

*Modulationsverfahren**Inhalt*

<i>1. Allgemeines</i>	2
<i>2. Übersicht über Modulationsverfahren</i>	3
<i>5. Amplitudenmodulation</i>	3
3.1 <i>Zweiseitenbandmodulation</i>	5
3.2 <i>Einseitenbandmodulation</i>	5
<i>4. Winkelmodulation</i>	6
<i>5. Tastmodulation(Digitale Modulation)</i>	9
<i>6. Pulsmodulation</i>	10
6.1. <i>Pulsträger</i>	10
6.2. <i>Pulsamplitudenmodulation</i>	10
6.3. <i>Pulswinkelmodulation</i>	11
6.4. <i>Pulsdauermodulation (PDM)</i>	11
<i>7. Pulsmodulation</i>	12

1. Allgemeines

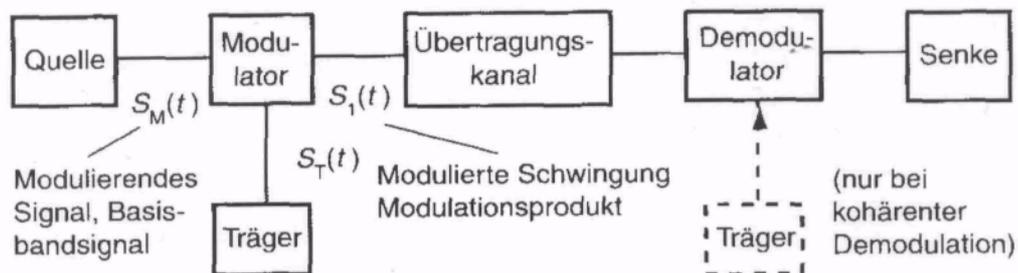
Eine wesentliche Aufgabe der Nachrichtentechnik ist die Übertragung. Ein zu übertragendes analoges Signal besitzt ein sogenanntes Basisband.

z. B.: Fernsprechschnalle besitzen ein zu übertragendes Frequenzband von 0,3 bis 3,4 kHz.

Über Leitungen kann dieses Basisband direkt übertragen werden.

Über Funk ist eine Übertragung dieses Basisbandes nicht möglich, da die Antennenlänge ca. $\lambda/10$ betragen muß. Das Basisband der Nachricht muß in diesem Fall in eine höhere Frequenzlage transformiert werden. Diesen Vorgang nennt man Modulation.

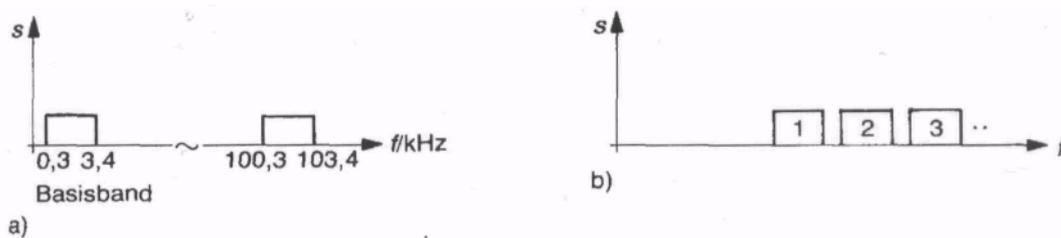
Modulation ist die Veränderung der Signalparameter eines Trägers in Abhängigkeit von einem modulierenden Signal. Dabei entsteht das Modulationsprodukt, mit einem anderen Frequenzband.



Unter linearer Modulation versteht man, daß $s_1(t)$ eine lineare Funktion von $S_M(t)$ ist. Die wesentlichen Träger sind:

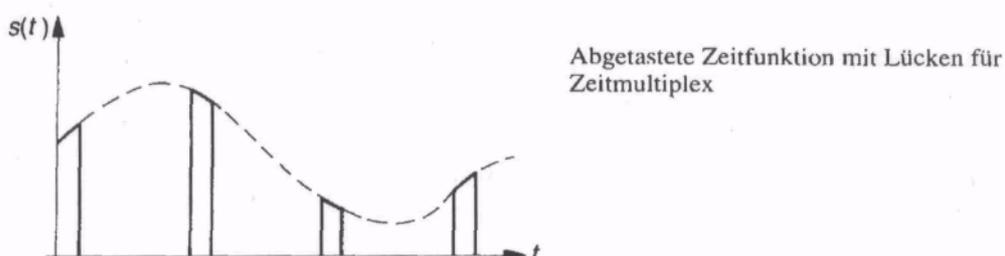
- Sinusträger: sinusförmige Schwingungen, deren Amplitude, Frequenz oder Nullphase beeinflusst werden
- Pulsträger: Pulse deren Amplitude, Frequenz, Phase oder Dauer beeinflusst werden

Durch Frequenzverschachtelung (Frequenzmultiplex) verschiedener Nachrichten kann ein Übertragungskanal mehrfach ausgenutzt werden.

