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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe

Band: 32 (1954)

Heft: 9

Artikel: Übertragungslehre

Autor: Weber, H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-874490

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.12.2025

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

Übertragungslehre

Von *H. Weber*, Zürich 621.392

Allgemeines

Jede Art der Übertragung lässt sich durch das allgemeine Schema, wie es in der Figur 1 gezeigt ist, darstellen. Die Nachrichtenquelle kann alles Mögliche bedeuten. Die bekannteste und naheliegendste ist ein Schallerzeuger, also etwa der Mund eines Sprechers, ein Musikinstrument oder ein Geräuscherzeuger. In der Telephonie und im Rundspruch hat man es ausschliesslich mit solchen Nachrichtenquellen zu tun. Eine weitere Nachrichtenquelle kann ein zu beförderndes Telegramm sein. Diese Art ist die älteste, die der Mensch kennt (Feuersignale, Trommeln in Afrika usf.). Das Telegramm muss ja nicht gerade in schriftlicher Form vorliegen, wie wir das heute gewohnt sind. In neuerer Zeit kamen weitere Nachrichtenquellen dazu, das stehende Bild, das Dokument und schliesslich das bewegte Bild, wie es im heutigen Fernsehen übertragen wird. Allgemein betrachtet, kann als Nachrichtenquelle alles aufgefasst werden, was dem Menschen eine von seinen Sinnesorganen zu empfangende Information abgeben kann. In diesem Sinne kann die heute ungeheuer vielfältige Messtechnik in die Übertragungslehre einbezogen und unter einheitlichen Gesichtspunkten betrachtet werden. Ist man sich bewusst, dass letzten Endes als Nachrichtenempfänger ein oder mehrere Sinnesorgane des Menschen beansprucht werden, so ergibt sich folgerichtig die Erkenntnis, dass sich aus den Eigenschaften der betreffenden Sinnesorgane die an ein Übertragungssystem zu stellenden Bedingungen abgeleitet sein müssen. Aus diesem Grunde ist die Physiologie des Ohres und des Auges ein fundamentales Anliegen der Übertragungstechnik.

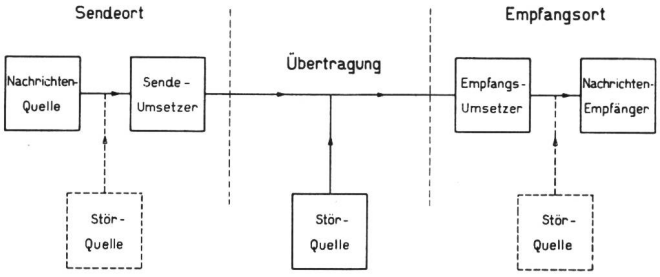

Fig. 1. Allgemeines Schema einer Nachrichtenübertragung

Die Übermittlung einer Nachricht ist stets mit einem Energietransport verbunden. Es kommen verschiedene Formen der Energie in Frage: 1. Schall = mechanische Energie; 2. elektrische Energie in Form eines Elektronenstromes durch Leitungen; 3. elektromagnetische Wellen (Radio); 4. Wärmestrahlung; 5. Licht. Zur Fernübertragung dienen heute ausschliesslich die Energieformen 2 und 3. Entsprechend der zu übertragenden Energieform hat der Sendeumsetzer die Aufgabe, die Energieform der Nachrichtenquelle in jene umzusetzen. Ebenso muss der Empfangsumsetzer die übertragenen Energieimpulse in die für das bestimmte Sinnesorgan geeignete Energieform umsetzen, was meist mit einer Verstärkung verbunden ist.

Die Gesamtübertragung von der Nachrichtenquelle zum Empfänger wird durch äussere, zum Teil nicht eliminierbare Störungen beeinträchtigt. Im allgemeinen können die Störquellen am Sende- und Empfangsort unschädlich gemacht und deshalb in der weitern Betrachtung vernachlässigt werden. Der Einfluss der Störquellen im Übertragungsmittel muss durch zweckentsprechende Wahl des Übertragungssystems vermindert werden. Hier liegt auch für die Zukunft ein grosses Feld für die weitere technische Entwicklung offen. Im Idealfall soll das vom Nachrichtenempfänger erhaltene Signal ein getreues Abbild des von der Nachrichtenquelle ausgesandten Signals sein oder wenigstens so empfunden werden. So ist es dem Empfänger eines Telegrammes gleichgültig, in welcher Form es ihm dargeboten wird, wenn nur der Inhalt wörtlich mit dem aufgegebenen Text übereinstimmt. Auch in der Messtechnik muss dem Empfänger das Signal in anderer Form dargeboten werden, da unsere Sinnesorgane nicht imstande sind, die Nachricht direkt von der Quelle aufzunehmen. Beim Rundspruch und beim Telephon soll Schall wieder als Schall erscheinen.

Verzerrung eines Signals

Jede Umsetzung einer Energieform in eine andere ist mit Unzulänglichkeiten verbunden. Je mehr Umsetzungen vorhanden sind, um so eher weicht das empfangene Signal vom Original ab, es ist verzerrt. Die Art der Verzerrung wirkt sich auf den Empfänger sehr verschieden aus, und ihre Zulässigkeit hängt vom Sinnesorgan ab, für welches die Nachricht bestimmt ist. Es ist daher notwendig, sich zunächst über die möglichen Verzerrungen eine Vorstellung zu verschaffen. Gegeben sei ein zeitlicher Verlauf $f_1(t)$ des Signals der Nachrichtenquelle (Fig. 2a). $f_1(t)$ kann eine dem stationären Luftdruck überlagerte Druckschwankung (Schalldruck) oder eine Lichtintensitätsschwankung um einen Mittelwert oder sonst etwas zeitlich Veränderliches bedeuten. Der Einfachheit halber sei ein rein periodischer Vorgang gewählt. Dieser kann in eine Anzahl (hier 2) rein sinusförmige Vorgänge zerlegt werden, die zueinander harmonisch liegen (Fig. 2b und 2c).

$$f_1(t) = a_1 \cdot \sin 2\pi \frac{t}{T} + a_3 \sin 6\pi \frac{t}{T}$$

oder, wenn $\frac{2\pi}{T} = \omega_0 =$ die Kreisfrequenz der Grundschwingung gesetzt wird:

