schall-erzeugenden Membran wird durch einen Magnetfluss geliefert, der vom elektrischen Strom durch eine Spule gesteuert wird. Dieser Apparat ist reversibel: Wenn die Membran von Schallwellen bewegt wird, verändert sich der Luftspalt und deshalb auch der magnetische Widerstand eines permanenten magnetischen Kreises, d. h. der magnetische Fluss ändert sich, und in einer damit gekoppelten Drahtspule entsteht eine induzierte Spannung. BELL hat deshalb seinen Hörer auch als Mikrophon benutzt. Die überbrückbare Entfernung war aber nach heutigen Begriffen bescheiden (einige Kilometer). Im Verlauf der Zeit wurden die Mikrophone und Hörer dauernd verbessert, die Prinzipien aber wurden beibehalten. Die Entwicklung hatte zum Ziel, ein getreues Abbild des gesendeten Schallsignals beim Empfänger zu bekommen. Dieses Ziel ist heute weitgehend erreicht. Die Qualität der Wandler (Mikrophon und Hörer) ist entscheidend für die Möglichkeit einer einwandfreien weltweiten Verbindung im heutigen Telefonsystem. Dieses muss gestatten, jeden mit jedem zu verbinden, auch über die grössten Entfernungen. Dazu bedurfte es einer dauernden Entwicklung in zwei beinahe voneinander unabhängigen Gebieten, nämlich der Verbindungstechnik (Netzgestaltung, manuelle und automatische Zentralen) und der Übertragungstechnik (Übertragung elektrischer Signale über jede Entfernung in beiden Richtungen). Die vorliegende Schrift wird sich hauptsächlich mit der letztern befassen, wobei die elektroakustischen Wandler (Mikrophon und Hörer) nicht behandelt werden.

2. Anforderungen an eine Telephonverbindung

Die Mindestanforderungen an eine akzeptable Sprachübertragung in einem Telefonsystem konnten nur durch umfangreiche Experimente physiologischer und psychologischer Natur zu objektiven physikalischen Massstäben formuliert werden. Sol-

che Untersuchungen wurden schon im letzten Jahrhundert unternommen, führten aber erst in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts zu schlüssigen Ergebnissen. Bis dahin war man zufrieden, wenn man den Gesprächspartner hörte und man sich einigermaßen verständigen konnte. Die ideale Vergleichsbasis für die Beurteilung einer Telephonverbindung in physiologischer Hinsicht ist das direkte Gespräch zweier einander gegenüberstehender Menschen im Abstand von einem Meter vom Mund des einen zum Ohr des anderen. Die Versuche ergaben die folgenden objektiv festzustellenden Kriterien:

2.1. Frequenzband

Die Sprache enthält, unabhängig von Rasse und Geschlecht, eingeschlossen individuelle Unterschiede, Frequenzanteile von etwa 150 Hz bis 5000 Hz, d. h. etwa 5 Oktaven. Die Vokale sind durch Anteile in den 3 untern Oktaven, die Zischlaute durch solche in den 2 obern Oktaven ausgezeichnet. Die physiologischen Experimente ergaben, dass man für die Sprachübertragung auf die oberste und unterste Oktave verzichten kann, ohne dass eine wesentliche Einbusse der Sinnverständlichkeit (= Satzverständlichkeit) eintritt. So hat man heute ein zu übertragendes Frequenzband von 300 bis 3400 Hz international festgelegt. Doch existieren noch Millionen von Telephonverbindungen, die das Frequenzband nach oben auf 2400 Hz oder sogar tiefer beschränken, ohne dass Nachteile für gleichsprachige Partner bemerkt werden.

2.2. Lautstärke

Bedingt durch den Aufbau der Telephonnetze (Ortsnetz, Netzgruppe und Fernnetz, national und international), ergeben sich Unterschiede in den Leitungslängen und damit auch in der Dämpfung (Mass für die Abnahme der Sprachsignalenergie beim Empfänger). Ebenso zeigen die heute noch verwendeten Kohlemikrophone eine erhebliche Streuung des akustisch-elektrischen Wirkungsgrades. Ausserdem spricht nicht jedermann gleich laut. Gegenüber der idealen Vergleichsbasis von 1 m Abstand im direkten Gespräch muss man eine Dämpfung der Lautstärke tolerieren, die bei 30 m Abstand der Partner im direkten Gespräch auftreten würde. Im physiologischen Lautstärkemass Phon, das heute bei der Geräuschbeurteilung eine grosse Rolle spielt, könnte die Sachlage etwa so dargestellt werden: Die mittlere Lautstärke während des Sprechens in 1 m Abstand vom Mund beträgt etwa 65 Phon, in 30 m Abstand aber nur noch etwa 35 Phon, d. h. man müsste dieses Experiment in einer sehr ruhigen Umgebung durchführen, sonst würde die Unterhaltung durch die Umgebungsgeräusche erheblich gestört. Beim Telephongespräch wird der Schall in einem vom Hörer mit dem äussern Ohr abgeschlossenen Raum erzeugt und damit vom Umgebungsgeräusch isoliert. Ist dieses so gross, dass die Reizung des freien Ohres die Verständigung erschwert, dann kann auch dieses durch die freie Hand abgeschirmt werden. Bis nach dem Zweiten Weltkrieg wurde sogar eine Vergleichsdistanz von 100 m, entsprechend 25 Phon, toleriert, wobei aber die Gesprächspartner als automatische Reaktion ihre Stimmen um etwa 10 Phon anhoben.

2.3. Verzerrungen

Die Bestandteile, aus welchen eine Telephonverbindung aufgebaut wird, wirken verschiedenartig auf das zu übertragende Signal ein. Beinahe zu vernachlässigen ist der Einfluss der Telephonzentralen. Der Einfluss der Leitungen auf die Signale besteht darin, dass die verschiedenen Frequenzanteile verschieden gedämpft werden (Frequenzgang), die niedrigen weniger, die höheren mehr. Doch können diese Einflüsse vollständig korrigiert werden durch entsprechende Zusatzglieder in der Leitung. Die elektroakustischen Wandler (Mikrophon und Hörer) haben auch heute noch den stärksten Einfluss auf den Frequenzgang. Doch toleriert das Ohr bei der Sprachaufnahme wesentliche Abweichungen des Frequenzganges vom idealen, bei dem alle Frequenzanteile beim Empfänger im gleichen Verhältnis wie beim Sender (Sprecher) vorhanden sind. Gegenüber dem mittleren Schalldruck im Frequenzband 300–3400 Hz dürfen die Abweichungen des Schalldruckes von $\frac{1}{3}$ bis 3mal betragen, wenn beim Sprechen alle Frequenzanteile gleichen Schalldruck aufweisen würden (Abb. 1).

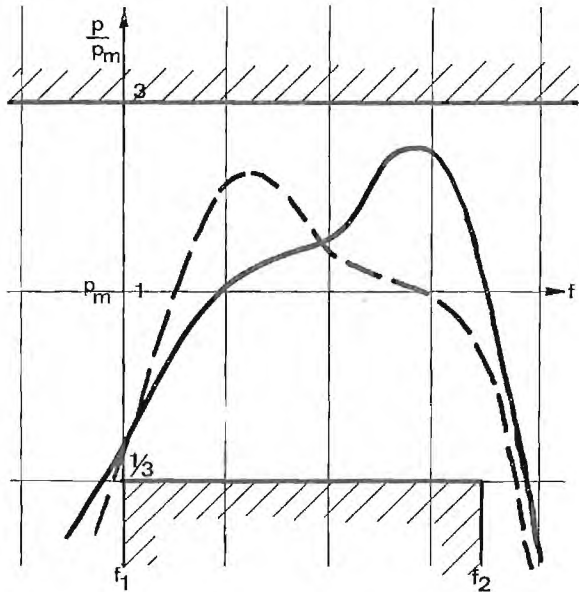


Abb. 1. Mögliche Frequenzgänge einer Telephonverbindung. Der Schalldruck p im Raum Telephonhörer-Aussenrohr des Empfängers in Abhängigkeit der Frequenz unter der Voraussetzung, dass der Schalldruck vor dem Mikrophon des Senders für alle Frequenzen gleich sei. p_m ist ein mittlerer Empfangsschalldruck. f_1 ist 300 Hz, f_2 3400 Hz. Die zulässigen Frequenzgänge sollen zwischen den schraffierten Gebieten liegen.

Die heute noch stark überwiegend im Betrieb stehenden Kohlemikrophone haben die unangenehme Eigenschaft, dass sie bei grosser Lautstärke Frequenzanteile im gleichen Frequenzband erzeugen, die im akustischen Signal nicht enthalten sind. Diese nichtlinearen Verzerrungen können im Übertragungsweg nicht rückgängig gemacht werden. Sie sind für den Empfänger unangenehm, sie erschweren die Erkennbarkeit des Sprechers, aber die Sinnverständlichkeit wird nur selten wesentlich beeinträchtigt. Das Mass für die nichtlineare Verzerrung ist der Klirrfaktor k .

$$k = 100 \sqrt{\frac{\text{Energie aller Fremdanteile}}{\text{Energie des ganzen Signals}}} \%.$$

Besteht das Originalsignal nur aus einer Sinuswelle, so ist die Messung relativ einfach; die Fremdanteile sind dann die entstehenden Oberwellen (Harmonische), der Nenner die Summe der Energie der Grundwelle und der Oberwellen. Bis $k = 10\%$ ist keine Beeinträchtigung zu erwarten, dagegen ist sie merkbar; $k \leq 3\%$ ist physiologisch nicht merkbar.

Zusammengefasst ergeben sich folgende objektive Anforderungen an eine Verbindung gegenüber der Vergleichsbasis:

Frequenzband	300–3400 Hz
Bezugsdämpfung	≤ 30 dB, entsprechend Abstand ≤ 30 m
lineare Verzerrung	± 10 dB, entsprechend Faktor 3 bzw. $\frac{1}{3}$
nichtlineare Verzerrung	$k \leq 10\%$ für Mikrophon
	$k \leq 3\%$ für alles übrige einer Verbindung zusammen

3. Übertragung elektrischer Signale

Zwei Gruppen von Signalen stellen verschiedene Anforderungen an das Übertragungssystem:

1. Analoge Signale, z. B. Sprache, Fernsehen.
2. Digitale Signale, z. B. Telegraphie, Daten (Computer, EDV).

Heute kann ein analoges elektrisches Sprachsignal in ein digitales Signal umgewandelt, übertragen und wieder in ein analoges Signal rückverwandelt werden.

Obwohl das Bildsignal beim Fernsehen zu den analogen Signalen zählt, hat die Übertragung den gleichen Bedingungen zu genügen, wie sie für digitale Signale gelten. Welches sind die zusätzlichen Anforderungen an die digitale Übertragung?

Ein digitales Signal ist eine zeitliche Folge von Pulsen. Die Übertragung darf die relative zeitliche Lage nicht verändern, so dass beim Empfänger etwas verspätet die gleiche Folge von Pulsen wieder erscheint (Abb. 2). Einer solchen Pulsfolge kann ein Frequenzspektrum zugeordnet werden, das übertragen werden muss. Dieses hängt mit der Pulsfolgefrequenz $f_r = \frac{1}{T_r}$ (T_r Taktzeit) zusammen.

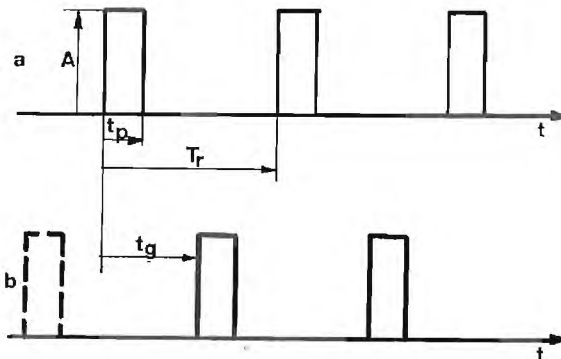


Abb. 2. Pulsfolgen. a) beim Senden, b) beim Empfänger bei idealer Übertragung. A Amplitude, t_p Pulsdauer, T_r Taktzeit, t_g Laufzeit des Übertragungssystems.