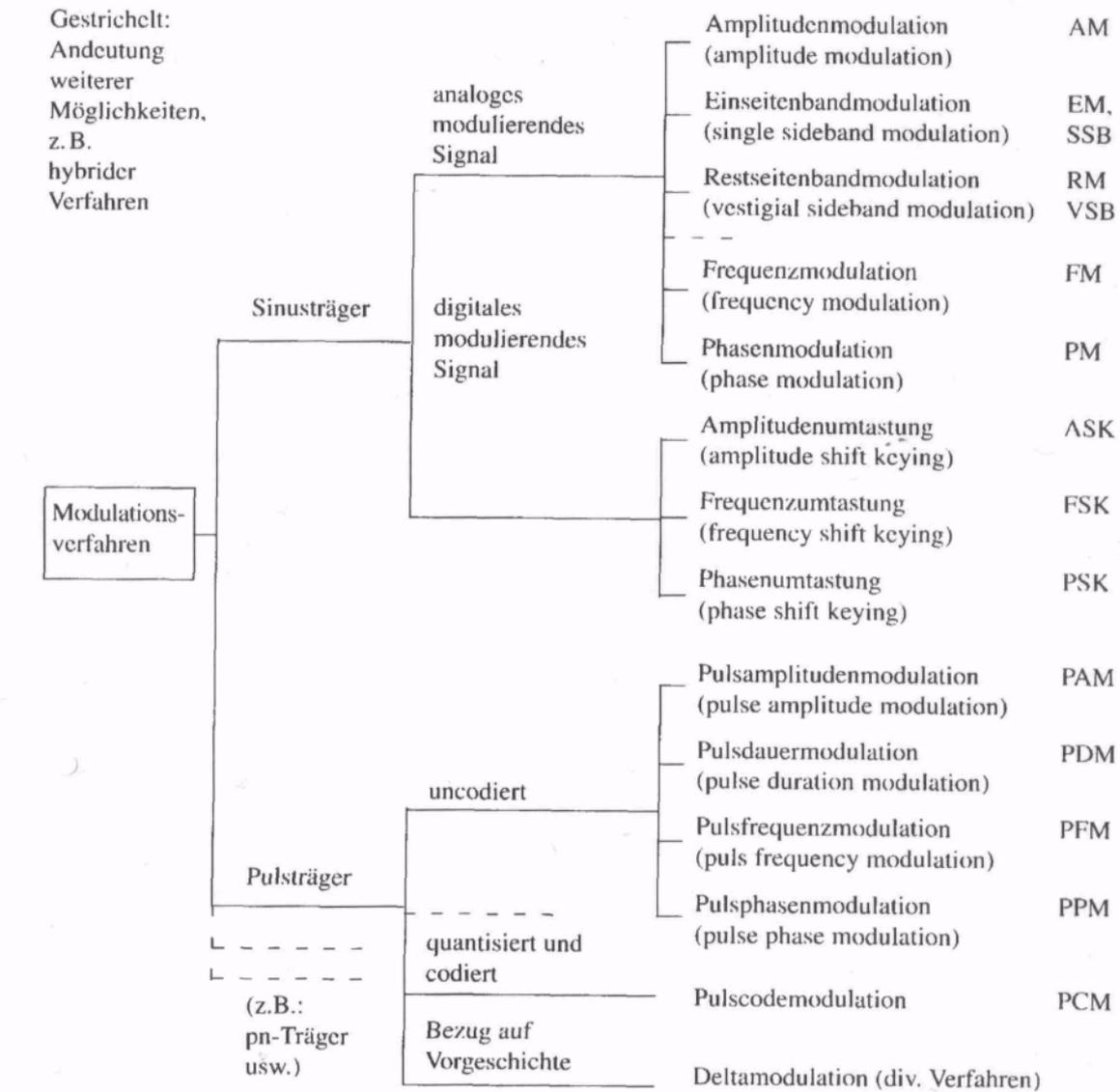


a) Modulation b) Frequenzmultiplex

Eine andere Möglichkeit Übertragungskanäle mehrfach zu nutzen, besteht in der Verschachtelung von Abtastwerten eines Signals in die Abtastlücken von anderen Signalen. (Zeitmultiplex)



2. Übersicht über Modulationsverfahren



3. Amplitudenmodulation

Bei der Amplitudenmodulation soll die Trägeramplitude linear vom modulierenden Signal abhängen.

$$u_{AM}(t) = \hat{u}_T (1 + m \cos \omega_M t) \cos \omega_T t$$

- $m = \hat{u}_M / \hat{u}_T$ Modulationsgrad
- $1 + m \cos \omega_M t$ Modulationsfaktor
- ω_M Kreisfrequenz des modulierenden Signals
- ω_T Kreisfrequenz des Trägers

$u_T(t) = \hat{u}_T \cos \omega_T t$ Träger

$u_M(t) = u_M \cos \omega_M t$ modulierendes Signal (Nutzsignal)

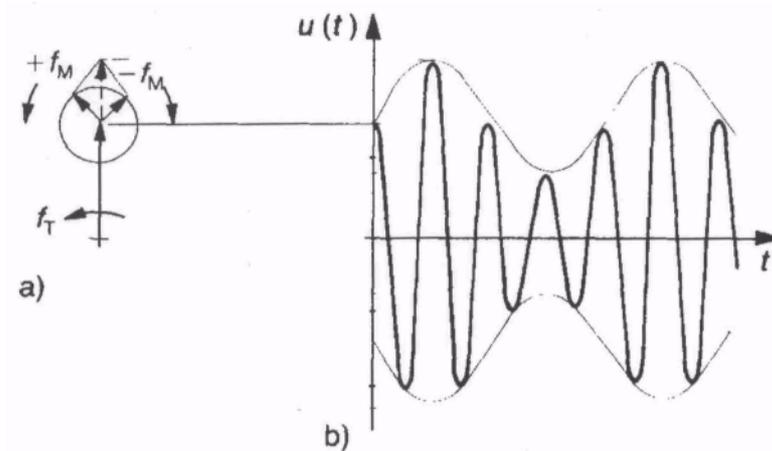


Bild 4.3
Amplitudenmodulation
a) Zeigerdarstellung
b) Zeitfunktion

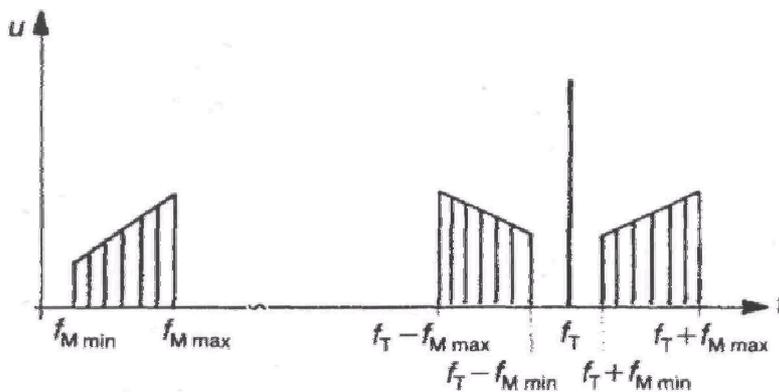


Bild 4.4
AM-Spektrum bei
Modulation mit
endlichem Basisband

Neben der ursprünglichen Trägerfrequenz f_T enthält das Signal zwei Seitenfrequenzbänder, deren Amplituden vom Modulationsgrad abhängig sind.

Der Modulationsgrad kann nicht größer 1 werden, da sonst das Signal verzerrt wird.

Die Bandbreite eines AM - Signals ist:

$$B_{AM} = 2f_{M \max}$$

Die Bandbreite ist größer als die ursprüngliche Signalbandbreite.

Die zu übertragende Signalleistung ist:

$$P_{\text{ges}} = P_T(1+m^2/2)$$

P_T Trägerleistung

Bei vollständiger Übertragung des AM-Signals entfällt nur ein geringer Teil der Leistung auf den eigentlichen Nachrichteninhalte, da die Information des modulierenden Signals schon in einem Seitenband enthalten ist.

Störungen im Frequenzband $f_T - f_{M \max}$ bis $f_T + f_{M \max}$ können vom Nutzsignal nicht unterschieden werden

3.1 Zweiseitenbandmodulation:

Bei dieser AM-Modulationsart werden beide Seitenbänder mit Träger oder ohne Träger (Zweiseitenbandmodulation mit unterdrücktem Träger) übertragen.

Die Demodulation von zweiseitenbandmodulierten Signalen mit Träger ist einfach. Die Hüllkurve des hochfrequenten Signals ist die Modulationsspannung. Durch Gleichrichtung und Unterdrückung der hochfrequenten Anteile gewinnt man die Nachricht zurück.

(Hüllkurvendemodulator) Der Nachteil dieses Verfahrens sind Verzerrungen infolge der nicht quadratischen Kennlinien der verwendeten Dioden.

Eine andere Möglichkeit der Demodulation von zweiseitenbandmodulierten Signalen mit Träger, mit geringerer Verzerrung, stellt der Synchrondemodulator dar. Dabei wird der Träger aus dem übertragenen Signal herausgesiebt, verstärkt und phasenrichtig mit dem Empfangssignal multipliziert.

Mittels eines Gegentaktmodulators, können Seitenbänder und Modulationsfrequenz ohne Trägerfrequenz erzeugt werden. (Leistungsersparnis auf der Senderseite) und mittels Doppelgegentakmodulator(Ringmodulator) kann auch die Modulationsfrequenz unterdrückt werden.

Die Demodulation zweiseitenbandmodulierter Signale mit Trägerunterdrückung, ist nicht mehr durch einfache Gleichrichtung möglich. Der Träger muß wieder frequenz- und phasentreu rückgewonnen werden. Dazu wird ein Trägerrest (weniger als 1% der ursprünglichen Trägerleistung) mit übertragen.

Anwendung der Zweiseitenbandmodulation mit unterdrücktem Träger: Stereorundfunk

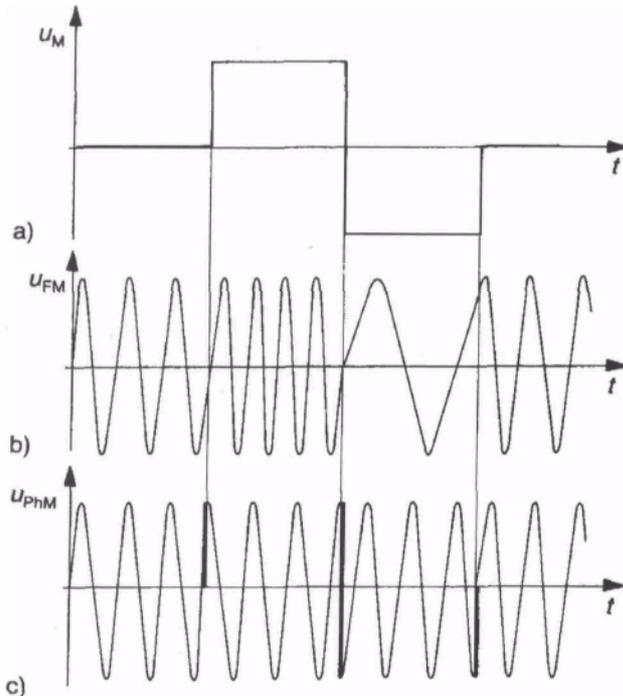
3.2 Einseitenbandmodulation:

Da in einem Seitenband alle Informationen eines Modulationssignals enthalten sind, genügt es ein Seitenband zu übertragen, was den Bandbreitenbedarf der Übertragung vermindert. Anwendung findet dieses Verfahren bei frequenzmultiplexer Nachrichtenübertragung auf Kabeln oder Richtfunkstrecken. Zur Demodulation ist ein Trägerrest mit zu übertragen.

Bei der Einseitenbandübertragung von Sprache (0,3 bis 3,4kHz) ist die Unterdrückung eines Seitenbandes (z.B. durch Filter) gut möglich, da keine Signalfrequenzen nahe 0Hz (bzw. Seitenbandfrequenzen nahe Träger) auftreten. Bei der Fernsehübertragung hingegen, treten Signalfrequenzen bis 0Hz auf. Hier findet die Restseitenbandmodulation Anwendung. Dabei wird auf Grund der endlichen Flankensteilheit des Filters das erwünschte Seitenband etwas beeinflusst und das unerwünschte -nicht vollständig unterdrückt.

4. Winkelmodulation

Wird die Frequenz (FM) oder die Phase (PM) der Trägerschwingung durch das Nutzsignal beeinflusst, spricht man von Winkelmodulation. Das folgende Bild stellt den Unterschied beider Verfahren an Hand einer Rechteckschwingung dar.



Unterschied zwischen FM und PhM
 a) