

Modulations-Verfahren

Inhaltsverzeichnis

1	Modulations-Prinzipien	1
1.1	Trägersignale	1
1.2	Beeinflussung der Parameter der Trägersignale	1
1.3	Die Parameter der Trägersignale	2
1.3.1	Gleichspannungs-Träger	2
1.3.2	Puls-Träger	2
1.3.3	Hochfrequenz-Träger	3
1.3.4	Zwei orthogonale Hochfrequenz-Träger (mit Phasendifferenz 90^0)	4
1.3.5	Optische Übertragung	4
2	Direkte und hierarchische Modulationen	4
2.1	Einstufige Modulation	4
2.2	Quadratur-Modulation	5
2.3	Hierarchische Modulation	5

Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzip der Rundfunk-Übertragung	1
1.2	Prinzip der Morse-Telegraphie	2
1.3	Puls-Modulationsverfahren: Puls-Amplituden-Modulation (PAM), Puls-Dauer-Modulation (PDM), Puls-Phase-Modulation (PPM), T_A Abtast-Periode	3
1.4	links: Hochfrequenz-Träger-Schwingung (a), Modulations-Signal (b), rechts: Amplituden-Modulation AM (c), Phasen-Modulation PM (d), Frequenz-Modulation FM (e)	3
1.5	Ortskurve (Ausschnitt) einer I/Q Quadratur-Modulation	4
2.1	Blockschaltung eines einstufigen Modulationsvorgangs	5
2.2	Blockschaltung eines (digitalen) Quadratur-Modulators	5
2.3	Blockschaltung einer zweistufigen hierarchischen Modulation	5
2.4	Frequenz-Plan einer Vorgruppen-Modulation der analogen Telefon-Technik	6

Modulations-Verfahren

Modulations-Verfahren werden in der Technik dazu verwendet, um Informations-Signale so umzuwandeln, daß diese möglichst verlustfrei über größere Distanzen übertragen werden können.

1 Modulations-Prinzipien

Primäre Informations-Signale sind entweder akustischer (Sprache, Klänge, Geräusche) oder optischer (Bilder) Natur. Ohne technische Hilfsmittel, wie es z.B. Bild 1.1 zeigt [1], gibt es keine Möglichkeiten, solche Informations-Signale schnell und verlustfrei über größere Distanzen zu übertragen.

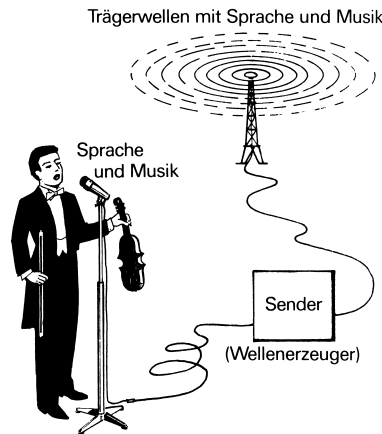


Bild 1.1: Prinzip der Rundfunk-Übertragung

Der Schwerpunkt liegt dabei sowohl auf **schnell** (in der Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit), als auch auf **distant** (Entfernung von ca. 50 m bis theoretisch ∞) und auf **verlustfrei** (analog: vernachlässigbare Störungen; digital: vernachlässigbare Fehlerraten).

1.1 Trägersignale

Im Laufe der Geschichte der Nachrichtentechnik wurden andererseits physikalische Phänomene und Prinzipien entdeckt und Techniken erfunden, die große Distanzen sehr schnell überwinden können. Dies sind in der Reihenfolge ihrer Erfindung bzw. Entdeckung

1. die **Gleichspannung** (bzw. der Gleichstrom), welche auf einer gut isolierten **Leitung** über mehrere hundert Kilometern geführt werden können.
Anwendungen: Morse-Telegraphie, Telephon
2. die **elektromagnetischen Wellen**, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.
Anwendungen: Funken-Telegraphie, Funk-Übertragung
3. die **optische Faser**, auf der **Lichtsignale** eines Lasers (ohne Zwischenverstärkung) über hunderte Kilometer übertragen werden können.
Anwendungen: Optische Übertragungstechnik

Die Gleichspannung, die elektromagnetischen Wellen (allgemein) und die Lichtwellen (speziell) werden im Rahmen der Modulations-Verfahren als **Träger** bezeichnet, denn ihnen kann die zu übertragende Information aufgebürdet (aufmoduliert) werden, damit sie diese mit Lichtgeschwindigkeit an entfernte Orte tragen können.