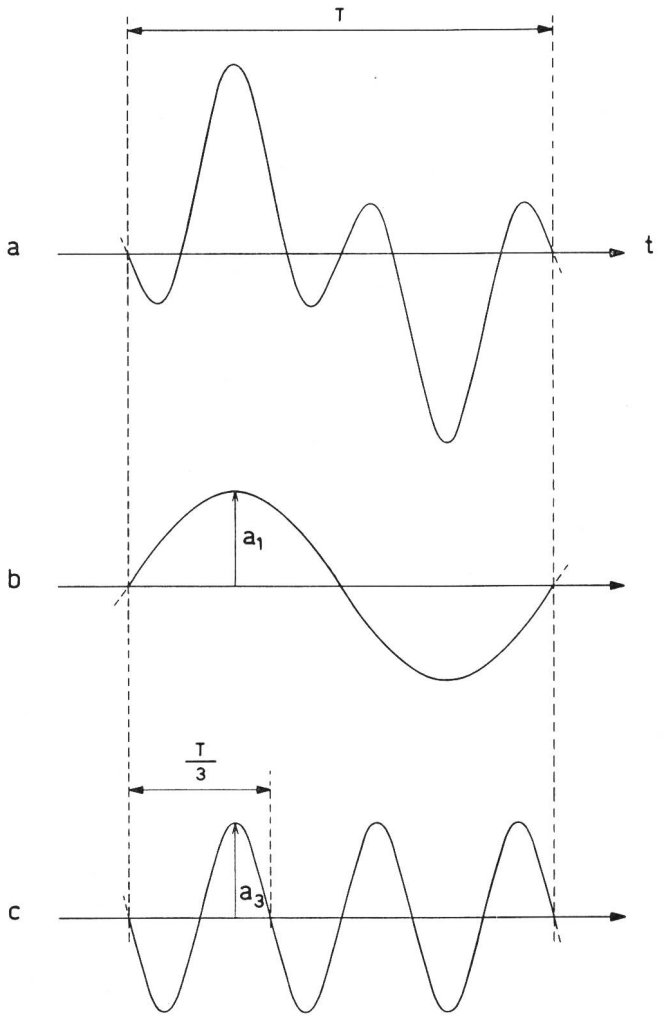

Fig. 2. Zeitlich periodischer Vorgang vor dem Sendeumsetzer
a) Vollständiges Signal = b) + c) = $a \cdot (\sin \omega t - \sin 3\omega t)$
b) Grundwelle oder 1. Harmonische = $a \cdot \sin \omega t$
c) Oberwelle, hier 3. Harmonische = $-a \cdot \sin 3\omega t$

$$f_1(t) = a_1 \sin \omega_0 t - a_3 \sin 3\omega_0 t$$

Allgemein für einen Klang aus n reinen Tönen,

$$f_1(t) = \sum_1^n a_\nu \sin(\omega_\nu t + \alpha_\nu)$$

In der Figur 2a ist $f_1(t) = a \cdot \sin \omega_0 t - a \cdot \sin 3\omega_0 t$ gewählt.

Lineare Verzerrung: Verzerrt das Übertragungssystem nur linear, so erhält man im Empfänger ein Signal, das aus den gleichen Frequenzkomponenten zusammengesetzt ist, dessen zeitlicher Verlauf vom Original aber stark abweichen kann (Fig. 3).

$$f_2(t) = b_1 \sin \omega_0 (t - \tau_1) - b_3 \sin \omega_0 (t - \tau_3)$$

Allgemein für den Klang

$$f_2(t) = \sum_1^n b_\nu \sin\left[\omega_\nu (t - \tau_\nu) + \alpha_\nu\right]$$

$$= \sum_1^n b_\nu \sin(\omega_\nu t - \varphi_\nu + \alpha_\nu)$$

$\varphi_\nu = \omega_\nu \tau_\nu$ Phasenmass

Das Amplitudenverhältnis $\frac{a_\nu}{b_\nu}$ und die Phasenlaufzeit τ_ν sind im allgemeinen von der Frequenz ω_ν abhängig. Ein getreues Abbild des Originalsignals ist nur dann vorhanden, wenn $\frac{a_\nu}{b_\nu} = 1$ und τ_ν = konstant für alle Frequenzen gemacht werden kann. Ein solches Übertragungssystem nennt man verzerrungsfrei.

Die lineare Verzerrung erscheint in zwei Formen, einmal in der Amplitudenverzerrung $\frac{a}{b}$ und dann in der Phasenverzerrung φ in Funktion der Frequenz. $\ln \frac{a}{b}$ wird Dämpfung genannt. ln bedeutet den natürlichen Logarithmus. Ist $\frac{a}{b} = 2{,}72 = e$ (e = Ba-

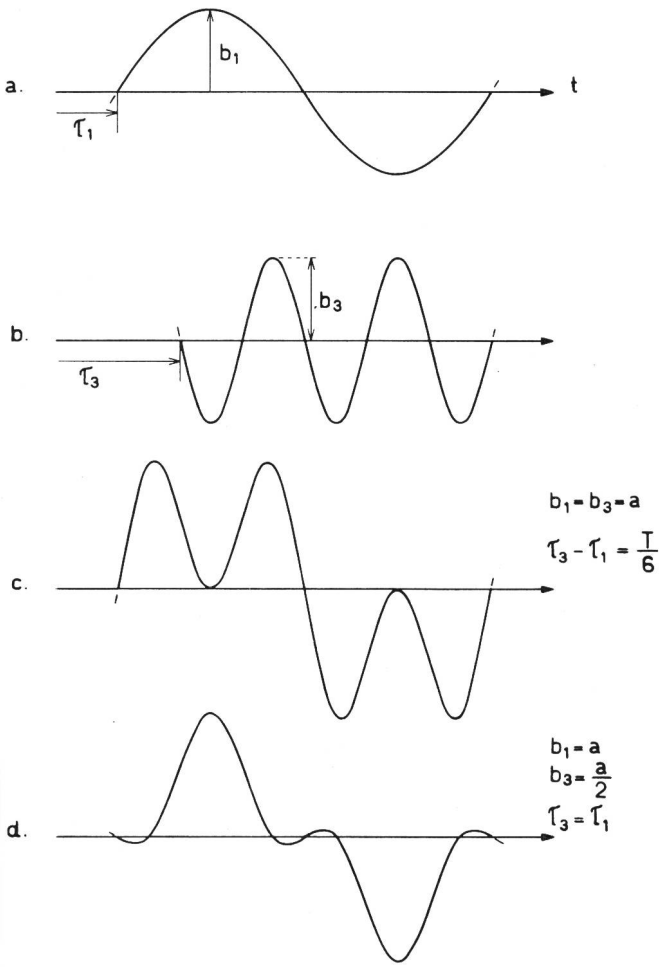

Fig. 3. Einfluss der linearen Verzerrung nach dem Empfangsumsetzer
a) Grundwelle mit veränderter Amplitude und mit zeitlicher Verzögerung τ_1 gegenüber Fig. 2b
b) Oberwelle mit veränderter Amplitude und mit zeitlicher Verzögerung τ_3 gegenüber Fig. 2c
c) Vollständiges Signal beim Empfänger für $b_1 = a$; $b_3 = a; \tau_3 - \tau_1 = \frac{T}{6}$
d) Vollständiges Signal beim Empfänger für $b_1 = a$; $b_3 = \frac{a}{2}; \tau_3 - \tau_1 = 0$.

sis der natürlichen Logarithmen), so beträgt die Dämpfung gerade 1 Neper. In einem dekadischen System ausgedrückt, wird die Dämpfung auch durch $20 \log \frac{a}{b}$ in db (Dezibel) angegeben. Damit keine Amplitudenverzerrungen vorhanden sind, soll die Dämpfung für alle vorkommenden Frequenzen konstant sein (Fig. 3c). Sind Phasenverzerrungen unerwünscht, so muss die Phasenlaufzeit konstant sein, oder, was dasselbe bedeutet, es muss das Phasenmass φ proportional zur Frequenz ω sein (Fig. 3d).

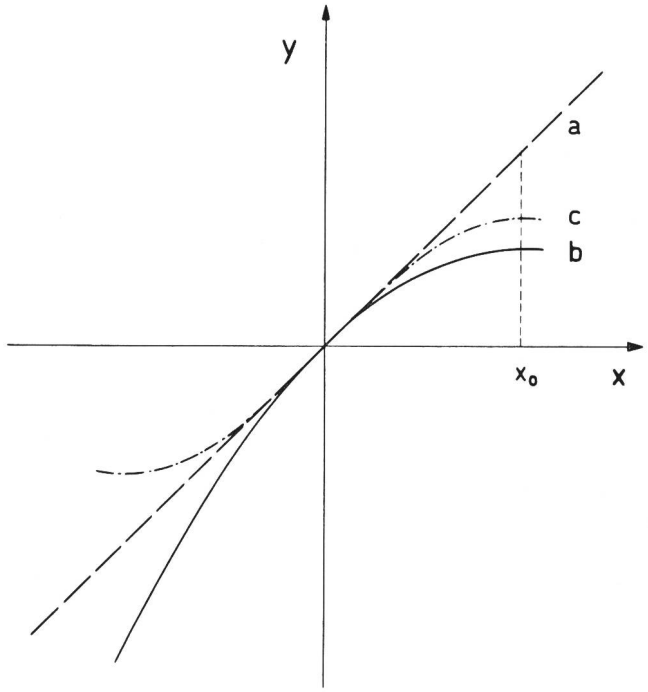

Fig. 4. Arbeitskennlinien eines Umsetzers
x Momentanwert der Eingangsgrösse
y Momentanwert der Ausgangsgrösse
a) Lineare Kennlinie $y = x$
b) Quadratische Kennlinie $y = x - \frac{x^2}{2x_0}$
c) Kubische Kennlinie $y = x - \frac{x^3}{3x^2_0}$

Nichtlineare Verzerrung: Weist das Übertragungssystem nichtlineare Verzerrungen auf, so enthält das Empfangssignal neue Komponenten des Frequenzspektrums, welche im Original fehlen. Diese Erscheinung tritt immer dann auf, wenn in einem oder in mehreren Gliedern des Übertragungssystems eine gekrümmte Kennlinie vorhanden ist.

$$\left.\begin{array}{ll} \text{Figur 4a)} & y = k \cdot x \quad \text{lineare} \\ \text{Figur 4b)} & y = \frac{kx}{2x_0}(2x_0 - x) \quad \text{quadratische} \\ \text{Figur 4c)} & y = \frac{kx}{3x_0^2}(3x_0^2 - x^2) \quad \text{kubische} \end{array}\right\} \text{Kennlinie}$$

Ist zum Beispiel die Eingangsgrösse $x = a \cdot \sin \omega_0 t$ (a soll immer kleiner als x_0 sein), so ist die Ausgangsgrösse y.

Im Fall 4a) $y = k \cdot a \cdot \sin \omega_0 t$

$$\text{4b)}\ y = k \cdot a \sin \omega_0 t - \frac{ka^2}{2x_0} \sin^2 \omega_0 t$$

$$= -\frac{k}{4x_0} a^2 + k \cdot a \sin \omega_0 t + \frac{ka^2}{4x_0} \cos 2\,\omega_0 t$$

$$\text{4c)}\ y = k \cdot a \sin \omega_0 t - \frac{ka^3}{3x_0^2} \sin^3 \omega_0 t$$

$$= \frac{ka}{x_0^2}\left(x_0^2 - \frac{a^2}{4}\right) \sin \omega_0 t + \frac{ka^3}{12x_0^2} \sin 3\,\omega_0 t$$

Im Falle 4b weist die neu entstandene Komponente die doppelte, im Falle 4c die dreifache Frequenz des Eingangssignals auf. Die tatsächlich auftretenden Kennlinien sind meist nicht so einfach analytisch darstellbar. Sie können angenähert werden, zum Beispiel durch eine Potenzreihe

$$y = k_1 x + k_2 x^2 + k_3 x^3 + \ldots k_n x^n$$

Die Koeffizienten k sind Konstanten.

Setzt man nun für die Eingangsgrösse x eine reine Sinusschwingung, $x = a \cdot \sin w_0 t$, ein und formt um, so erhält man eine von vielen Harmonischen zusammengesetzte Schwingung:

$$y = b_0 + b_1 \sin \omega_0 t + b_2 \cos 2\,\omega_0 t + b_3 \sin 3\,\omega_0 t + \ldots b_n \cdot \begin{matrix}\cos\\ \sin\end{matrix}\, n\,\omega_0 t$$

cos, wenn n gerade; sin, wenn n ungerade

Ein wichtiges Mass für die nichtlinearen Verzerrungen ist der Klirrfaktor d, der das Verhältnis des Effektivwertes der entstehenden Oberschwingungen zum Effektivwert des Gesamtgemisches angibt, wobei das konstante Glied b_0 nicht berücksichtigt wird.

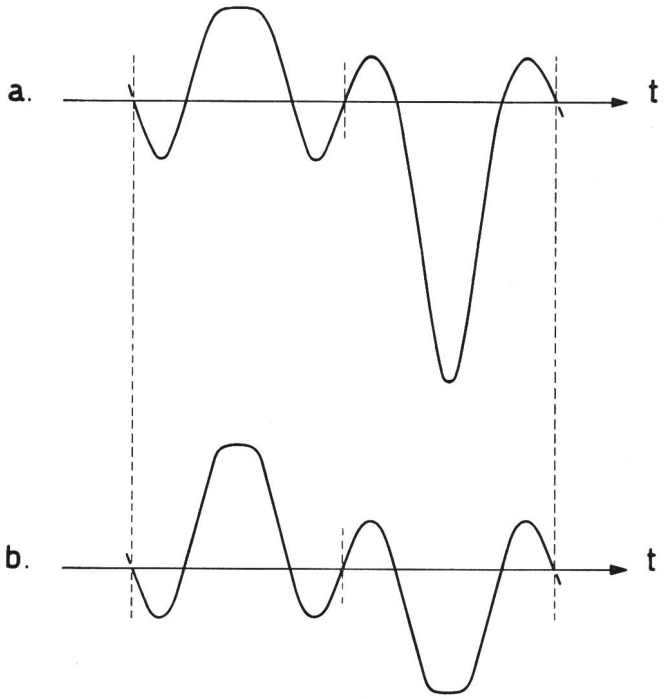

Fig. 5. a) Ausgangssignal, wenn das Signal Fig. 2a durch die Kennlinie Fig. 4b verzerrt wird
b) idem mit Kennlinie Fig. 4c

$$d = 100 \cdot \sqrt{\frac{b_2^2 + b_3^2 + \dots b_n^2}{b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 + \dots b_n^2}} \text{ in } \%$$

Die Auswirkung einer stark nichtlinearen Kennlinie im Übertragungssystem bei einem Eingangssignal nach Figur 2a ist in Figur 5 gezeigt. Es ist dabei $a_1 + a_3 = x_0$ gewählt. Wäre das Eingangssignal eine reine Sinusschwingung mit der Amplitude $a_1 = x_0$, so betrüge der Klirrfaktor für die Kennlinie *b* der Figur 4 24,3 %, für die Kennlinie *c* 11,1 %.

Einfluss der Verzerrung auf die Sinneswahrnehmung

Unser Ohr empfindet die nichtlineare Verzerrung als unzulässig, während die Phasenverzerrung, gemäss Figur 3c, überhaupt nicht bemerkt wird. Handelt es sich aber um Lichtintensitätsschwankungen in einer Bild- oder Fernsehübertragung, so ergäbe sich für das Auge bei den Oszillogrammen (Fig. 2a, 3d, 5a und 5b) eine durchaus annehmbare Übereinstimmung des Bildeindruckes, während das Oszillogramm in Figur 3c einen völlig falschen Eindruck hervorrufen würde. Viele experimentelle Untersuchungen haben ergeben, dass bei der Klangübertragung die Phasenverzerrung eine unwesentliche, dagegen die Amplitudenverzerrung und besonders die nichtlineare Verzerrung eine wesentliche Beeinträchtigung der Wiedergabequalität zur Folge haben. Bei der Bildübertragung liegen die Verhältnisse umgekehrt, die nichtlineare Verzerrung fällt nicht ins Gewicht, dagegen die Amplitudenverzerrung und besonders die Phasenverzerrung. Grosse nichtlineare Verzerrungen treten bei der gewöhnlichen photographischen Wiedergabe eines Gegenstandes auf. Trotzdem erhält der Betrachter des Bildes einen befriedigenden Eindruck vom Original.

Umformungsmöglichkeiten des zu übertragenden Signals

Haben wir uns bisher über die wünschbaren Eigenschaften des gesamten Übertragungssystems Rechenschaft gegeben, so müssen wir uns nun mit der Umsetzung der Signale am Sende- und Empfangsort befassen. Im Übertragungsmittel (Fig. 1) kommen nur elektrische Signale in Frage. Diese müssen in bestimmter Weise dem Signal der Nachrichtenquelle entsprechen. Die einfachste Art der Entsprechung ist dann vorhanden, wenn die elektrische Spannung oder der elektrische Strom in der Übertragungsleitung dem Schalldruck beim Rundspruch oder der Lichtintensität bei der Bildübertragung proportional ist. Diese Übertragungsart ist ausserordentlich verbreitet und findet in der Telephonie und im niederfrequenten Drahtrundspruch Anwendung. Sie ist aber auf die Doppelleitung in Kabeln oder auf Freileitungen angewiesen, da die tiefste zu übertragende

Tabelle I (Stetige Modulationsarten)

Originalsignal Bezeichnung	$f_1(t) = \sum_\nu a_\nu \sin(\omega_\nu t + \alpha_\nu)$ (siehe Figur 2a) Übertragenes elektrisches Signal $g(t)$	
Einseitenbandmodulation: (Frequenzverschiebung)	$k \sum_\nu a_\nu \sin[(\Omega_0 + \omega_\nu)t + \alpha_\nu]$	Figur 6a
Zweiseitenbandmodulation:	$k \cdot [1 + h \cdot f_1(t)] \sin \Omega_0 t$ $f_1(t)$ eingesetzt und umgeformt $k \Big\{ \underbrace{\sin \Omega_0 t}_{\text{Träger}} + \frac{h}{2} \sum a \; \underbrace{[\cos((\Omega_0 - \omega_\nu)t - \alpha_\nu)}_{\text{unteres}} - \underbrace{\cos((\Omega_0 + \omega_\nu)t + \alpha_\nu)]}_{\text{oberes}} \Big\}$ Seitenband	6b
Phasenmodulation: Frequenzmodulation:	$A \cdot \sin[\Omega_0 t + k \cdot f_1(t)]$ $\quad \Omega = \Omega_0 + k \frac{df_1(t)}{dt}$ $A \cdot \sin[\Omega_0 t + h \int_0^t f_1(t)\, dt]$ $\quad \Omega = \Omega_0 + h f_1(t)\, dt$ Ω: momentane Frequenz	6c

h und *k* sind im allgemeinen frequenzunabhängige Konstanten.

Die Abb. 6c gibt nur einen qualitativen Begriff. Ein Unterschied in der zeichnerischen Darstellung zwischen Phasen- und Frequenzmodulation wäre kaum erkennbar.

Frequenz für die wirksame Ausstrahlung als Hertzsche Welle viel zu niedrig ist. Für die radioelektrische Übertragung kommen Frequenzen von über 20 000 Hz bis etwa 6000 MHz in Frage. Die Benutzung dieser hohen Frequenzen erfordert weitere Arten der Entsprechung. Die voranstehende *Tabelle I* zeigt einige prinzipielle Möglichkeiten und ihre Bezeichnungsart der Umsetzung.

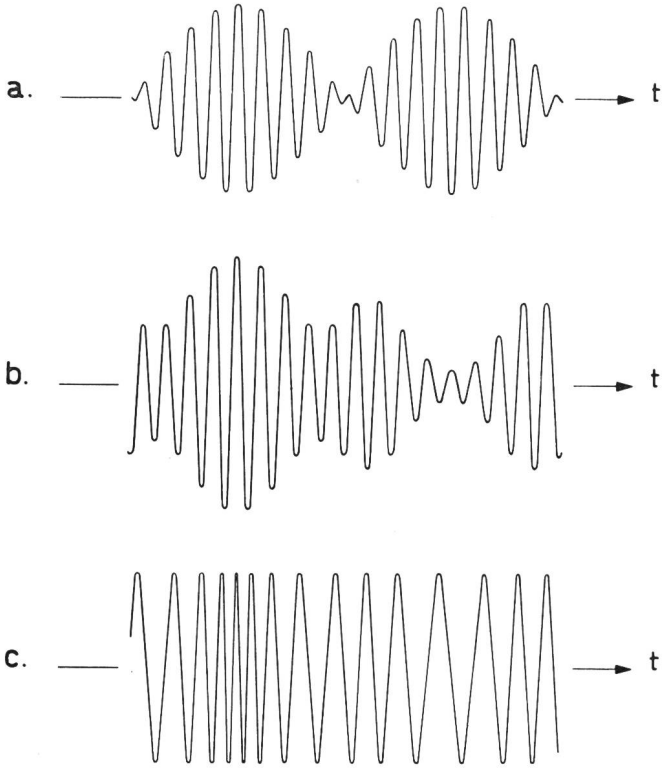

Fig. 6. a) Einseitenbandmodulation mit Signal Fig. 2a
b) Amplitudenmodulation mit Signal Fig. 2a
c) Frequenz- (Phasen-) Modulation mit Signal Fig. 2a

Einzig bei der Einseitenbandmodulation entsprechen sich die Amplituden und Frequenzen des Originalsignals mit denen des übertragenen Signals. Man spricht deshalb besser an Stelle von Einseitenbandmodulation von Frequenzverschiebung, wobei dem in der Tabelle enthaltenen Fall $\Omega = \Omega_0 + \omega$ die Verschiebung $\Omega = \Omega_0 - \omega$ gleichwertig ist. Jede dieser Verschiebungen entspricht einem Seitenband der Amplitudenmodulation und kann aus dieser durch Unterdrückung des Trägers und eines Seitenbandes mittels Filter gewonnen werden.

Bei der Amplitudenmodulation steckt der gesamte Inhalt des Originalsignals nur in der Amplitude des Trägerfrequenzsignals, die Phase bleibt konstant. Bei der Phasen- und Frequenzmodulation dagegen verhält es sich umgekehrt, die Amplitude ist konstant und der gesamte Inhalt des Originalsignals steckt nur in der Phase des Trägerfrequenzsignals.

Das Übertragungsmittel, Drahtleitung oder freier Raum, erlaubt sehr breite Frequenzbänder zu übertragen. Die Beschränkung des übertragenen Bandes liegt meist an den Umsetzern. Ausserdem hätte es keinen Sinn, ein breiteres Frequenzband zu übertragen, als für den Nachrichtenempfänger notwendig ist.

z. B. Telephonie	300...	3 400 Hz
Rundspruch	30...	12 000 Hz

Da man zu gleicher Zeit viele Nachrichtenquellen mit Nachrichtenempfängern verbinden will, ist man gezwungen, bereits auf der Senderseite das Frequenzband zu begrenzen, denn ein Signal einer nicht erwünschten Quelle bedeutet für den Empfänger soviel wie ein Störsignal. Aus diesem Grunde wird beim normalen Radioempfang auf das breite Band verzichtet. Ein Frequenzband von 100...5000 Hz wird als genügend erachtet.

Impulsmodulationsarten

Die bisher erwähnten Umsetzungen stellen ein mehr oder weniger getreues, aber stetiges Abbild des Originalsignals dar. In neuerer Zeit werden in steigendem Masse auch unstetige Abbildungen verwendet, nämlich die sogenannten Impulsmodulationsverfahren. Voraussetzung für die Anwendung ist die Beschränkung des Frequenzbandes vor dem Sendeumsetzer auf die gewünschte Breite. Man kann zeigen, dass eine zeitlich variable Funktion im Zeitabschnitt T, deren Frequenzspektrum nur Frequenzen unterhalb f_0 enthält, eindeutig durch $2f_0T$-Angaben dargestellt werden kann. So zum Beispiel durch die Angabe der Momentanwerte der Funktion in zeitlichen Abständen $\tau = \frac{1}{2f_0}$ (Fig. 7a). Ähnlich wie bei einem periodischen Vorgang denkt man sich das Signal in einzelne Komponenten zerlegt.

$$F(t) = \nu \sum a_\nu \frac{\sin 2\pi f_0(t - \nu \cdot \tau)}{2\pi f_0(t - \nu \cdot \tau)}$$

Das einzelne Glied der angeschriebenen Summe (Fig. 7b) hat ein kontinuierliches Frequenzspektrum konstanten Betrages unterhalb der Grenzfrequenz f_0 (Fig. 7c). Es kann nun an Stelle des Einzelsignals (Fig. 7b) jedes Signal gewählt werden, das unterhalb der Frequenz f_0 ein übereinstimmendes Frequenzspektrum aufweist; so z. B. zeigt ein kurz dauernder Impuls (Fig. 8a) diese Eigenschaft (8b). Eine genügende Übereinstimmung ergibt sich für $f_0 < \frac{1}{6\,\Delta t}$. Das Frequenzspektrum $H(t)$ ist dann praktisch bis f_0 konstant. Die Impulsdauer darf höchstens einen Drittel des Impulsabstandes betragen. Die im Zeitabstand τ auftretenden Amplituden der Signalfunktion in Figur 7a können nun durch verschiedene Eigenschaften der sich folgenden Impulse dargestellt werden.

Tabelle II (Impulsmodulationsarten)

1. Impulsamplitudenmodulation, Figur 9b
   Impulshöhe $i = i_0\ (1 + k \cdot a_\nu)$ $\quad k \cdot a_\nu < 1$
   Impulsdauer Δt = konstant
2. Impulsbreitemodulation, Figur 9c
   Impulshöhe $i = i_0$ konstant
   Impulsdauer $\Delta t = \Delta t_0\ (1 + h \cdot a_\nu)$ $\quad h \cdot a_\nu < 1$

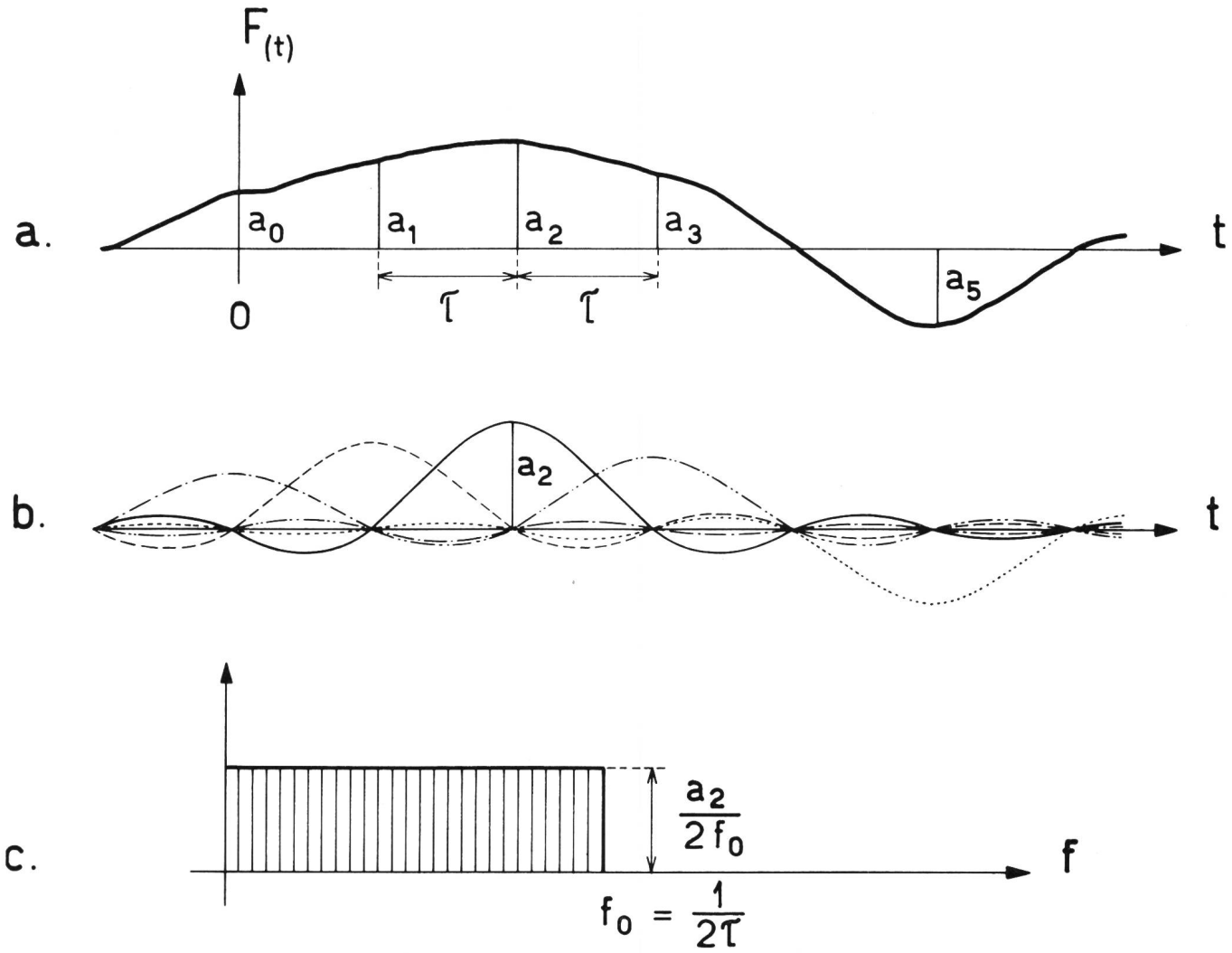

Fig. 7. a) Nachrichtensignal, dargestellt durch die Amplituden a_1; a_2 ... im zeitlichen Abstand τ

b) Gedachte Komponente $a_2 \frac{\sin 2\pi f_0 (t - 2\tau)}{2\pi f_0 (t - 2\tau)}$

c) Frequenzspektrum der Signalkomponente von b); $f_0 = \frac{1}{2\tau}$

3. Impulslagemodulation, Figur 9d
   Impulshöhe $i = i_0$ konstant
   Impulsdauer $\Delta t = \Delta t_0$ konstant
   Zeitliche Abweichung des Impulses gegen eine absolut periodische Normallage $\delta t = l \cdot a_\nu$
   k, h und l sind Konstanten.

Als modernste Umsetzungsart ist ausserdem die Impulscodemodulation erwähnenswert, bei der die Amplitudenwerte nicht mehr stetig, sondern nur noch als eine bestimmte Zahl diskreter Werte übermittelt werden. Jeder Wert wird durch eine zugeordnete Impulsfolge dargestellt (Fig. 10). Nur die ausgezogenen Impulse werden vom Sendeumsetzer abgegeben, zum Beispiel

Impuls-No.	abgegeben	nicht abgegeben
1	Originalamplitude positiv	negativ
2	Gewicht 1	0
3	Gewicht 2	0
4	Gewicht 4	0
Codegruppe I	Originalamplitude	negativ 4
Codegruppe II	Originalamplitude	positiv 2
Codegruppe III	Originalamplitude	positiv 5

Während die Impulsamplituden- und -breitemodulation beim Empfangsumsetzer nach der Gleichrichtung der Hochfrequenzimpulse nur durch Passieren eines Tiefpassfilters mit der Grenzfrequenz f_0 wieder die auf das Frequenzband f_0 beschränkte Originalfunktion ergeben, bedarf es bei den übrigen Impulsmodulationsarten komplizierterer Einrichtungen.

Die Impulsmodulation erscheint auf den ersten Blick gekünstelt, als Abwendung vom natürlich Gegebenen. Bei näherer Betrachtung der in der Natur vorkommenden Übertragungsmethoden erkennt man aber gerade, dass sich die Natur nur der Einzelimpulse bedient, dieser allerdings in so grosser Zahl, dass uns das Sprunghafte, Unstetige nicht zum Bewusstsein kommt. Ein schönes Beispiel für eine von der Natur geschaffene Übertragung ist die Nervenleitung. Eine einzelne Nervenfaser kann nur Ja oder Nein übermitteln, das heisst ein Reiz wird in voller

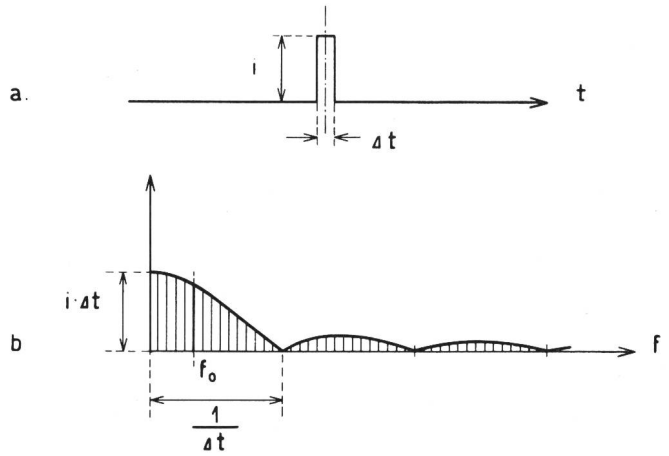

Fig. 8. a) Kurzer Signalimpuls
b) Dazugehöriges Frequenzspektrum

Stärke oder gar nicht weitergegeben. Ausserdem kann pro Sekunde nur eine bestimmte maximale Zahl Reize (etwa 100) übertragen werden.

Zusammenhang zwischen Zeichendauer und Frequenzband

Aus der Tatsache, dass sich eine zeitlich stetige Funktion mit beschränktem Frequenzspektrum durch die Amplitudenwerte im zeitlichen Abstand τ vollständig angeben lässt, kann ein sehr wichtiges Grundgesetz der Übertragungstechnik abgeleitet werden. Betrachten wir den einfachsten Fall, zum Beispiel die Telegraphiezeichen. Hier kommen nur die zwei Amplitudenwerte Null oder Eins in Frage. Das Originalsignal besteht aus Rechteckzeichen (Fig. 11a). Es wird durch ein Tiefpassfilter mit der Grenzfrequenz f_0 umgeformt und erhält dadurch, schematisch gezeichnet, die Form der Figur 11b. Durch ein Relais mit dem Umschlagstrom i_1 lässt sich an seinem Kontakt das Originalsignal wieder herstellen, sofern die Schrittdauer τ eines Impulses gleich oder grösser ist als $\frac{1}{2f_0}$. Mit andern Worten: Mit einem begrenzten Frequenzband f_0 können höchstens $2f_0$-Impulse pro Sekunde unverzerrt übertragen werden.

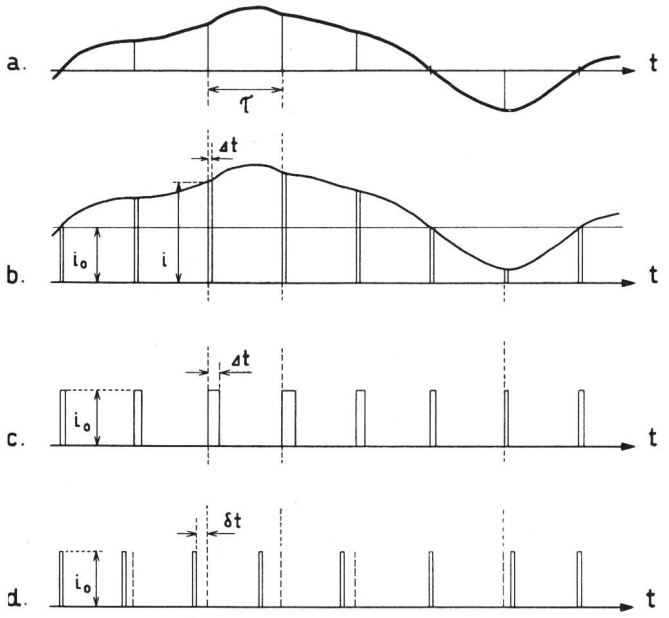

Fig. 9. a) Zu übertragendes Nachrichtensignal
b) Impulse, amplitudenmoduliert
c) Impulse, breitemoduliert
d) Impulse, lagemoduliert

1. Grundgesetz; Zeit-Frequenz-Gesetz: $\boxed{f_0 \cdot \tau \geqq \frac{1}{2}}$

Die Anzahl Zeichen pro Sekunde kann bei beschränktem Frequenzband nicht beliebig erhöht werden, sonst treten Übermittlungsfehler auf. Das Auflösungsvermögen oder die Schärfe der Wiedergabe einer Bildübertragung hängt deshalb nur vom Produkt Übertragungszeit mal Frequenzband ab.

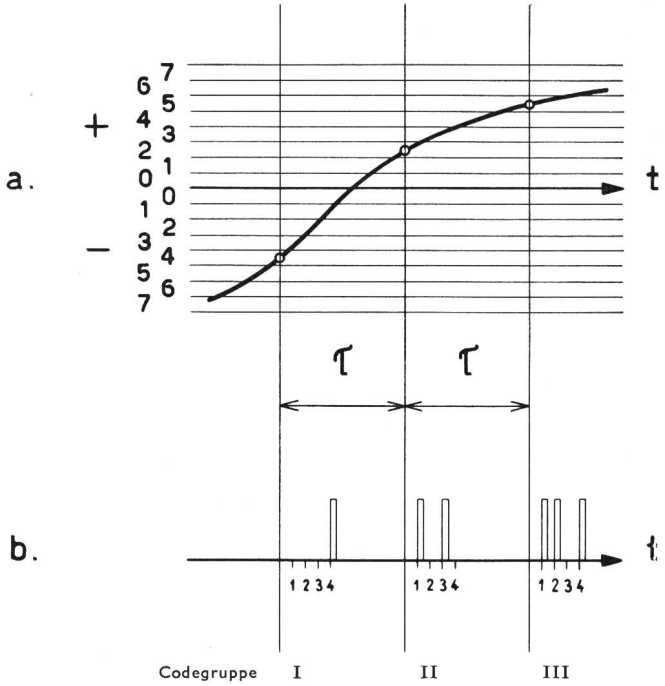

Fig. 10. Impulscodemodulation
a) Zu übertragendes Signal mit Bewertungsstufen
b) Zugehörige Code-Impulsgruppen

Fordern wir zum Beispiel für ein Bild 240 000 Bildpunkte und nehmen an, das zur Verfügung stehende Frequenzband sei 200 Hz, so benötigen wir eine minimale Übertragungszeit von

$$240\,000 \cdot \frac{1}{2 \cdot 200} = 600 \text{ s} = 10 \text{ Minuten.}$$

Wollen wir dasselbe Bild in gleicher Schärfe in 1/40 s (Fernsehen) erhalten, so wird mindestens ein Frequenzband von $\frac{40 \cdot 240000}{2} = 4{,}8$ MHz Breite benötigt.

Übertragungskapazität bei Anwesenheit von Störsignalen

Der Empfang der übertragenen Signale wird stets durch eine Überlagerung von unerwünschten Stör-

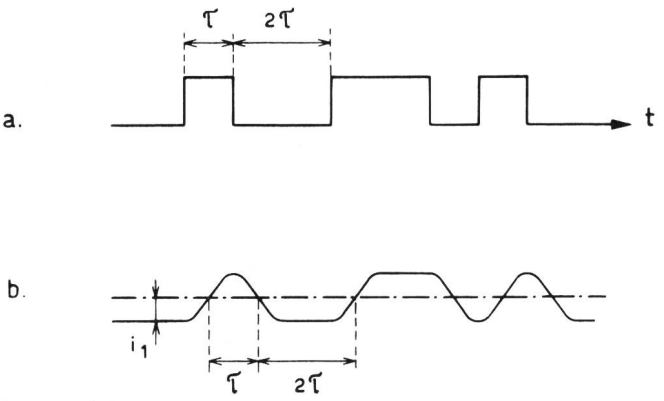

Fig. 11. a) Telegraphiesignal vor
b) nach einem Tiefpassfilter mit der höchsten Durchlassfrequenz $f_0 = \frac{1}{2\tau}$

signalen (Fig. 1) beeinträchtigt. Diese treten zufällig auf und können deshalb beim Empfangsumsetzer nicht eliminiert werden. Ohne Störsignale könnten unendlich viele Amplituden des Signals (Fig. 7a) unterschieden werden, das heisst es wäre eine unendliche Zahl von verschiedenen Signalkonfigurationen in einer gegebenen Zeit T möglich, selbst wenn eine maximale Signalamplitude nicht überschritten werden darf. Tatsächlich ist die Sendeleistung und damit auch die verfügbare Leistung für die Empfangsumsetzer begrenzt. Die Störsignale, die sich dem übertragenen Nutzsignal überlagern, verursachen eine Unsicherheit in der Bestimmung des richtigen Wertes. Es können nur noch eine endliche Zahl von Amplitudenstufen im Empfangsumsetzer voneinander unterschieden werden. Die Abstufung ist in der Grössenordnung des Störsignals. Statistisch sind $n = \sqrt{\frac{N+P}{N}}$ Stufen zu unterscheiden, wobei P die mittlere maximale Leistung des Nutzsignals und N die mittlere Störleistung über eine lange Zeit am Empfängereingang bedeutet. Weist unser Übertragungssystem eine Frequenzbandbreite f_0 auf und ist die Störleistung im Verhältnis zur maximalen Nutzleistung gleichmässig über dieses Band verteilt, so kann in einer bestimmten Zeitdauer T nur eine endliche Zahl verschiedener Nachrichten möglich sein. Nach jedem Zeitabschnitt τ sind n verschiedene Amplitudenstufen unterscheidbar, in der Zeit T deshalb nach der Kombinationslehre $n^{\frac{T}{\tau}}$ oder, da $\tau = \frac{1}{2f_0}$, n^{2f_0T} verschiedene mögliche Nachrichten. Wollte man alle diese verschiedenen möglichen Nachrichten mit einem Dualcode wie bei der Impulscodemodulation übertragen, so würde eine Zahl von $\log_{(2)} n^{2f_0T}$ Impulsen benötigt oder umgeformt $2f_0T \log_{(2)} n$. Da die Nachricht die Zeit T dauert, braucht es pro Sekunde noch eine Zahl von $2f_0 \log_{(2)} n$ Dualimpulse. Die Bedeutung von n eingesetzt, erhält man einen maximalen Grenzwert für die Zahl Dualimpulse pro Sekunde, die mit der Übertragungskapazität des betrachteten Systems äquivalent ist. Es erweist sich als vorteilhaft, die Übertragungskapazität irgendeines Systems in der dafür benötigten Zahl von Dualimpulsen pro Sekunde auszudrücken.

2. Grundgesetz: Übertragungskapazität

$$\boxed{C = f_0 \cdot \log_{(2)} \left(1 + \frac{P}{N}\right)}$$

Da beide Leistungen, P und N, statistische Mittelwerte über lange Zeiten bedeuten, kann bei der Impulsmodulation das Nutz-Störleistungsverhältnis bedeutend kleiner als 1 sein, da sich die gesamte Nutzenergie in sehr kleine Zeitintervalle zusammendrängen lässt. Mit den heutigen Übertragungssystemen muss mit einer gröbern Stufung der Amplituden gerechnet werden, da die obige Berechnungsweise zur Voraussetzung hat, dass sich die Ermittlung des wahrscheinlich richtigen Empfangssignals über eine lange Zeitdauer erstreckt und deshalb statistische Ausgleichsmethoden herangezogen werden müssen (Summe der Abweichungsquadrate ein Minimum). Soll das Signal ohne Verzug im Empfangsumsetzer an den Empfänger weitergeleitet werden, so wird die Übertragungskapazität verringert, oder es muss für die gleiche Kapazität das maximale Nutz-Störleistungsverhältnis grösser sein. Empirisch hat sich ergeben, dass dieses Verhältnis bei verschiedenen untersuchten Übertragungssystemen etwa siebenmal grösser sein muss, um die gleiche Kapazität der oben angegebenen Formel zu erhalten.

Die beiden beschriebenen Grundgesetze haben in der Übertragungstechnik eine ähnliche Bedeutung wie der 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik in der Physik (1. Erhaltung der Gesamtenergie und 2. Nutzenergieverlust bei jeder Energieumformung). Es ist nun Aufgabe der technischen Entwicklung, die Sende- und Empfangsumsetzer so zu gestalten, dass mit möglichst geringem apparativem Aufwand jegliche von der Nachrichtenquelle produzierte gewünschte Information dem Nachrichtenempfänger dargeboten wird.

Adresse des Verfassers: Prof. *H. Weber*, Vorstand des Instituts für Fernmeldetechnik der Eidg. Technischen Hochschule, Zürich.