Die höchste zu übertragende Frequenz muss mindestens die Hälfte der Pulsfolgefrequenz sein (NYQUIST, KÜPFMÜLLER, 1926). Wesentlich ist, dass die Übertragungszeit für alle Frequenzanteile in diesem Band gleich sein müssen. Die Laufzeitunterschiede innerhalb des Bandes dürfen nur einen Bruchteil der Pulsdauer betragen. Auch für die Übertragung des Fernsehsignals gilt diese Überlegung. Zieht man die Eigenschaften der möglichen Übertragungsmedien in Betracht, so erkennt man, dass die Mikrowellenübertragung via Richtstrahlen durch den Raum gegenüber den Kabelleitungen hinsichtlich ihrer Laufzeiteigenschaften grosse Vorteile bieten. Deshalb sind heute die Fernsehnetze weitgehend mittelst Richtstrahlverbindungen aufgebaut. Sowohl die Laufzeit wie auch die Dämpfung bleiben über das ganze zu übertragende Frequenzband konstant.

Bei den Kabelleitungen wäre die Laufzeit im verwendeten Frequenzgebiet annähernd konstant, doch erfolgt mit steigender Frequenz eine ebenfalls zunehmende Dämpfung. Diese muss mit konzentrierten Zusatznetzwerken korrigiert werden, welche aber eine Veränderung der Laufzeit mit steigender Frequenz bewirken. Es sind zusätzliche Laufzeitkorrekturen notwendig, um dieselben günstigen Resultate wie mit Richtstrahlverbindungen zu erreichen.

Sind beide Forderungen, Konstanz der Laufzeit und der Dämpfung, über das ganze Frequenzband erfüllt, so spielt die Grösse der nichtlinearen Verzerrung eine sekundäre Rolle.

Für die Übertragung des analogen Sprachsignals spielen die Laufzeitdifferenzen innerhalb des Frequenzbereichs der Sprache keine Rolle, weil das Ohr relativ unempfindlich darauf reagiert. Dagegen darf für den allgemeinen Sprechverkehr am Telefon die mittlere Laufzeit des Signals für einen Weg 0,4 s nicht überschreiten. Ist am Übertragungssystem ein Satellit beteiligt, so ist die Laufzeit für eine Richtung etwa 0,3 s. Das heisst am Ende eines Satzes muss der Sprechende 0,6 s warten, bis er eine Antwort hören kann. Eine Verbindung über zwei Satelliten in Tandem wird Schwierigkeiten in der Gesprächsabwicklung bereiten, da die Laufzeit hin und zurück über eine Sekunde beträgt.

4. Die Entwicklung der heutigen Übertragungstechnik

Die weitergehende Entwicklung könnte kaum verstanden werden ohne Kenntnis der bisherigen. Deshalb sollen die markanten Stufen in chronologischer Folge dargestellt werden. Bei der Erfindung des Telefons und der Einführung zum öffentlichen Gebrauch, zirka 1880, wurde die Leitungstechnik des Telegraphen übernommen, d. h. es wurde ein Draht verlegt und die Erde bildete die Rückleitung. Ausser atmosphärischen Entladungen gab es damals keine Störer. Bald erkannte man, dass auf diese Weise Gespräche, die zur gleichen Zeit geführt wurden, einander störten. Auch war das Gesprächsgeheimnis nicht zu garantieren. So konnten auf einer Leitung Gespräche auf Nachbarleitungen abgehört werden. Die Einführung von doppeldrätig isolierten Leitungen, für jeden Telephonteilnehmer eine, in geeigneter Anordnung

bebob diesen Fehler. Das Gesprächsgeheimnis, eine wichtige Eigenschaft für die Verbreitung des Telephons, konnte bewahrt werden. Auch die Fernleitungen wurden zweidrahtig ausgelegt. Mit dicken Kupferdrähten von 5 mm Dicke und mehr konnten mehrere 100 km weite Distanzen überbrückt werden.

O. HEAVISIDE, ein Mathematiker, gab 1886 theoretische Anleitung, wie die Leitungseigenschaften für das Sprachfrequenzband zu verbessern seien. PUPIN errechnete wie G. S. CAMPBELL (Bell Labs) um die Jahrhundertwende genaue Anweisungen für die Durchführung (Abb. 3). Trotzdem gelang es erst mit der Erfindung der Elektronenröhre (LEE DE FOREST, 1906) und der Entwicklung von stabilen Verstärkern, sehr

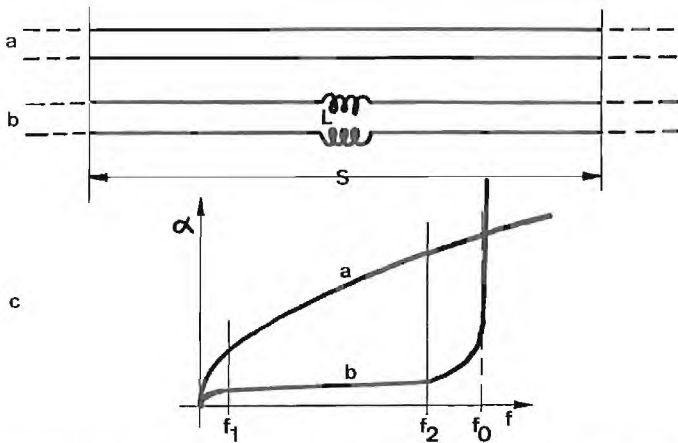


Abb. 3. a) homogene Leitung, b) derselbe Leitungsabschnitt pupinisiert, d. h. in der Mitte wird eine reine Induktivität in Serie geschaltet. c) Dämpfungskonstante α in Abhängigkeit von der Frequenz für die beiden Fälle a) und b). f_1 300 Hz, f_2 3400 Hz, f_0 Grenzfrequenz der Pupinleitung. Die Dämpfungskonstante α ist das logarithmische Mass für das Verhältnis Eingangs- zu Ausgangsenergie des definierten Leitungsabschnittes, z. B. 1 km. Alte Technik: $s = 1,83$ km, $L = 177$ mH, $f_0 = 3000$ Hz. Neue Technik: $s = 0,915$ km, $L = 88$ mH, $f_0 = 4200$ Hz. Pupinleitungen übertragen nur das Sprachfrequenzband; die homogene Leitung, zu der auch koaxiale Leitungen gehören, übertragen bis zu 60 MHz ($60 \cdot 10^6$ Hz).

grosse Entfernungen zu überbrücken, z. B. die Durchquerung der Vereinigten Staaten von Amerika von New York nach San Francisco. Mit dem Einsatz von Verstärkern, einem Glied in der Kette, das nur in einer Richtung arbeitet, wurden 4-Draht-Leitungen notwendig, d. h. eine zweidrahtige Leitung mit Verstärkern in jeder Richtung (Abb. 4). Diese Technik fand ab 1920 auch in der Schweiz mit 2-Draht-Leitungen im Inland und 4-Draht-Leitungen ins Ausland und für die Transitverbindungen Anwendung. Fast zur gleichen Zeit wurde in der Schweiz die Elektrifizierung der Bahnen begonnen. Die bis dann fast ausschliesslich verwendeten oberirdischen Leitungen für den Fernverkehr, die vorwiegend neben den Bahntrassen gebaut worden waren, wurden durch den Bahnstrom induktiv erheblich gestört. Auch konnte die Zahl der 2-Draht-Leitungen auf einem Leitungstrasse nicht beliebig erhöht werden. Aus diesen Gründen mussten Kabel mit viel mehr Drahtpaaren abseits der Bahnlinien verlegt

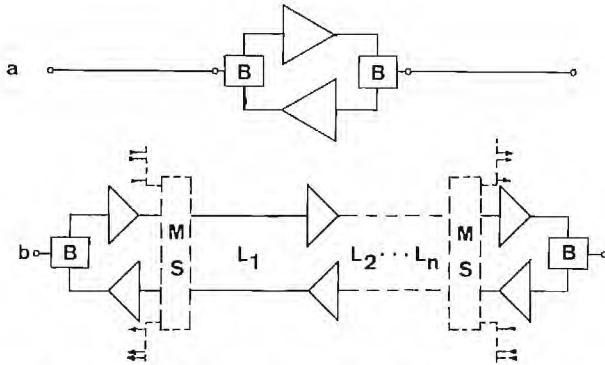


Abb. 4. a) Zwei-Draht-Leitung mit einem Verstärker in der Mitte. Es wird nur das Sprachfrequenzband übertragen. Die Leitungen sind pupinisiert. Grösste Distanzen 500 km mit 6 Leitungsabschnitten und 5 Verstärkern. Nach 1946 wurde diese Technik verlassen. b) Vier-Draht-Leitung mit n Leitungsabschnitten und $n+1$ Verstärkern. Der Übergang von 2- auf 4-Draht mit der Brückenschaltung B ist für jede Sprechverbindung notwendig. Eine Multiplexierung von Telefonkanälen kann erst auf der Vier-Draht-Seite in den Blöcken MS erfolgen. Die Art des Viel-Kanal-Systems ist bestimmend auf die Wahl der Leitungen und der Verstärker.

werden. Alle wurden pupinisiert. Die notwendigen Verstärker wurden in geeigneten Orten konzentriert.

In Ländern mit weiten Entfernungen versuchte man mit Erfolg die Leitungen besser auszunützen, indem auf einer Leitung mehrere Gespräche gleichzeitig, aber voneinander unabhängig übertragen wurden. Diese sogenannte Trägertechnik (Frequenzmultiplex) wurde seit 1920 bis heute derart ausgebaut und verfeinert, dass heute Trägersysteme mit oberer Frequenzbandgrenze von 60 MHz über 10000 Gespräche über je eine 1 cm dicke Koaxialkabelleitung für jede Richtung mehr als 500 km Distanz zu überbrücken vermögen.

Diese Leistung wäre aber nicht denkbar, wenn wir nur auf die Elektronenröhren (Trioden und Pentoden) angewiesen wären. Nur dank der zweiten elektronischen Revolution (die erste war die Einführung der Elektronenröhre) durch die elektronischen Halbleiter, hauptsächlich der Transistoren (1948), und der integrierten Schaltungstechnik wurde es möglich, solche Systeme raum-, gewicht- und leistungsparend zu bauen (siehe Umschlagbild B).

5. Frequenzmultiplex

Wie der Name andeutet, wird ein breites Frequenzband aufgeteilt in mehrere nebeneinanderliegende Bänder, welchen je ein Gesprächskanal zugeordnet wird. Man unterscheidet verschiedene Modulationsmöglichkeiten, wie das Sprachsignal aus dem ursprünglichen Frequenzband in ein anderes Band höherer Frequenz transformiert wird. Zur Veranschaulichung kann das Sprachsignal zunächst in eine Summe reiner Töne zerlegt werden. Jeder ist gekennzeichnet durch die Amplitude a , die Frequenz f und

die Phase φ . Viele solcher Töne a_ν, f_ν und φ_ν bilden einen Klang. Dieser, als Ersatz für das Sprachsignal, wird dargestellt als Summe

$$x = \sum_1^n a_\nu \cos(2\pi f_\nu t + \varphi_\nu),$$

wobei die Frequenzen f_ν zwischen 300 und 3400 Hz liegen sollen. Zur Transformierung brauchen wir ein Hilfsfrequenzsignal y , den sogenannten Träger mit der Frequenz F .

$$y = b \cdot \cos(2\pi F t + \phi).$$

Eine Modulation kann auf verschiedene Weise stattfinden.

5.1. Zweiseitenbandmodulation

Anwendung in Rundfunksendern, Lang-, Mittel- und Kurzwellen, auch als Amplitudenmodulation bekannt. Es wird allein die Trägeramplitude b durch das Sprachsignal beeinflusst:

$$b = b_0(1 + \varepsilon \cdot x) = b_0(1 + m) \quad b_0, \varepsilon \text{ Konstante,}$$

wobei $|m| = |\varepsilon \cdot x| < 1$ erfüllt sein muss.

$$y = b_0[1 + \varepsilon \sum a_\nu \cos(2\pi f_\nu t + \varphi_\nu)] \cos(2\pi F t), \quad \phi = 0$$

umgeformt:

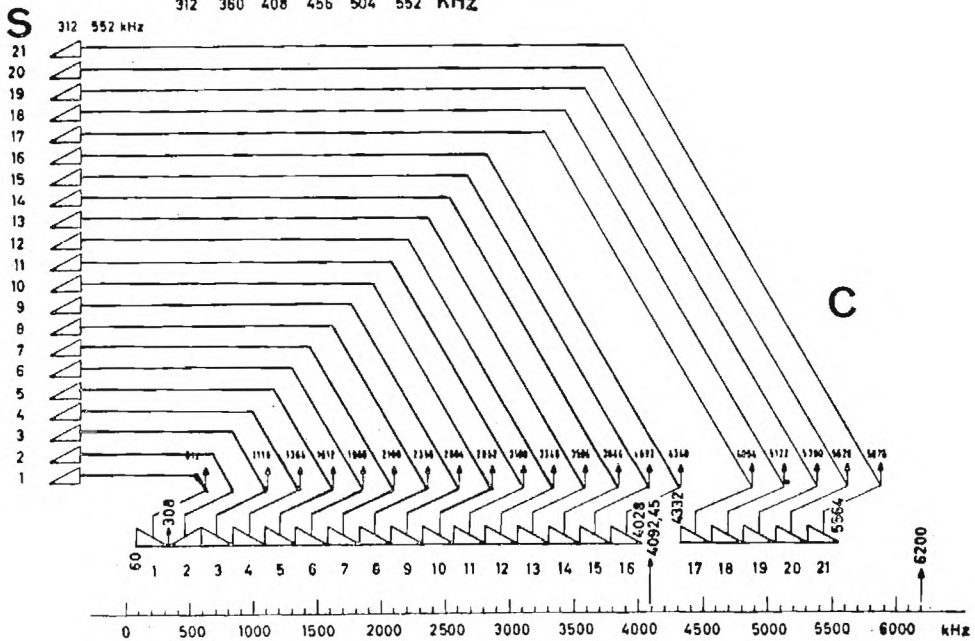
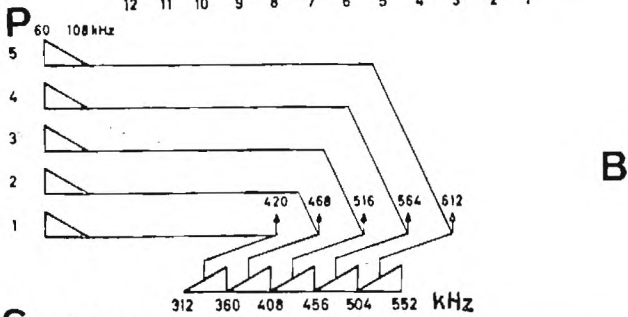
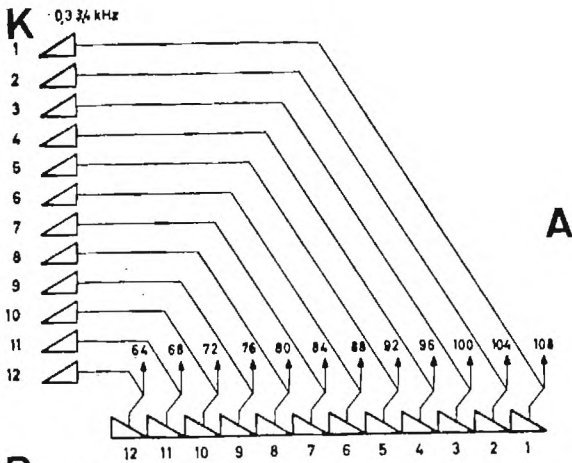
$y = b_0 \left[\underbrace{\cos(2\pi F t)}_{\text{Träger}} + \varepsilon \sum \underbrace{\frac{a_\nu}{2} \cos[2\pi(F+f_\nu)t + \varphi_\nu]}_{\text{oberes Seitenband}} + \varepsilon \sum \underbrace{\frac{a_\nu}{2} \cos[2\pi(F-f_\nu)t - \varphi_\nu]}_{\text{unteres Seitenband}} \right]$

Der Frequenzbedarf wird bestimmt durch die im Sprachsignal auftretende höchste Frequenz f_ν , hier also von $F+f_\nu$ und $F-f_\nu$. Die beanspruchte Bandbreite ist $2f_\nu$ mit der Mittenfrequenz F .

5.2. Einseitenbandmodulation ohne Träger

Betrachten wir die obenstehende Formel und greifen ein Seitenband heraus, z. B. das obere, dann erhalten wir die gewünschte Modulation, zum Beispiel

Abb. 5. Frequenzmultiplexsystem für 1260 Sprechkanäle. 1260 = 12 · 5 · 21. A. Bildung einer Primärgruppe P aus 12 Sprechkanälen K von je 0,3–3,4 kHz im Frequenzband von 60 bis 108 kHz. B. 5 solcher Primärgruppen P werden zu einer Sekundärgruppe S im Frequenzband von 312 bis 552 kHz zusammengefasst. C. 21 verschiedene Sekundärgruppen S werden nebeneinander in das Frequenzband von 60 bis 5564 kHz verschoben. 3 Pilotfrequenzen dienen der Kontrolle. Die Übertragung geschieht mittelst zweier Koaxialleitungen, für jede Richtung eine mit den entsprechenden Verstärkern.



$$y = b_0 \varepsilon \sum \frac{a_v}{2} \cos [2 \pi (F + f_v) t + \varphi_v].$$

Dieses Signal unterscheidet sich vom ursprünglichen Sprachsignal durch einen konstanten Faktor für alle Amplituden und einer konstanten Frequenzverschiebung F aller Frequenzkomponenten. Dasselbe gilt, wenn wir das untere Seitenband wählen, dann sind die verschobenen Frequenzen bestimmt durch

$$F - f_v.$$

Beide Möglichkeiten werden benutzt. Die benötigte Bandbreite beträgt nicht mehr als das Sprachband selbst. Die Trägerfrequenz F wird nicht übertragen. Diese Eigenschaft des kleinen Frequenzaufwandes prädestinierte diese Modulationsart zur Ausnutzung von Leitungen, indem viele verschiedene Sprechkanäle frequenzmässig nebeneinander übertragen werden können. Der Frequenzabstand von Kanal zu Kanal wurde international zu 4 kHz festgelegt. Zwölf Kanäle zwischen 60 und 108 kHz bilden eine Primärgruppe (Abb. 5). Fünf solcher Gruppen, bestehend aus weitem Sprechkanälen, werden durch zusätzliche Frequenzverschiebungen nebeneinandergelegt und bilden eine Sekundärgruppe, bestehend aus 60 voneinander getrennten frequenzverschobenen Sprachkanälen. 21 verschiedene Sekundärgruppen werden frequenzmässig nebeneinander angeordnet, so dass ein System von 1260 Sprachkanälen, jeder 4 kHz umfassend, entsteht, das ein Frequenzband von 60 kHz bis 5,6 MHz beansprucht.

5.3. Frequenzmodulation

In dieser Modulationsart wird die Trägeramplitude vom Sprachsignal nicht beeinflusst, dagegen die Trägerfrequenz F . Das entstehende Signal kann in folgender Weise dargestellt werden:

$$y = b \cdot \cos [2 \pi t \cdot \underbrace{F_0 (1 + \varepsilon x)}_F] \quad \varepsilon x \ll 1.$$

Die Frequenz F ist ein Abbild des Sprachsignals. Eine verwandte Modulationsart ist die Phasenmodulation, bei der die momentane Frequenz F mit der zeitlichen Ableitung des Sprachsignals zusammenhängt.

$$F = F_0 \left(1 + \varepsilon \frac{dx}{dt} \right) \quad \varepsilon \frac{dx}{dt} \ll 1,$$

$$F = F_0 \left[1 - \varepsilon \sum \frac{a_v}{2 \pi f_v} \sin (2 \pi f_v t + \varphi_v) \right].$$

Die Amplituden der höhern Frequenzanteile des Sprachsignals haben einen kleinern Einfluss auf die Momentanfrequenz F als bei der Frequenzmodulation.

Beide Modulationsarten werden bei den UKW-Rundfunksendern angewandt. Das beanspruchte Frequenzband ist ein Mehrfaches des Sprach- respektive Musikbandes. Störungen, atmosphärische oder durch benachbarte schwächere Sender im gleichen

Band, können durch gute Empfänger weitgehend ausgemerzt werden, was bei Amplitudenmodulation nicht möglich ist.

Die Satellitenübertragung verwendet ebenfalls Frequenzmodulation, wobei eine ganze Kanalgruppe eines Trägersystems als Eingangssignal dient.

6. Zeitmultiplex

Eine andere Möglichkeit, verschiedene Informationskanäle über die gleiche Leitung zu übertragen, besteht darin, dass die Verschachtelung zeitlich geschieht. Dies setzt aber voraus, dass die Informationen in Form von Pulsfolgen vorliegen. In der Telegraphie war diese Voraussetzung stets erfüllt. Man darf deshalb nicht erstaunt sein, dass BAUDOT bereits 1869 ein Patent anmeldete für ein Zeitmultiplexsystem, mit dem er bis fünf Telegramme, sozusagen gleichzeitig, über eine Leitung befördern konnte (Abb. 6). Zugleich erfand er einen Typendrucker als Empfänger, der Buchstaben drucken konnte. Jedem Buchstaben des Alphabets entsprach eine Pulsfolge von 5 binären Zeichen (ein binäres Zeichen = 1 Bit = Puls oder kein Puls). Der Sen-

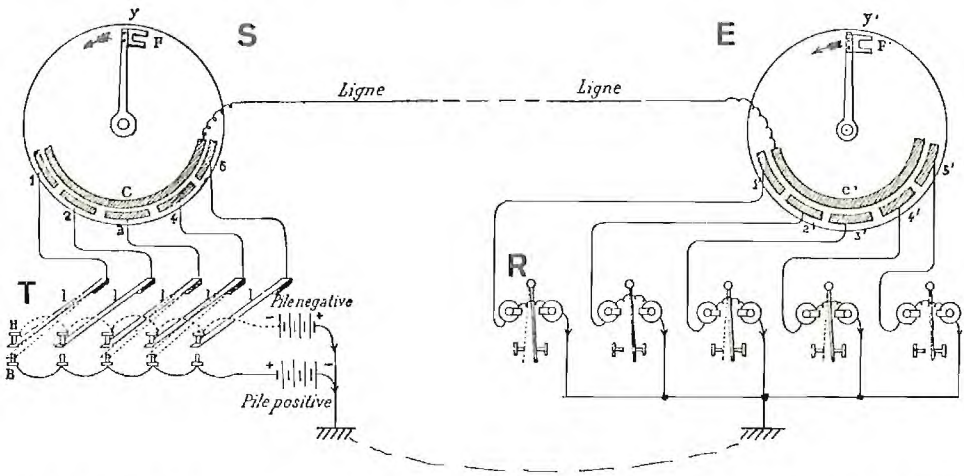


Abb. 6. Prinzip des Baudot-Telegraphen (Figur entnommen aus «Télégraphe imprimeur» de M. E. BAUDOT, Société générale d'exploitation d'appareils télégraphiques, Paris 1885). S Sender, T 5-Tasten-Klaviatur, E Empfänger, R polarisierte Relais, die die Eigenschaft haben, je nach Stromrichtung ihre Stellung beizubehalten. Die Schleifkontakte F und F' von Sender und Empfänger laufen synchron. Der Telegraphist drückt eine Kombination der 5 Tasten gleichzeitig nieder. Der Schleifkontakt F verbindet sukzessive die Lamellen 1 bis 5 mit der Leitung. Die gedrückten Tasten erzeugen einen positiven, die nicht betätigten einen negativen Stromstoß. Die positiven Stromstöße werfen den Anker der entsprechenden Relais nach links, die negativen nach rechts. Nach Überstreichen des Kontaktes 5 bzw. 5' zeigen die Relaisstellungen dieselbe Kombination wie die Tastenstellungen. Die Dekodierung erfolgt elektromechanisch mit einem Druckrad auf einen Papierstreifen. Durch entsprechende Konstruktionen konnten bis zu 5 solcher Einheiten in einem Umlauf untergebracht werden.

der eines Telegrammkanals bestand aus einer Klaviatur mit 5 Tasten, die in der Kombination, welche dem zu sendenden Buchstaben entsprach, gleichzeitig niedergedrückt werden mussten. Jede Taste betätigte einen Kontakt. Jeder Kontakt war mit einem Segment eines Verteilers mit rotierendem Schleifkontakt fest verbunden. Der Schleifkontakt spies die Fernleitung, die über einen gleichen Verteiler die Pulse an entsprechende Segmente und damit an den Empfangsapparat abgab. Fünf Sender konnten fünf zugeordnete Drucker betätigen, sofern bei beiden Verteilern die Schleifkontakte synchron über die entsprechenden Segmente liefen. Jeder Sender wurde von einem Telegraphisten bedient, der sich dem Umlaufrhythmus des Verteilers anzupassen hatte. Bei grossem Verkehrsandrang konnten damit teure Leitungen eingespart werden.

Zur Zeit der Gründung des Völkerbundes (1920) wies der Telegraphenverkehr einen Höhepunkt über weite Distanzen auf, während die Telephontechnik mit dem Einsatz von Verstärkern auf weite Entfernungen sich erst entwickelte. Sehr bald aber lief das Telephon auch hier dem Telegraphen den Rang ab. Die BAUDOT-Technik starb. Die Tonfrequenztelegraphie in Verbindung mit der Frequenzmultiplextechnik gestattete die gleichzeitige Übertragung von 18 bis 24 Fernschreibtelegrammen auf einer Telephonleitung. Das BAUDOT-Prinzip wurde aber von 1950 an in veränderter Form wieder verwendet zur Übertragung von Fernschreibtelegrammen über radio-telegraphische Verbindungen zwischen den Kontinenten.

Die Elemente, die sich für das Zeitmultiplexverfahren eignen, sind kurzzeitige Pulse zeitlich rechteckiger Form. Die eine Nachricht bildenden, aufeinanderfolgenden Pulse müssen in irgendeiner Form die Information tragen, die zu übermitteln ist. Man spricht auch hier von einer Modulation der Pulse, kurz Pulsmodulation genannt. Wird die Pulsdauer sehr klein gemacht gegenüber dem zeitlichen Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Pulsen, so können in diesem Zeitintervall Pulse mit anderer aufgeprägter Information mit derselben Leitung übertragen werden. Verschiedene Verfahren sind möglich und werden angewandt.

6.1. Pulsamplitudenmodulation, PAM

Es wird als Träger der Information die Amplitude A benutzt (siehe Abb. 2). Sie allein ändert sich gemäss der Information von Puls zu Puls. Alle übrigen Grössen bleiben konstant. Wie später ausgeführt wird, dient die Pulsamplitudenmodulation als Zwischenstufe zur Weiterverarbeitung und Transformierung in die modernste Form zur Übermittlung über grösste Entfernungen von Sprache und Musik.

6.2. Pulsbreitenmodulation, PDM

Bei dieser dient die Pulsdauer t_p als Träger der Information. Alle übrigen Grössen des Pulses bleiben unverändert. Gewisse Anwendungen dieser Modulationsart findet man in Fernmesssystemen oder als Zwischenstufe zur Herstellung der Pulsphasenmodulation.

6.3. Pulsphasenmodulation (Puls-lagemodulation), PPM

Hier sind die Pulse normalisiert; weder die Amplitude noch die Dauer ist veränderlich. Die Information wird durch die zeitliche Lagenabweichung (Phase) gegen eine Normallage (Phase = 0) dargestellt. Diese Modulationsart eignet sich besonders gut in Verbindung mit Richtstrahl-Mikrowellen-Links und findet auch Anwendung für Sprachübertragung in Zeit-Vielkanal-Systemen.

In den bisher beschriebenen Verfahren können die charakteristischen Grössen in bestimmten Grenzen jeden beliebigen Wert annehmen, also zwischen endlichen Grenzen theoretisch unendlich viele. Die nächsten zwei zu beschreibenden Verfahren dienen zur Kennzeichnung einer beschränkten Menge von Informationswerten pro Puls durch Kombinationen normierter Pulse in bestimmter Anzahl.

6.4. Pulscodemodulation, PCM

An die Stelle eines Pulses tritt eine Pulsgruppe mit normierten Pulsen. Die zeitliche Folge von: Puls vorhanden, kein Puls vorhanden in einer bestimmten Zeit charakterisiert die Information. Zum Beispiel beim Schreibtelegraphen hat jeder Buchstabe eine bestimmte Zeitfolge von 5 Elementen, Puls oder kein Puls, zugeordnet. Fünf Elemente gestatten 32 verschiedene Kombinationen, also die Codierung von 26 Buchstaben des Alphabets. Zusätzlich sollte man noch 10 Ziffern, Satzzeichen u. a. m. ebenfalls codieren. Da man nicht mehr als 5 Zeitelemente benutzen wollte, wurden 2 Umschaltzeichen codiert, welche den Empfänger veranlassten, von Buchstaben zu Ziffern und Zeichen oder umgekehrt umzuschalten. Die Ziffern und Zeichen benutzen die gleichen Pulsfolgen wie die Buchstaben.

Die PCM wird heute auch für die Übertragung von Sprache verwendet, und zwar bis zu $4 \times 4 \times 30 = 480$ Kanälen in Zeitmultiplex. Pro Kanal werden 8 Pulselemente zur Charakterisierung eines Amplitudenmomentanwertes gebraucht. Damit können $2^8 = 256$ fixierte Amplitudenwerte codiert werden. Die Darstellung der ganzen Problematik findet sich im Kapitel 9.

6.5. Pulsdeltamodulation, PDM

Auch diese benutzt normierte Ja-, Nein-Pulse in regulärer Zeitfolge. Ein Ja-Puls bedeutet, dass der momentane zu übertragende Wert grösser ist als der vorhergehende, ein Nein-Puls = kein Puls bedeutet, dass er kleiner ist als der vorangegangene. Da nur das Vorzeichen einer Differenz mit dieser Methode übertragen wird, muss der Empfänger eine Integration je nach Zeichen in positiver oder negativer Richtung ausführen. Aus verschiedenen Gründen ist die Anwendung dieser Pulsmodulation sehr bescheiden geblieben, obwohl verschiedene Massnahmen vorgeschlagen wurden, die wesentliche Einsparungen hinsichtlich Pulstaktfrequenz erlauben. In Verbindung mit Zeitmultiplex ist der apparative Aufwand, verglichen mit PCM, wesentlich grösser.

6.6. Pulsfrequenzmodulation, PFM

Es werden ebenfalls normalisierte Pulse verwendet, aber die Anzahl Impulse pro Zeiteinheit stellen die Information dar. In diesem Sinne gehört die PFM zur ersten Gruppe, da eine kontinuierliche Veränderung der Pulsfrequenz möglich ist. In Verbindung mit dem Pulszeitmultiplex wird PFM kaum verwendet. Dagegen ist sie beliebt für Fernmesswertübertragung, z. B. Wasserstand, elektrische Leistung u. a. m., auf kürzere Entfernungen.

7. Das Abtastproblem

Beim Frequenzmultiplexverfahren trat dieses Problem nicht auf, da das elektrische Signal der Sprache kontinuierlich in eine andere Signalform gebracht wird. Solange die Sprachsignale in den benachbarten Kanälen in ihren Frequenzanteilen zwischen 300 und 3400 Hz beschränkt sind, wird keine gegenseitige Beeinflussung stattfinden. Im Zeitmultiplexverfahren dagegen werden nur einzelne Momentanwerte der Sprachsignale in Pulsform in regelmässiger Zeitfolge übertragen.

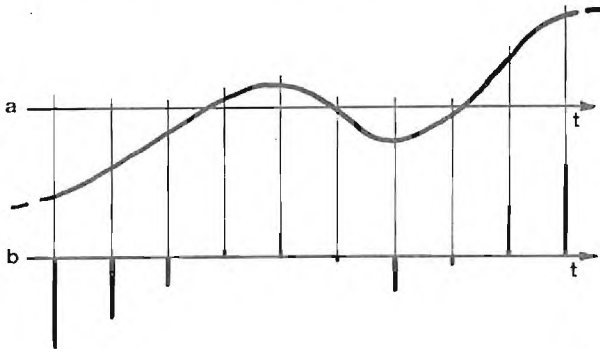


Abb. 7. Prinzip der Abtastung. a) Analoges Signal, z. B. Sprache, b) Abtastpulse in regelmässiger Zeitfolge. T_r = Abtastzeit ergibt Pulsamplitudenmodulation des analogen Signals.

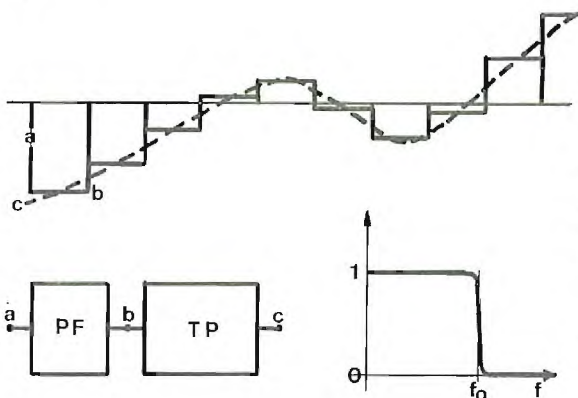


Abb. 8. Bildung der Treppenfunktion b aus dem PAM-Signal a und Rückgewinnung des Analogsignals c nach Durchlaufen eines Tiefpassfilters TP mit der Grenzfrequenz f_0 . Der Block PF erzeugt die Treppenfunktion. Sofern im ursprünglichen Analogsignal nur Frequenzanteile unterhalb der halben Taktfrequenz $\frac{1}{2T_r} = f_0$ vorhanden waren, gelingt die Rückgewinnung ohne Fehler.

Betrachten wir zunächst nur einen Vorgang mit einem veränderlichen Signal (Abb. 7). Dieses wird in regelmässigen Zeitabständen abgetastet, so dass eine Pulsfolge mit veränderlicher Amplitude entsteht. Die Frage lautet: Wie gewinnt man aus der Pulsfolge wieder das ursprüngliche Signal und wie lauten die Bedingungen, die zwischen den Eigenschaften des Signals und der Pulstaktfrequenz erfüllt sein müssen?

Auf der Empfängerseite verlängern wir jeden Puls zeitlich soviel, bis der nächstfolgende erscheint (Abb. 8a). Damit entsteht ein Signal mit Treppenstufen. Schickt

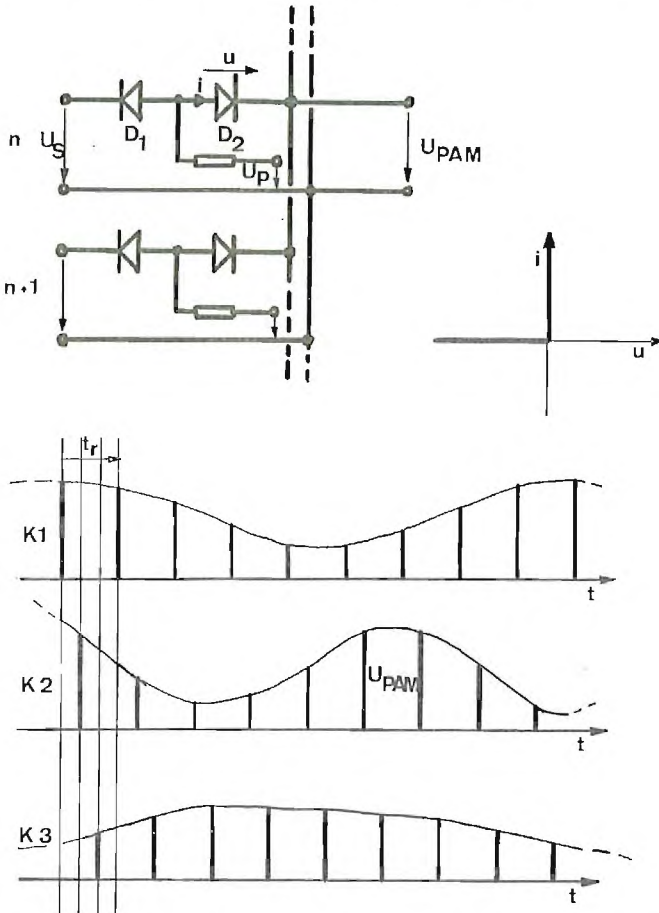


Abb. 9. Abtastschaltung und Zeitmultiplexierung. Die analogen Signale (Sprache) U_S werden von links zugeführt. Die Abtastpulse U_P steuern über einen Widerstand die Dioden D_1 und D_2 . Damit die Schaltung funktioniert, müssen alle Signalspannungen positiv, aber kleiner sein als die Abtastpulse U_P . Die Ausgangsspannung U_{PAM} nimmt dann stets den Wert jener Signalspannung U_S an, während der sie von einem Abtastpuls U_P in eine leitende Verbindung mit der Sammelschiene gebracht wird. Die ideale Diodenkennlinie sagt aus: Ist die Spannung u positiv, dann ist der Widerstand der Diode Null, ist sie negativ, dann ist er unendlich gross. Im untern Teil der Figur ist ein Zeitmultiplex für 3 Kanäle gezeichnet. Die Abtastpulsfolgen sind zeitlich versetzt. Auf der Sammelschiene erscheinen die Abtastpulse aller Kanäle.

man dieses Signal durch ein Tiefpassfilter, so werden die Stufen ausgemittelt, so dass die Form des gewonnenen Signals, abgesehen von einer kleinen Zeitverschiebung, dem des ursprünglichen beinahe gleich ist. Das verwendete Tiefpassfilter lässt nur Frequenzanteile unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz f_0 passieren; alle höheren Frequenzanteile werden unterdrückt. Intuitiv lässt sich folgendes erkennen: Je rascher sich die zu übertragenden Signale ändern, um so kürzer müssen die Zeitabstände der Abtastsignale gewählt werden, damit eine Übereinstimmung des Ausgangssignals mit dem ursprünglichen erzielt wird. Rasche Veränderungen im Signal werden von seinen höchsten Frequenzanteilen hervorgerufen. Für eine einwandfreie Wiedergewinnung des Signals beim Empfang muss die Taktfrequenz der Abtastimpulse mindestens zweimal grösser sein als die höchste Frequenzkomponente des Signals. Die Grenzfrequenz des Tiefpassfilters im Empfänger wird so gewählt, dass alle Frequenzanteile des Signals durchgelassen werden, Anteile mit der halben Abtastfrequenz und höherer aber gesperrt werden. International wurde folgende Norm für Sprachübertragung festgelegt:

Taktfrequenz $f_s = 8000$ Hz.

Grenzfrequenz des TP-Filters f_0 ca. 3700 Hz.

Höchste zu verarbeitende Sprachfrequenz 3400 Hz.

Wie ein solches PAM-Signal gewonnen werden kann, zeigt Abb. 9. Die Dioden werden der Einfachheit halber als ideal angenommen, d. h. im Durchlassbereich (u positiv) ist ihr Widerstand Null, im Sperrbereich (u negativ) unendlich. Zwischen den Abtastpulsen ist D_1 undurchlässig (Widerstand gleich unendlich), $U_{PAM} = 0$. Ist die positive Spannung der Abtastpulse grösser als die Signalspannung U_S , so wird während der Tastzeit die Diode D_1 und D_2 leitend und damit wird die Ausgangsspannung U_{PAM} gleich der Signalspannung U_S . Will man mehrere Kanäle in einem Zeitmultiplex vereinen, so müssen die Abtastpulse verschiedener Kanäle zu verschiedenen verschobenen Zeiten erfolgen. Die Dioden D_2 dienen als Trennglieder zwischen den Kanaleingängen, denn U_P ist in allen Kanälen gleich Null, ausser jenem, der gerade abgetastet wird, und somit haben alle übrigen Dioden D_2 einen unendlich grossen Widerstand, wie übrigens auch alle Dioden D_1 der nicht abgetasteten Kanäle. Alle Pulszeitmultiplex-Systeme verwenden die PAM als ersten Schritt. Die Transformation in ein anderes Pulsmodulationsverfahren, ausser für PDM, erfolgt dann gemeinsam für alle Kanäle.

8. Das Problem der Übertragung bei Zeitmultiplex

Beim Frequenzmultiplexsystem haben wir gesehen, dass ein Frequenzband zu übertragen ist, das etwas grösser sein muss als das Produkt der Anzahl Sprachkanäle mit dem gewählten Frequenzabstand nebeneinanderliegender Kanäle (internationale Norm 4 kHz).

Beim Zeitmultiplexsystem ist eine Folge von Pulsen zu übertragen, deren Taktfrequenz dem Produkt der Anzahl Sprachkanäle mit der Abtastfrequenz des Einzel-

kanals entspricht. Theoretisch könnte man sich mit der Übertragung eines Frequenzbandes begnügen, das der Hälfte dieses Produktes (Taktfrequenz des Systems dividiert durch zwei) entspricht. Der Einzelpuls würde bei einer solchen Frequenzbandbegrenzung bei einer Übertragung hoher Qualität gemäss Abb. 10 verändert. Da die andern Kanälen angehörenden Pulse in Zeitabständen T_r folgen, ergibt sich als gesamtes Empfangssignal eine additive Überlagerung aller einzelnen Empfangssignale. Die einwandfreie Trennung der einzelnen Kanäle aus diesem komplexen Signal ohne gegenseitige Beeinflussung ist schwierig. Überträgt man die Pulsfolge mit einem Frequenzband,

Abb. 10. Übertragung eines Einzelpulses über ein frequenzbandbegrenzt System mit der Grenzfrequenz f_0 . Ausser der Laufzeit t_g bemerkt man ein Ausschwingen mit der Frequenz f_0 . Die Nulldurchgänge dieses Ausschwingens liegen zeitlich um $\frac{1}{2f_0}$ auseinander.

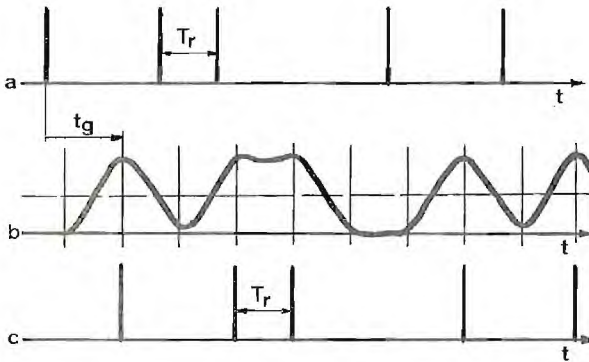
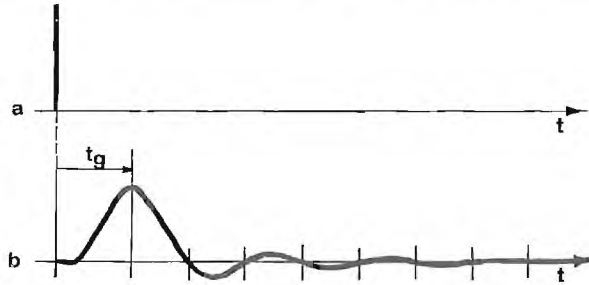


Abb. 11. a) Binäre Pulsfolge mit der Taktfrequenz f_r . b) Signal nach Durchlaufen eines frequenzbandbegrenzt Systems mit der Grenzfrequenz $f_0 = \frac{1}{2T_r}$. c) Regenerierte binäre Pulsfolge, gewonnen aus b) durch Abtasten der Maxima bzw. Minima. Die gestrichelte Horizontale bedeutet eine gewählte Schranke. Liegt der Abtastwert oberhalb, ist es ein Puls; liegt er unterhalb, ist es kein Puls.

das der Taktfrequenz entspricht, dann ist die Trennung schon leichter. Die Rückgewinnung der einzelnen Kanäle bei einem PAM-Empfänger geschieht durch Abtastung des Empfangssignals in den Zeitpunkten der Einzelmaxima und Zuweisung durch elektronische Schalter an den entsprechenden Kanalausgang.

Der Aufwand an Entzerrern bei Kabelleitungen über grössere Entfernungen wird mit Ausnahme der PCM und PAM für alle Pulsmodulationen im Zeitmultiplex zu gross, um das Gesprächsgeheimnis (sehr geringe gegenseitige Beeinflussung benachbarter Sprachkanäle) zu gewährleisten. Bei den binären Systemen ist das Erkennen, Puls oder kein Puls, sehr viel einfacher. Die Amplituden aller ausgesandten Pulse sind gleich gross (Abb. 11 a). Beim Empfänger sind für einwandfreie Übertragung nur zwei Niveaus sicher zu unterscheiden. Dazu dient eine Schranke von etwa der Hälfte der gemittelten maximalen Empfangsamplitude. Ist zum Zeitpunkt der Abtastung des Empfangssignals sein Momentanwert grösser (kleiner) als die Schranke, so wird

ein (kein) Puls erzeugt und ausgesandt. Zeitlich verschoben um die Laufzeit des Signals kann die gesendete Pulsfolge vollkommen wieder hergestellt werden (Abb. 11 b, c). Die notwendigen Verstärker in der Leitung sind so gebaut, dass sie als Pulswiederholer funktionieren (Abb. 12). Zuerst wird die Leitung entzerrt E, dann das Signal verstärkt VB, zu den Abtastzeitpunkten verglichen mit dem Wert der Schranke ENT und je nach Resultat ein oder kein Puls erzeugt und auf dem nächsten Leitungsabschnitt ausgesandt PF. Die Gewinnung der geeigneten Abtastzeiten geschieht durch Auswerten der Zeitpunkte, bei denen das Empfangssignal gleich gross wie der Wert der Schranke ist TG.

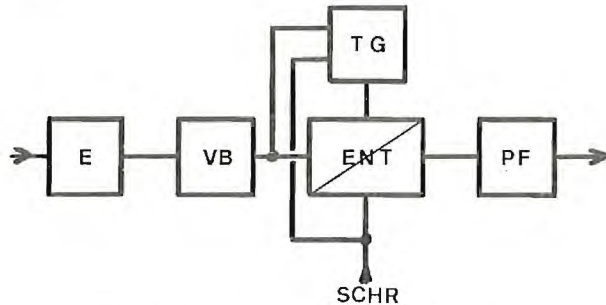


Abb. 12. Prinzipschema eines PCM-Leitungsverstärkers. E linearer Entzerrer der Leitung. VB Verstärker und Begrenzer. TG Taktgenerator zur Erzeugung der Abtastpulse im richtigen Zeittakt aus dem Signal nach dem Begrenzer mit Hilfe der Schranke SCHR. ENT Entscheidungsschaltung, ob im Abtastmoment das Signal nach dem Begrenzer grösser oder kleiner als die vorgegebene Schranke ist, d. h. ob der Pulsformer PF einen Puls herausgeben soll oder nicht.

9. Pulscodemodulation der Sprache

Die ersten Vorschläge wurden etwa zur selben Zeit (1947) gemacht, wie der Transistor erfunden wurde, ohne dass zwischen diesen Ereignissen ein Zusammenhang bestand. Aber erst die folgende Verbesserung und Weiterentwicklung des Transistors führte zur praktischen Anwendung der PCM für die Sprachübertragung. Wie bereits im Abschnitt 6.4 erwähnt, hat die internationale Normung den Code auf 8 Bits (1 Bit, ein oder kein Puls in der Folge) festgelegt. Damit stehen 256 Codewörter zur Kennzeichnung von getasteten Momentanwerten des Sprachsignals zur Verfügung. Wenn man bedenkt, dass nicht alle Menschen (Männer, Frauen, Kinder) gleich laut sprechen, dass die Mikrophone in den Telefonstationen unterschiedliche Empfindlichkeiten haben und dass die Leitungsabschnitte von der Station bis zum Ort der Modulation verschiedene Längen haben, so ergibt sich ein Verhältnis vom grössten zum kleinsten zu übertragenden Momentanwert von ca. 500 zu 1. Da zudem das Sprachsignal positive und negative Momentanwerte aufweist, muss ein Bit zur Kennzeichnung des Vorzeichens verwendet werden. Für die Kennzeichnung der absoluten Momentanwerte bleiben nur 128 Codewörter zu 7 Bits. Wir können diese 128 Codewörter

Momentanwertbereichen zuordnen. Die Frage stellt sich: «Wie müssen diese gewählt werden, damit nach dem Digital-analog-Wandler beim Empfänger ein Sprachsignal entsteht, das subjektiv vom ausgesandten nicht unterscheidbar ist?» Hier kommt uns die Natur unserer Sinnesorgane zu Hilfe. Der wahrgenommene Reiz im Hirn ist proportional zum Logarithmus der physikalischen Anregung:

- Beim Hören: Reizwert $\sim \log p$; p Schalldruck,
- beim Sehen: Reizwert $\sim \log E$; E Leuchtstärke,
- beim Tasten: Reizwert $\sim \log p$; p Druck.

Da der elektroakustische Wandler (Telephonhörer) linear arbeitet, ist der Schalldruck proportional zur Spannung (oder Strom) des elektrischen Signals. Die Bereiche zur

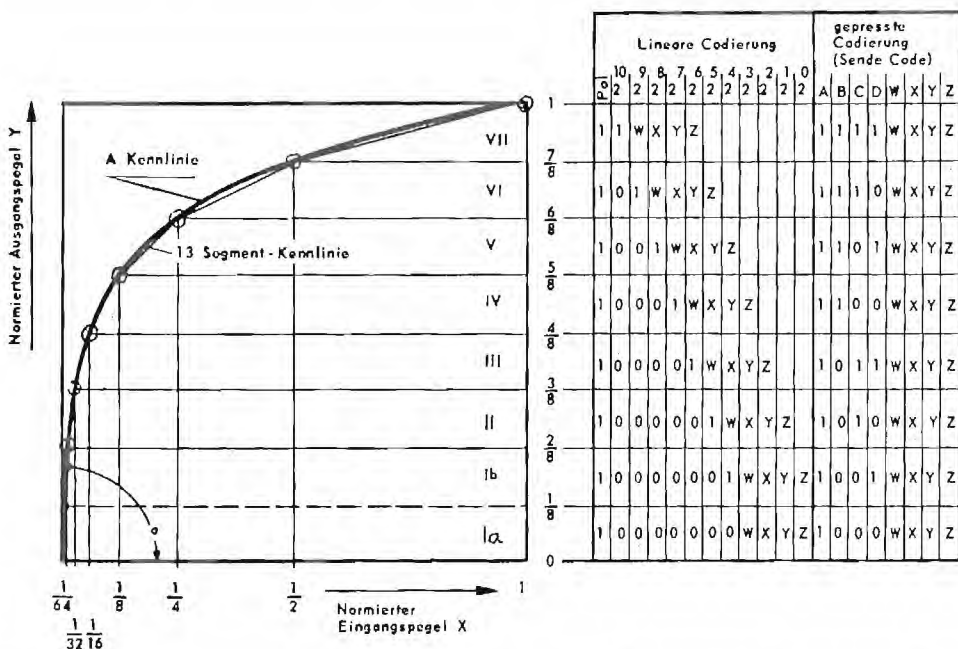


Abb. 13. Europäisch normierte Codierung von PAM in PCM. Der normierte Eingangspiegel X bedeutet die Momentanwerte der Sprachkanäle des Zeitmultiplexsystems bei den Abtastzeiten ($X \leq 1$). Jeder der acht Bereiche Ia bis VII ist in 16 Unterbereiche linear unterteilt. Die ausgezogene A-Kennlinie stellt das logarithmische Gesetz dar, welches durch die geraden Strecken angenähert wird. 16 Unterbereiche erfordern zur Codierung 4 Bit, in der Figur dargestellt durch $WXYZ$, die einzeln 0 oder 1 sein können. Die 8 Bereiche Ia bis VII erfordern 3 Bit, die mit BCD gekennzeichnet sind. Sie entsprechen dem binären Zahlensystem von 000 bis 111 aufsteigend vom Bereich Ia bis VII. Die erste Codeziffer gibt an, ob der Abtastwert positiv $A = 1$ oder negativ $A = 0$ ist. Teilt man den Bereich $X = 0$ bis 1 in 2^{11} gleich grosse Teile ein und codiert diese im binären Zahlensystem aufsteigend von Null an, so erhält man eine lineare Codierung. Der Zusammenhang zwischen dieser und der gepressten Codierung ist ersichtlich aus der Anzahl der Nullen vor $WXYZ$ der Bereiche Ib bis VII oder vor $WXYZ$ beim Bereich Ia. Der duale Ausdruck \overline{BCD} gibt im binären Zahlensystem die Anzahl der Nullen an. Zum Beispiel Bereich III: $\overline{BCD} = 011$, $\overline{BCD} = 100$ entspricht 4 Nullen.

Codierung werden deshalb zweckmässig so gewählt, dass sie gleichmässig alle Reizabstufungen überdecken, d. h. dass die Unterteilung des Spannungsbereiches vom absoluten Maximalwert bis zu einem sehr kleinen Wert logarithmisch zu erfolgen hat. Es wurde aus praktischen Gründen eine stückweise lineare Annäherung an eine logarithmische Bereicheinteilung der Spannungsskala gemäss Abb. 13 gewählt wie folgt: Die geraden Strecken (Bereiche Ia bis VII) sind linear in 16 kleinere Bereiche unterteilt, was je 4 Bits erfordert. 7 gerade Strecken (Bereiche Ib bis VII) bilden die Annäherung an die logarithmische Charakteristik zwischen der Spannung 0,0078 und der maximalen zu codierenden Spannung 1,0.

Tabelle 1 (siehe auch Abb. 13)

Bereich	U_{max}		Kleinste Differenzspannung	Code
	U. Gr.	O. Gr.		
Ia	0	2^{-7}	2^{-11}	0 0 0
Ib	2^{-7}	2^{-6}	2^{-11}	0 0 1
II	2^{-6}	2^{-5}	2^{-10}	0 1 0
III	2^{-5}	2^{-4}	2^{-9}	0 1 1
IV	2^{-4}	2^{-3}	2^{-8}	1 0 0
V	2^{-3}	2^{-2}	2^{-7}	1 0 1
VI	2^{-2}	2^{-1}	2^{-6}	1 1 0
VII	2^{-1}	$2^0 = 1$	2^{-5}	1 1 1

U. Gr. = untere Grenze, O. Gr. = obere Grenze

Die geraden Strecken Ia und Ib sind gleich linear unterteilt, bilden also eine Gerade. Sie weisen die kleinsten Bereichsintervalle auf, nämlich nur noch den 2048. Teil der maximal zulässigen Spannung.

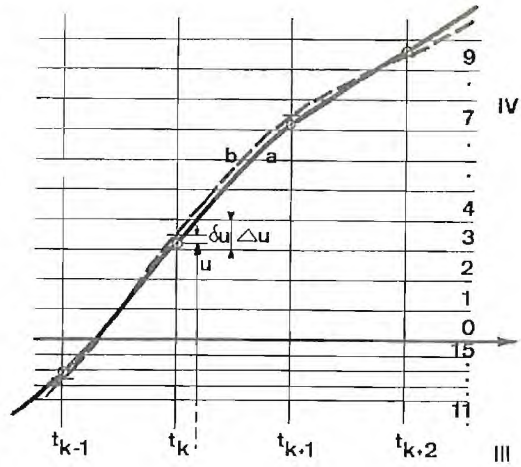
Wesentlich für die Reproduzierbarkeit beim Empfänger ist das Verhältnis ε der Bereichsbreite Δu zur zugehörigen Spannung u . Dieses Verhältnis $\varepsilon = \frac{\Delta u}{u}$ nimmt in allen Bereichen ausser dem Bereich Ia von der untern Grenze bis zur obern ab, und zwar von $2^{-4} = \frac{1}{16}$ zu $2^{-5} = \frac{1}{32}$.

Es hat sich gezeigt, dass die empfangene Sprache bei diesem gewählten Verhältnis einwandfrei wiedergegeben wird, trotzdem messbare Abweichungen sich in einem sogenannten Codierungsrauschen manifestieren. Die Abb. 14 soll diese Abweichungen erklären. Die Momentanwerte bei den Abtastzeiten liegen in bestimmten Bereichen und werden durch den Code in einer Pulsfolge ausgegeben, z. B. bei t_k :

U_{pos} : + Puls	1
Bereich IV	1 0 0
Unterbereich 3	0 0 1 1
auszusendende Pulsgruppe	1 1 0 0 0 0 1 1

Beim Empfänger werden im DA-Wandler feste Spannungen zum Aufbau des analogen Signals verwendet, so dass jedem Bereich ein fester Spannungswert zugeordnet wird.

Abb. 14. Codierungsgeräusch. Die Kurve *a* bedeutet das zu codierende Sprachsignal eines Telefonkanals. Zum Abtastzeitmoment t_k liegt der Momentanwert u im Bereich IV und Unterbereich 3. Er ist positiv. Die Codierung lautet gemäss Abb. 13 1100011. Im Empfänger wird eine Spannung regeneriert, die dem Wert in der Mitte des Unterbereiches 3 entspricht, also um $\frac{\Delta u}{u}$ grösser ist als die untere Grenze des Bereichs 3. Im normierten Empfangspegel erhält diese Spannung den Wert $u_c = 2^{-5} + 0 \cdot 2^{-6} + 0 \cdot 2^{-7} + 1 \cdot 2^{-8} + 1 \cdot 2^{-9} + 2^{-10}$. Das letzte Glied ist $\frac{\Delta u}{2}$ im Gebiet III. Die Kurve *b* ist das empfangene Sprachsignal. Die Differenzspannungen δu in den Abtastzeiten erzeugen beim Empfänger eine Störung, die vom System herrührt und als Codierungsgeräusch bezeichnet wird.



Es entstehen deshalb Abweichungen gegenüber dem ursprünglichen Abtastwert. Die Abweichungen δu sind statistisch über die Zeit in jedem Bereich gleich verteilt und betragen im Maximum $\frac{\Delta u}{2}$. Der Effektivwert der Abweichungen berechnet sich für diesen Fall zu $\frac{\Delta u}{2\sqrt{3}}$. Für die Bewertung ist aber nur das Verhältnis von diesem Wert zur dazugehörigen Spannung massgebend, also $\frac{\Delta u}{u} \cdot \frac{1}{2\sqrt{3}}$.

Dieses Verhältnis verändert sich in den Bereichen 2 bis 8 in gleicher Weise, nämlich bei der untern Grenze von 0,018 zur obern Grenze bis 0,009. Während einer Gesprächspause liegt das δu innerhalb $\pm \frac{\Delta u}{2}$ im Bereich Ia, also 2^{-12} mal u_{max} [$2^{-12} = \frac{1}{4096}$]. Diese Grösse liegt innerhalb des Geräusches, das durch andere Ursachen zum Empfänger gelangt.

Zusammengefasst kann man feststellen, dass infolge der Berücksichtigung der Eigenschaften des menschlichen Ohres ein PCM-System mit 8 Bits eine mit jedem andern Übertragungsverfahren ebenbürtige Qualität aufweist. Schon mit 6 Bits kann eine gute Verständigung gewährleistet werden, doch wird das Codierungsgeräusch bereits bemerkbar. Eine Voraussetzung muss allerdings erfüllt sein; es dürfen kaum Fehler in der Übermittlung vorkommen, d. h. dass beim Empfang die Erkennungswahrscheinlichkeit pro Bit nur sehr wenig kleiner als 1 sein darf. Es soll die Bitfehlerwahrscheinlichkeit kleiner als 10^{-6} sein, d. h. 1 Bitfehler pro 16 s für einen Sprachkanal ist tragbar. Wie wir im Kapitel 8 gezeigt haben, ist die Übertragung von binären Pulsen viel weniger störanfällig als bei anderen Pulsmodulationsarten.

10. Weitere Anwendungsmöglichkeiten der PCM

10.1. Übertragung von Musik

Gegenüber Sprache bedeutet die Musik eine Verbreiterung des zu übertragenden Frequenzbandes. Sprache 300–3400 Hz, Musik 30–15000 Hz. Auch die Dynamik, d. h. das Verhältnis des grössten Schallreizes zum kleinsten, ist etwa zweimal grösser als bei telephonischer Übertragung der Sprache. Zu verarbeiten ist also ein viermal grösseres Frequenzband und eine zweimal grössere Dynamik. Deshalb muss die Abtastfrequenz um den Faktor 4 erhöht werden, also 32 kHz sein. Mit dem PCM-Analog/digital-Wandler mit logarithmischer Kennlinie, wie er im vorigen Kapitel erläutert wurde, mit 8 Bits entsprechend 256 Amplitudenwerten kann auch der erweiterten Dynamik Genüge geleistet werden. Da eine PCM-Übertragung auf grössere Distanzen immer in Verbindung mit dem Zeitmultiplex erfolgt, ist die folgende Lösung naheliegend: Ein Zeitmultiplexrahmen umfasst 32 Kanäle mit gleichen zeitlichen Dauern. Davon werden zwei zur Synchronisation und zum Dienstkanal reserviert. Jedem Kanal wird ein Zeitabschnitt von $\frac{125}{32} \mu\text{s}$ eingeräumt. In jedem dieser Zeitabschnitte ist ein 8-Bit-Codewort unterzubringen, die Pulszeit wird $0,488 \mu\text{s}$ sein. Soll nun ein Musikkanal übertragen werden, so wird eine Gruppe von 4 Sprachkanälen in je $\frac{125}{4} \mu\text{s}$ Zeitabstand dafür eingesetzt, also jeder 8. Kanal in 32, z. B. Kanäle 1, 2 Synchronisation und Dienst, 3, 4, 5 Sprache, 6 Musik, 7–13 Sprache, 14 Musik, 15–21 Sprache, 22 Musik, 23–29 Sprache, 30 Musik, 31, 32 Sprache. In Abb. 9 würden die Eingänge der 4 betreffenden Abtastschaltungen mit dem Musikkanal verbunden.

Beim Empfänger geschieht dasselbe an den 4 entsprechenden Demodulatoren, die auf den Eingang eines Tiefpassfilters mit 15 kHz Grenzfrequenz zusammengeschaltet werden.

10.2. Übertragung von Bild- und Fernsehsignalen

Besonders geeignet ist die PCM zur Übertragung von stehenden Bildern, wie z. B. die Wolkenbilder über der Erde, aufgenommen von Wettersatelliten. Pro Bildpunkt genügen etwa 8 Werte der Helligkeit, was 3 Bitcodewörter verlangt. Die Übermittlung eines Bildes darf Minuten dauern. Eine gute Bildqualität erfordert mindestens 25 Bildpunkte pro mm^2 , eine Fläche A4-Format somit etwa 1,5 Millionen. Verlangt man eine Übertragungszeit von 5 Minuten, so müssten 5000 Bildpunkte pro Sekunde übermittelt werden. Sind diese mit 3 Bit-PCM codiert, wären 15000 Bits pro sec zu übermitteln, was beim heutigen Stand der Technik keine Mühe macht.

Für Fernsehbildübertragung ist das PCM-Verfahren im Studium in Verbindung mit Methoden, welche dazu führen, nicht dauernd in jeder Fünfundzwanzigstelsekunde den ganzen Bildinhalt zu übertragen, sondern nur den sich rasch verändernden Teil. Man hofft damit, die notwendige Bitrate (Bits pro Sekunde) etwa auf die Bildpunktrate der heutigen Fernsehübertragungstechnik herunterzubringen. Der Vorteil läge

darin, dass die Übertragung weniger stör anfällig würde. Der apparative Aufwand ist aber so gross, dass er sich nur für die Überwindung sehr grosser Distanzen lohnt, z. B. interkontinentaler Programmaustausch via Satelliten.

11. Entwicklung der Verbindungstechnik

Die Verbindungstechnik befasst sich mit dem Aufbau der Telephonnetze, welche einerseits aus den Schaltstellen (Telephonzentralen), andererseits aus der notwendigen Anzahl von Leitungen (oder besser ausgedrückt Sprechkanäle) bestehen. Bei der Einführung des Telephons zum öffentlichen Gebrauch lag das Hauptgewicht im lokalen Verkehr; es entstanden in den Städten Ortsnetze. Diese wiesen eine Zentrale auf, in welcher von Telephonistinnen die gefragten Verbindungen der Abonnementleitungen hergestellt wurden. Daraus ergaben sich Kriterien, die auch heute noch Gültigkeit haben. Es seien hier die Vorgänge kurz dargestellt, welche zu einer Telephonverbindung notwendig sind. Dabei bedeuten:

- | | |
|--|---|
| Anrufender Teilnehmer: | A |
| Angerufener Teilnehmer: | B |
| Zentrale (enthält auch die Zwischenämter und Fernleitungen): | Z |
- 1) A wünscht eine Verbindung: A hebt den Hörer ab.
 - 2) Z gibt die Bereitschaft kund: Summton.
 - 3) A verlangt die Verbindung mit B: A wählt.
 - 4) Z gibt Erfolg an A: Ruf- oder Besetztzeichen. Das letztere erfolgt auch, wenn alle Sprechkanäle in einem Abschnitt der Fernverbindung belegt sind.
 - 5) Z ruft B: Glockensignal.
 - 6) B antwortet: B hebt den Hörer ab.
 - 7) Z stellt den Spiechzustand der Verbindung her und beginnt mit der Taxierung.
 - 8) A und B beendigen das Gespräch: A und B legen den Hörer auf.
 - 9) Z unterbricht die Verbindung: A und B können neue Anrufe tätigen.

Legt nur einer auf, so wird bei der heutigen Vermittlungstechnik die Verbindung unterbrochen, damit der benutzte Sprechkanal für andere Gespräche frei wird. Dies ist wichtig bei der internationalen Selbstwahl. Die Auslösung der obigen Tätigkeiten bedingen Änderungen von bestimmten Kriterien durch elektrische Signale.

So ist zum Beispiel der Ruhezustand einer Teilnehmerstation (Hörer aufgelegt) dadurch charakterisiert, dass die elektrische Spannung an der Teilnehmerleitung hoch ($> 45 \text{ V}$), der Strom klein ist ($< 2 \text{ MA}$), bei abgehobenem Hörer die Spannung klein ($< 25 \text{ V}$) und der Strom gross ist ($> 20 \text{ MA}$). Die den Kriterien entsprechenden Si-

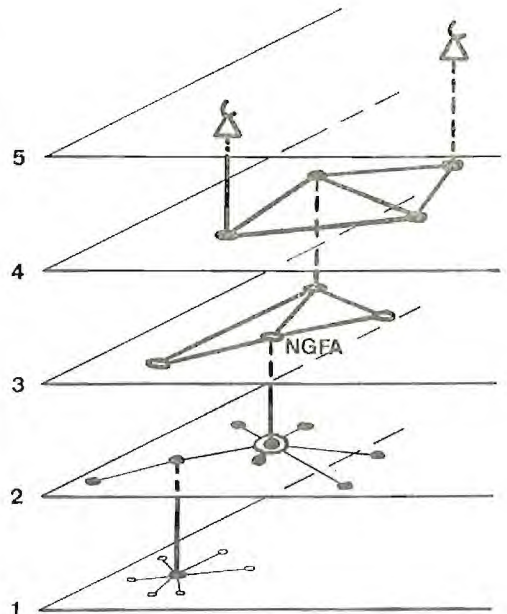
gnale laufen von A nach Z und umgekehrt, sowie von Z nach B und zurück. Über die Fernleitungen innerhalb Z müssen deshalb auch diese Signale übertragen werden.

Die erste automatische Zentrale wurde bereits um 1889 von A. G. STROWGER in den USA entworfen und zum Patent angemeldet. 1892 erfolgte die Betriebsaufnahme einer solchen Zentrale. In der Schweiz begann die Automatisierung um 1912 mit einer Privattelephonanlage in Basel. Im staatlichen Telephonnetz wurde mit der Automatisierung um 1917 in Zürich-Hottingen begonnen, doch erst 1922 erfolgte am gleichen Ort eine vollautomatische Vermittlung. 1940 waren über 58% der Abonnenten an eine automatische Zentrale angeschlossen, aber nur 10% der Ortszentralen waren automatisiert. Um 1951 lauteten die entsprechenden Zahlen: 97% aller Teilnehmer und 96% aller Ortszentralen waren für Selbstwahl ausgerüstet. Bald darauf war die ganze Schweiz vollautomatisiert.

Mit dem Ersatz von Telephonistinnen mussten zunächst die Ortszentralen unter sich mit derart vielen Leitungen verbunden werden, dass auch in der Hauptverkehrsstunde 10–11 Uhr keine Wartezeiten für anrufende Teilnehmer entstanden. Das Konzept des Netzaufbaues mit Automaten ist anders als mit handbedienten Zentralen. Bei diesen versuchte man, möglichst jede mit jeder Zentrale mit mindestens einer Leitung zu verbinden, um eine Zwischenvermittlung mit menschlicher Hilfe zu umgehen. Wartezeiten für den anrufenden Teilnehmer waren nicht zu vermeiden. Doch wurde er von der Telephonistin in der Ausgangszentrale avisiert, wenn die Verbindung zustande gekommen war.

Beim automatischen Netz gibt es diese Möglichkeit nur noch dort, wo die Vollautomatisierung aus Mangel an zur Verfügung stehenden Leitungen noch nicht eingeführt werden kann, z. B. im internationalen Verkehr.

Abb. 15. Weltweites Telephonnetz. Ebene 1: Ortsnetz. Es enthält sämtliche Teilnehmeranschlüsse und die Ortszentrale oder in grössern Städten mehrere Ortszentralen. Ebene 2: Netzgruppe. Sie umfasst alle Verbindungen mit den ihr zugeteilten Ortsnetzen. In der Regel stehen nur 2-Draht-Leitungen pupinisiert ohne Verstärker im Gebrauch. Jede Netzgruppe besitzt ein Netzgruppenfernamt NGFA, das mit allen übrigen NGFA Verbindung aufnehmen kann. In der Schweiz sind sie gekennzeichnet durch dreistellige Vorwahlziffer (Ausnahme Zürich mit 01). Die Übertragungswege sind 4-Draht-Systeme mit Multiplexsystemen. Einige NGFA haben direkten Zugang zu internationalen Fernämtern in der Ebene 4. Diese Ebene umfasst zum Beispiel ganz Europa oder die USA. In der interkontinentalen Ebene 5 laufen die Übertragungskanäle in Ozeankabel, via Kurzwellen-Radio-Kanäle und über synchrone Satelliten mittels Mikrowellen.



Wie in Abb. 15 gezeigt wird, besteht das weltweite Telephonnetz aus verschiedenen Netzebenen. Die unterste Ebene 1, das Ortsnetz, enthält die Ortszentrale (in grösseren Städten sind es mehrere), an die jeder Teilnehmer mit einer doppeldräftigen Leitung angeschlossen ist, über die er spricht und hört, die Wahlimpulse für eine Verbindung aussendet, das Ruf- oder Besetztzeichen nach erfolgter Wahl empfängt und das Wechselstromsignal für die Glockenbetätigung bei einem Anruf bekommt.

Die nächsthöhere Ebene 2 stellt die Netzgruppe dar, in der die Verbindung zwischen den Ortszentralen erfolgt und eine Region umfasst, in welcher wirtschaftliche, politische und persönliche Beziehungen bestehen. Im allgemeinen sind die Distanzen von der Netzgruppenzentrale nach den entferntesten Ortsnetzen der Netzgruppe so klein, dass die Dämpfung der elektrischen Signale durch die Leitungen für jede Verbindung innerhalb der Netzgruppe in vorgeschriebenen Grenzen bleibt. Jede Netzgruppe verfügt über ein Fernamt (NGFA). In der Schweiz sind auch diese vollautomatisiert.

In der Hierarchie der Netze folgt nun das Fernnetz, das wieder einige Ebenen (3, 4 und 5) umfasst, z. B. als unterste in der Schweiz das nationale Fernnetz, das die Verbindungsaufgaben zwischen den Netzgruppenfernmätern (NGFA) zu übernehmen hat. Ausserdem sind an dieses Netz einige Fernämter (IFA) für den Verkehr mit dem Ausland, ausgehend und einkommend, angeschlossen.

Die höhere Ebene, bestehend aus dem Verbindungsnetz aller internationalen Fernämter (z. B. in Europa), ihrerseits besitzt einige ausgezeichnete Zentren, die Zugang zu den interkontinentalen Leitungen, seien es transozeanische Kabel oder Satelliten, haben.

Ohne hier auf Einzelheiten einzugehen, sei doch einiges über die technischen und ökonomischen Bedingungen erwähnt. Der individuelle Anschluss an die Ortszentrale und ihre Zahl führen dazu, dass die Kosten für den Bau der Ortsnetze insgesamt etwa zwei Drittel der Kosten für alle Ebenen zusammen betragen, davon die Hälfte je für Leitungen (Kabel) und für die Ortszentralen plus Apparate. Je höher die Ebene, um so höher steigt der Kostenanteil der Übertragungseinrichtungen gegenüber den dazugehörigen Vermittlungszentralen.

An das Fernnetz werden technisch sehr hohe Anforderungen gestellt. So darf praktisch unabhängig von der Distanz zwischen zwei beliebigen Fernämtern auf der Erde die Energie des Sprachsignals nur wenig geschwächt werden. Das ist nur möglich, wenn die Verbindung über zwei voneinander unabhängige Kanäle erfolgt, wovon der eine für die Sprechrichtung vom Fernamt A zum Fernamt B dient, der andere für die Gegenrichtung B zu A.

In der Netzgruppe dagegen bedient man sich im allgemeinen nur einer Leitung für beide Richtungen. Dies bedingt, dass das elektrische Sprachsignal, das übertragen wird, im gleichen Frequenzband liegt wie die Sprache selbst. Die Leitung kann immer nur von einem Gespräch benutzt werden. Die Mehrfachausnutzung einer Leitung blieb dem Fernnetz mit einigen Ausnahmen vorbehalten. Sie benötigt die getrennte Übertragung der zwei Richtungen.

Der Übergang von Einfachleitung zur Doppelleitung wird durch eine Brückenschaltung B (siehe Abb. 4) bewerkstelligt, die dafür sorgen muss, dass möglichst wenig Signal von der einen Richtung des Vierdrahtsystems auf die andere fließen kann. Das Prinzip einer solchen Brückenschaltung ist in Abb. 16 dargestellt. Das ankommende

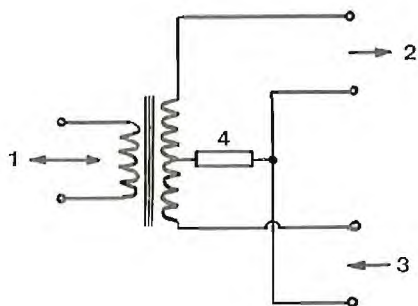


Abb. 16. Brückenschaltung zur Verbindung von 2-Draht- mit 4-Draht-Systemen. Die beiden Richtungen 2 und 3 des 4-Draht-Systems müssen entkoppelt sein, d. h. es darf kein Signal von 3 nach 1 fließen. Dies bedingt, dass die Impedanz 4 über ein breiteres Frequenzband als das zu übertragende Sprachband der Impedanz des 2-Draht-Systems angeschlossen an 1 angepasst werden muss. Jeder Sprechkanal muss an jeder Übergangsstelle von 2-Draht/4-Draht und umgekehrt eine solche Brückenschaltung durchlaufen.

Signal im Sprachfrequenzband bei den Klemmen 3 darf nur nach der Zweidrahtseite 1 gelangen, nicht aber nach der ausgehenden Vierdrahtseite 2. Dies bedingt bestimmte Anforderungen an die Impedanz 4 im Vergleich zu der in 1.

Auch in der Teilnehmerstation findet ein solcher Übergang statt für das Mikrophon (Sprechen) und den Hörer (Hören). Das erstrebenswerte Ziel wäre die direkte Verbindung vom Mikrophon zum Hörer des Partners für jede Sprechrichtung separat. Vorderhand ist damit nicht zu rechnen, wenn auch Systeme dafür diskutiert werden.

12. Integrierte Systeme

Bis heute sind praktisch nur automatische Zentralen gebaut worden, welche die Sprechverbindungen über galvanisch gut leitende, steuerbare Kontakte herstellen. Die Organe waren Relais und Wähler in allen möglichen Konstruktionen. Gesteuert wurden sie durch Relaischaltungen, die speziell für die Aufgaben, die sie zu erfüllen hatten, entwickelt wurden. Seitdem die Halbleitertechnik Dioden, Transistoren, integrierte Bausteine wie Flip-Flop, Zähler, Speicher u. a. m. mit hoher Zuverlässigkeit und niedrigem Preis hervorgebracht hat (hauptsächlich für elektronische Rechner), werden diese für Steueraufgaben in den automatischen Zentralen in steigendem Umfang verwendet. Zum Beispiel in den USA seit 1960 das ESS 1 (Electronic Switching System No. 1) der ATT (American Telephone and Telegraph Company), das immer noch elektromechanische Kontakte verwendet zur Herstellung des Sprechweges zwischen zwei Teilnehmern. Es wurden auch grosse Anstrengungen unternommen, die galvanischen Kontakte durch gesteuerte Dioden oder Transistoren zu ersetzen. Bisher blieb ein Erfolg für grosse Zentralen versagt.

Eine neue Lösung bot sich erst an mit der Kombination: Pulsmodulation der Sprache, Übertragung im Zeitmultiplexverfahren und als Vermittler (Zentrale) ein spezielles elektronisches Datenverarbeitungssystem.

Bei den bisherigen Zentralen blieb die aufgebaute Verbindung in Form einer realen Leitung für die Dauer des Gesprächs bestehen. Dies ist beim integrierten System nicht mehr der Fall. Eine einzelne Sprechverbindung ist nur während einer Zeitspanne von $4 \mu\text{s}$, aber 8000mal in der Sekunde vorhanden mit je 8 Bits. In den Zwischenzeiten

müssen 29 weitere Sprechverbindungen funktionieren können. Aus der Forderung, dass aus einer Menge von z. B. 10000 Teilnehmern pro Zentrale jeder mit jedem eine Verbindung aufbauen kann, lässt sich ableiten, dass eine gewisse Raumaufteilung erforderlich wird, denn das Zeitvielfach kann nicht stark erhöht werden. Eine Raumaufteilung findet schon deswegen statt, weil ein Zeitmultiplexsystem für 30 Kanäle einer viel grösseren Anzahl von Teilnehmern zugeordnet wird, z. B. für 250 Teilnehmer mit mittlerer Gesprächshäufigkeit. Um Leitungen zu sparen, wird die Konzentration auf das PCM-Zeitvielfach von 30 nahe beim geographischen Schwerpunkt dieser 250 Teilnehmer gelegt. Soll die Zentrale 10000 Teilnehmern dienen, so erscheinen je 40 ein- und ausgehende PCM-Zeitvielfachsysteme (ZV), die alle synchrone Zeitschlitzaufteilungen aufweisen. Die Aufgabe der Zentrale ist es, die Information des Teilnehmers A im ZV_ν , die sich in einem Zeitschlitz x befindet, durch kurzzeitige Speicherungen und Wege in den Zeitschlitz y des ZV_μ , in dem die Information des Teilnehmers B liegt, von A zu B und umgekehrt für die Dauer eines Gesprächs zu befördern.

Bereits in den sechziger Jahren begann die schweizerische PTT-Verwaltung mit Studien zur Realisierung eines solchen integrierten PCM-Systems. 1970 wurde die Entwicklung auf eine breitere Basis gestellt, indem die Firmen Hasler AG, Siemens-Albis AG und Standard Telephon und Radio AG zur Bildung einer Arbeitsgemeinschaft unter der Projektleitung der Abteilung Forschung und Entwicklung der PTT veranlasst wurden. Als Ziel wurde die Gesamtheit aller für die Herstellung, Übertragung und Überwachung einer Fernmeldeverbindung notwendigen Organe für ein integriertes Netz ins Auge gefasst. Heute liegt ein Prototyp des IFS-1 vor (IFS = Integriertes Fernmelde-System), an dem alle wesentlichen Funktionen praxisnah überprüft werden können. Dieses System ist so ausgelegt, dass es nicht nur der Telephonie dient, sondern allen Anwendungen, die mit binären Pulsen arbeiten. Dazu gehören z. B. Datenübermittlung bis 64 kBits pro s, Faksimileübertragung, aber auch Bildübertragung mit langsam sich änderndem Inhalt. Solange die Bitrate 64 kBits nicht übersteigt, ist es möglich, das Datennetz im Telephonnetz des IFS zu integrieren.

Die Pulscodemodulation ermöglicht aber auch, simultan mit dem Telefongespräch noch eine langsame Datenverbindung, z. B. ein Telex (Fernschreibverbindung), über denselben Kanal zu führen. Untersuchungen haben ergeben, dass man von den 8000 Abtastwerten pro Sekunde für die Sprachübertragung einen Teil abspalten kann für den Datenkanal, z. B. 10 Werte pro s, was 80 Bits pro s entspricht. Für den normalen Fernschreiber genügen 50 Bits pro s. Beim Empfänger muss dieser Datenkanal vom Sprachkanal getrennt werden. Im Sprachkanal fehlen die Werte der vom Datenkanal benutzten Zeitschlitze. Man ersetzt sie durch Wiederholung der Werte des vorangegangenen Zeitschlitzes. Die dadurch entstehende Verzerrung des Sprachsignals für den Hörer ist unbedeutend, indem nur das Codierungsgeräusch etwas ansteigt. Eine solche Erweiterung würde bedingen, dass die Abtastung und Umwandlung in das PCM-Signal bereits beim Teilnehmer erfolgt, sowohl beim Sender als auch beim Empfänger. Die Eingliederung in das 30-Zeitvielfachsystem muss dann mittelst eines elektronischen Konzentrators für die Gruppe der Teilnehmer auf der PCM-Seite erfolgen. Die Realisierung ist technisch möglich, doch spielen ökonomische Fragen eine wichtige Rolle.

Eine neue Möglichkeit der Übertragung von Pulsen tauchte erst vor kurzer Zeit auf und steht heute an der Schwelle der praktischen Anwendung. Der Informationsträger ist elektromagnetische Strahlung in Form von Pulsen, deren Fortleitung durch Glasfasern besonderer Bauart erfolgt. Bekannt ist die Anwendung von Licht mit Glasfaserbündeln in der Medizin für Magenuntersuchungen. Für die Sprachübertragung genügen zwei Fasern, je eine für jede Richtung. Ein elektrisch gesteuerter Halbleiterslaser erzeugt die Lichtpulse, eine Photodiode dient der Umwandlung der ankommenden Lichtpulse in elektrische Strompulse.

13. Schlusswort

Die gestellte Aufgabe, über moderne Kommunikationsmethoden zu berichten, ist sehr schwer ohne eine gewisse historische Entwicklung darzustellen. Die jetzige Technik mit Frequenzvielfachübertragung und Automatenzentralen mit elektromagnetisch betätigten Durchschaltkontakten wird noch geraume Zeit das Feld beherrschen. Das integrierte Fernmeldesystem wird um so rascher kommen, je besser die Eingliederung in das heutige System gelingt.

Der Verfasser hatte das Glück, die gesamte technische und organisatorische Entwicklung des Fernmeldewesens an zentraler Stelle mitzuerleben und an einigen Problemen selbst mitzuarbeiten. Rückblickend auf die Jahre 1930 bis 1973 möchte ich allen, die mitgeholfen haben, das Fernmeldewesen auf den heutigen Stand zu bringen, danken für ihre Mitarbeit. Es sind zu viele, als dass ich Namen nennen könnte. Besonders danken möchte ich meinen Schülern, Assistenten und Doktoranden, von denen ich viel gelernt habe, aber auch meinen Kollegen in der PTT und an der ETH für ihre Unterstützung.

Literaturangaben

- Allgemein Die Systemtheorie der elektrischen Nachrichtenübertragung. K. KÜPFMÜLLER. S. Hirzel Verlag, Zürich 1949, 1. Aufl.
Nachrichtentechnik. K. STEINBUCH und W. RUPPRECHT. Springer-Verlag, 1. Aufl. 1967.
Übertragungssysteme und ihre Anwendung in den Fernmeldenetzen, Stand 1975. R. TRACHSEL und J. F. BÜTIKOFER. Herausgeber: GD PTT, Bern.
- Zu Kapitel 4 Historique de la bobine Pupin et son emploi en Suisse. F. CHALET, R. GOLDSCHMIDT und A. SAILLEN. Technische Mitteilungen PTT, Bd. 53, S. 181 (1975).
- Zu Kapitel 6 Télégraphe imprimeur de M. E. BAUDOT. Société générale d'exploitation d'appareilles télégraphiques. Paris 1885.
H. A. REEVES, U.S. Pat. 2272070, 3. Februar 1942; franz. Pat. 852183, 23. Oktober 1939 (Int. Standard Electric Corp.).

- Zu Kapitel 9 Digitale Telephonie. A. KÜNDIG. H-103, blaue TR-Reihe. Hallwag-Verlag, Bern und Stuttgart 1972.
Ein PCM-30-Kanal-Grundsystem für den Einsatz in Übertragungs- und Vermittlungsnetzen. J. FLÜHR. Technische Mitteilungen PTT, Bd. 53, S. 2 (1975).
- Zu Kapitel 11 Rechnergesteuerte Vermittlungssysteme. P. R. GERKE. Springer-Verlag, 1972.
- Zu Kapitel 12 Das integrierte PCM-Fernmeldesystem IFS-1. K. E. WUHRMANN. Technische Mitteilungen PTT, Bd. 51, S. 554 (1973).

Adresse des Autors: Prof. HEINRICH WEBER, Burgstr. 110, CH-8706 Meilen.