1.2 Beeinflussung der Parameter der Trägersignale

Modulation bedeutet nun, die Parameter der Träger-Signale in Abhängigkeit der Informations-Signale zu beeinflussen.

Folgende Gesichtspunkte sind dabei maßgeblich:

- Die Informations-Signale müssen in elektrischer Form vorliegen. Die hierfür notwendigen Verfahren werden i.a. nicht zur Modulation gerechnet.
- Die Beeinflussung der Parameter der Träger (Modulation) soll **proportional** zu der Informations-tragenden Größe des Nachrichten-Signals sein.
- Die empfangsseitige Rückgewinnung des Nachrichtensignals (Demodulation) muß möglich sein.
- Wie wirkt sich die Wahl eines zu beeinflussenden Parameters (also die Art des Modulationsverfahrens) aus auf:
 - den technischen Aufwand
 - die notwendige Sendeleistung
 - den empfangsseitigen Signal-zu-Geräusch-Abstand
 - die notwendige Bandbreite des Übertragungskanals
 - die Verzerrungen des Empfangssignals

Entsprechend zu den möglichen vielfältigen Antworten gibt es verschiedene Modulationsverfahren.

1.3 Die Parameter der Trägersignale

1.3.1 Gleichspannungs-Träger

Eine Gleichspannung kann man z.B. dadurch beeinflussen, daß diese ein- und aus-geschaltet wird. Dies stellt die älteste Form der digitalen elektrischen Nachrichtenübermittlung dar. Das bekannteste Verfahren dazu ist das Morse,¹ Bild 1.2 [2].

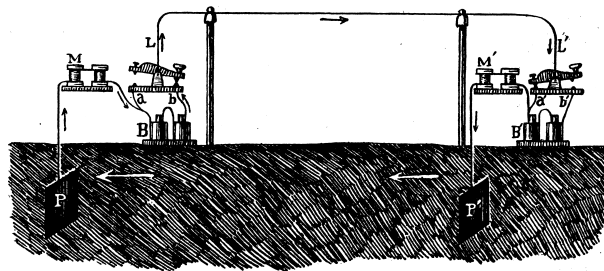


Bild 1.2: Prinzip der Morse-Telegraphie

Um diese (verhältnismäßig primitive) Art der Übermittlung anwenden zu können, ist zuerst eine **Codierung** der Buchstaben und Zahlen notwendig. Auf der Empfangsseite ist daher eine **Decodierung** erforderlich.

1.3.2 Puls-Träger

Das (mehr oder weniger) periodische Ein- und Aus-Schalten einer Spannung beim Morse stellt einen Zeitdiskreten Vorgang dar. Dies kann weiter perfektioniert werden, indem diese Schaltvorgänge so schnell hintereinander erfolgen, daß bezüglich eines Nachrichten-Signals $u_N(t)$ das **Abtast-Theorem** (Shannon) erfüllt ist. Man kommt so zu den **analogen Puls-Modulationsverfahren**, Bild 1.3.

Die Pulse können beeinflusst werden in

- ihrer Höhe (Puls-Amplituden-Modulation, PAM)
- ihrer Breite (Puls-Dauer-Modulation, PDM)
- ihrer Verschiebung gegenüber einem festen Zeitraster (Puls-Position-Modulation, PPM)
- ihrer relativen Häufigkeit (Puls-Frequenz-Modulation, PFM)

¹Samuel Finley Breese Morse, * 27.04.1791 Charlestown, Mass., † 02.04.1872 New York; ursprünglich Kunstmaler; 1840 erstes Patent auf einen Telegraphenapparat

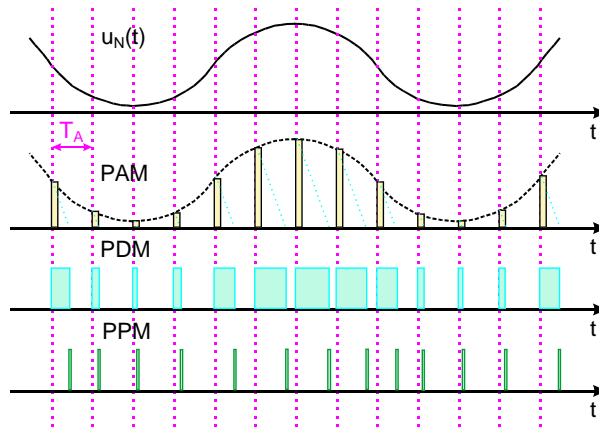


Bild 1.3: Puls-Modulationsverfahren: Puls-Amplituden-Modulation (PAM), Puls-Dauer-Modulation (PDM), Puls-Phase-Modulation (PPM), T_A Abtast-Periode

- Werden die Amplituden der äquidistanten Abtastwerte des Nachrichten-Signals **quantisiert**, erhält man die (digitale) **Puls-Code-Modulation (PCM)**.

Die andere Möglichkeit, mittels eines Mikrophons einer Gleichspannung eine Wechselspannung zu überlagern, die proportional zu einem (akustischen) Nachrichtensignal ist, wird technisch nicht als Modulation bezeichnet.

1.3.3 Hochfrequenz-Träger

Elektromagnetische Wellen werden als Cosinus (oder Sinus) förmige Schwingungen erzeugt. Ein solcher Hochfrequenz-Träger kann beschrieben werden als

$$u_C(t) = \hat{U}_C \cos(\omega_C t + \varphi) = \hat{U}_C \cos(\psi(t)) \tag{1.1}$$

Es gibt hierbei (maximal) 3 Parameter (markiert durch \downarrow) des Trägers, die durch das Nachrichten-Signal $u_N(t)$ beeinflusst werden können, Bild 1.4.

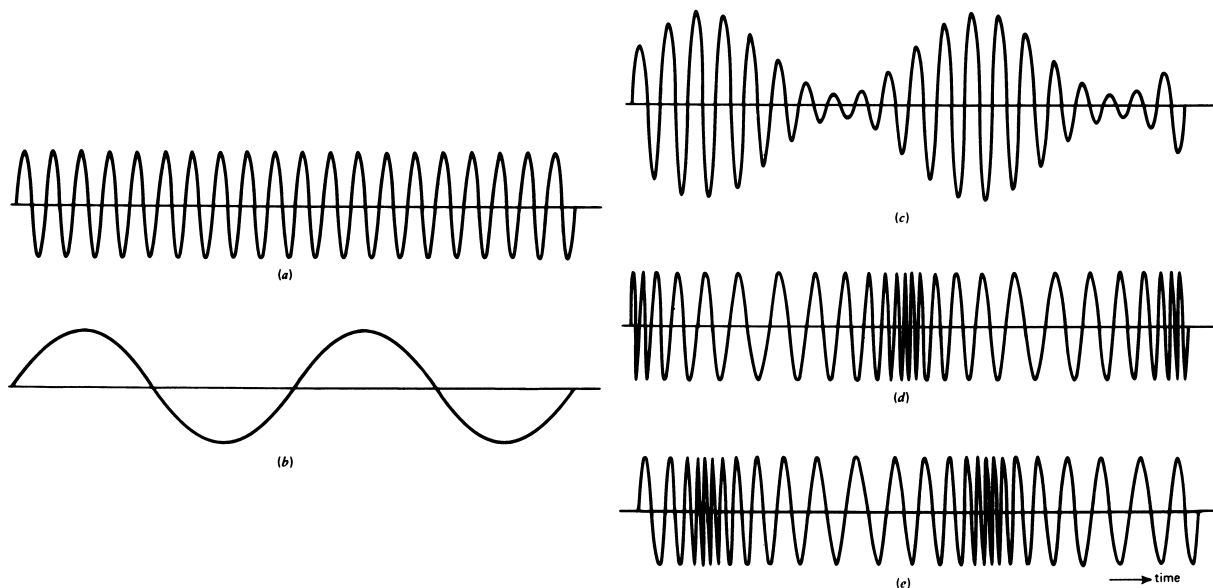


Bild 1.4: links: Hochfrequenz-Träger-Schwingung (a), Modulations-Signal (b), rechts: Amplituden-Modulation AM (c), Phasen-Modulation PM (d), Frequenz-Modulation FM (e)

- **Amplitude** $\hat{U}_C \Rightarrow \hat{U}_C(u_N(t))$ (Amplituden-Modulation, AM: **Amplitudenänderung** \sim zur Nachricht)
- **Frequenz** $\omega_C \Rightarrow \omega_C(u_N(t))$ (Frequenz-Modulation, FM: **Frequenzänderung** \sim zur Nachricht)
- **Phase** $\varphi \Rightarrow \varphi(u_N(t))$ (Phasen-Modulation, PM: **Phasenänderung** \sim zur Nachricht)

Tatsächlich jedoch sind **Frequenz und Phase** eines Cosinus-förmigen Trägers **nicht unabhängig von einander**, Bild 1.4, so daß **Frequenz- und Phasen-Modulation nicht unabhängig von einander** existieren können. Man spricht daher allgemeiner von **Winkel-Modulation**.

- **Winkel** $\psi \Rightarrow \psi(u_N(t))$ (Winkel-Modulation, WM)

Es bleiben damit **nur 2 Parameter** \hat{U}_C und ψ , die **unabhängig von einander** beeinflusst werden können.

1.3.4 Zwei orthogonale Hochfrequenz-Träger (mit Phasendifferenz 90°)

Werden **gleichzeitig** ein **Cosinus-** und ein **Sinus-Träger** verwendet, die jeweils in ihrer **Amplitude** $|I(t)|$ bzw. $|Q(t)|$ (geeignet) beeinflusst werden (d.h. je 1 Parameter), kann dadurch (neben der Amplitude $A(t)$) auch die **Phase** $\Phi(t)$ **des resultierenden Signals** beeinflusst werden. Die Ortskurve dieser (komplexen) Modulation liegt im Bereich $-I_{\max} \leq I(t) \leq I_{\max} / -Q_{\max} \leq Q(t) \leq Q_{\max}$, Bild 1.5.

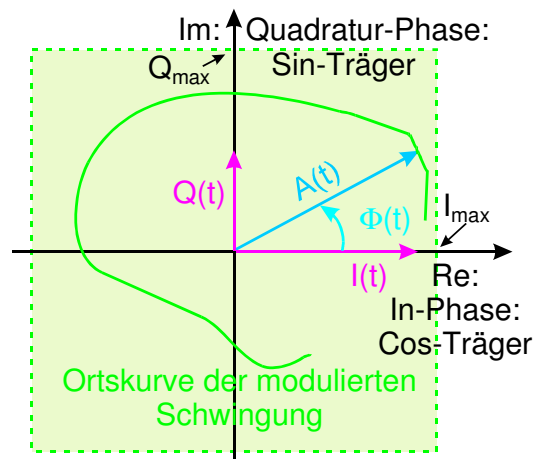


Bild 1.5: Ortskurve (Ausschnitt) einer I/Q Quadratur-Modulation

Derartige **Quadratur-Modulationen**, Bild 2.2, finden ihre Anwendung insbesondere bei den digitalen Modulationen und werden dort (irreführenderweise) als **Phase-Shift-Keying (PSK)** bezeichnet.

1.3.5 Optische Übertragung

Licht ist eine elektromagnetische Schwingung sehr hoher Frequenz. Im Prinzip gelten daher alle Beeinflussungsmöglichkeiten wie bei einem (tiefer-frequenten) Hochfrequenz-Träger. Das ist aber noch weitestgehend ein Gegenstand der Forschung.

Bislang ist es möglich, die **Amplitude des Lichtes** zu beeinflussen (ein — aus bzw. kontinuierlich). Als Modulationsverfahren ergeben sich damit alle diejenigen, die auch bei einem Gleichspannungsträger möglich sind (ein — aus).

Mit Hilfe von doppelbrechenden Prismen lassen sich aus dem (weitestgehend) monochromatischen Licht eines Lasers zwei Lichtströme mit Polarisierungen von 0° und 90° erzeugen (entsprechend zu Cosinus- und Sinus-Trägern). Werden diese in ihrer Amplitude (geeignet) beeinflusst, können damit **optische Quadratur-Modulationen** erzeugt werden, womit sich dann digitale Informationen übertragen lassen.

2 Direkte und hierarchische Modulationen

2.1 Einstufige Modulation

Bei vielen technischen Anwendungen erfolgt die Modulation in einer Stufe, wobei direkt der gewünschte Parameter des Trägersignals $u_C(t)$ moduliert wird, Bild 2.1.

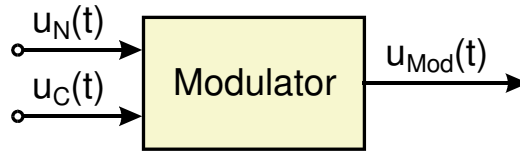


Bild 2.1: Blockschaltung eines einstufigen Modulationsvorgangs

2.2 Quadratur-Modulation

Die notwendige Signal-Aufbereitung für das Nachrichtensignal erfolgt vor der Modulation und wird bei analogen Signalen nicht zum Modulator hinzugerechnet. Bei digitalen Signalen wird i.a. ein Teil der Aufbereitung (z.B. Mapping & Interpolation) dem Modulationsvorgang zugerechnet, Bild 2.2.

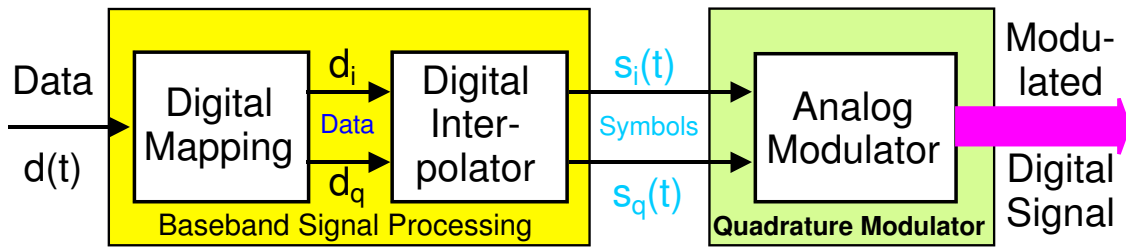


Bild 2.2: Blockschaltung eines (digitalen) Quadratur-Modulators

Das digitale modulierte Signal entsteht aus der Summe von zwei Modulationen (Sinus- & Cosinus-Träger), wobei die Amplitude der Träger beeinflusst wird.

- Die Amplitude des **Cosinus-Trägers** wird proportional zu $s_i(t)$.
- Die Amplitude des **Sinus-Träger** wird proportional zu $s_q(t)$.

Die Symbole $s_i(t)$ und $s_q(t)$ sind analoge Zeitfunktionen. Sie entstehen durch Interpolation (und Filterung) aus den Daten-Bytes d_i und d_q . Diese wiederum entstehen aus den einlaufenden Daten $d(t)$ durch eine Abbildungsvorschrift (Mapping). Das Mapping legt fest, welche Art der digitalen Modulation entsteht.

Da Cosinus und Sinus in Quadratur (d.h. orthogonal) zu einander sind, können die betreffenden Anteile des Modulations-Signals im Empfänger wieder getrennt werden.

Mathematisch wird die 90° Phasenbeziehung zwischen Cosinus und Sinus mit Hilfe von komplexen Zahlen ausgedrückt. Das quadratur-modulierte Signal wird daher auch als **komplexes moduliertes Signal** bezeichnet und formelmäßig so dargestellt.

2.3 Hierarchische Modulation

Bei hierarchischen Modulationen wird das Nachrichtensignal zuerst einer ersten Modulationsart (Modulator 1) unterzogen und danach das so modulierte Signal als Eingangssignal für eine zweite (oft unterschiedliche) Modulationsart (Modulator 2) verwendet, Bild 2.3.

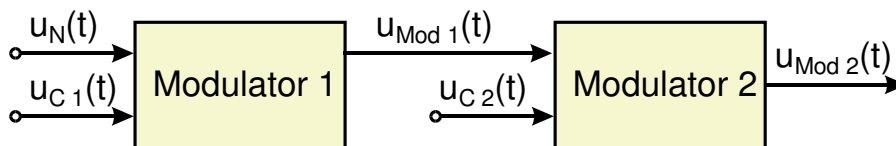


Bild 2.3: Blockschaltung einer zweistufigen hierarchischen Modulation

In der Technik wird dieses hierarchische Prinzip häufig verwendet, weil sich damit optimierte Lösungen erzielen lassen. Beispiele sind:

- Pulsmodulations-Signale (mit Gleichstrom-Träger) lassen sich nicht direkt per Funk übertragen. Vielmehr stellen diese Eingangssignale für einen zweiten Modulator mit Hochfrequenz-Träger Ω_{C_2} dar.

- Beim UKW-Rundfunk wird z.B. das Radio-Daten-Signal (RDS) in einer ersten Modulationsstufe einer (linearen) Amplitudenmodulation unterzogen und in einer zweiten Modulationsstufe (zusammen mit den Audio-Signalen) Frequenz-moduliert.

Hierarchische Modulationen sind nicht (notwendigerweise) auf zwei Hierarchiestufen beschränkt. Bei vielen Anwendungen werden mehrere Modulationen der 1. Stufe gebündelt (addiert) und dann der 2. Stufe zugeführt. Entsprechend wird in den höheren Stufen gebündelt. Der Vorteil eines solchen Verfahrens liegt darin, daß insgesamt weniger unterschiedliche Modulatoren (und Demodulatoren) notwendig sind. Bild 2.4 zeigt dazu ein Beispiel der Vorgruppen-Modulation [3], wie sie bei der analogen Telefon-Technik üblich war.

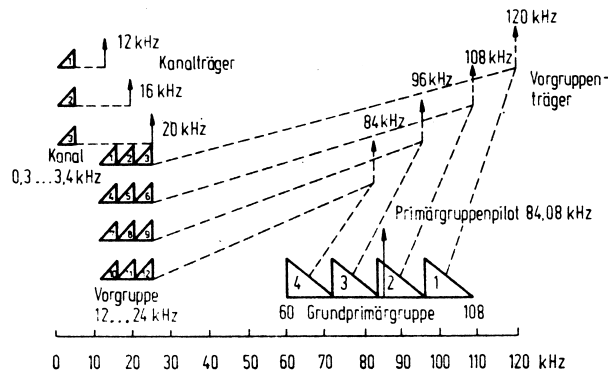


Bild 2.4: Frequenz-Plan einer Vorgruppen-Modulation der analogen Telefon-Technik

Literatur

- [1] Bahr, H.: *Philips Lehrbriefe Bd. 1, Einführung und Grundlagen*, Hüthig, 1982
- [2] Beck, W.: *Die Elektrizität und ihre Technik*, E. Wiest Verlag Leipzig, 1906
- [3] Bergmann, K.: *Lehrbuch der Fernmeldetechnik Bd. 1*, Schiele und Schoen, 1986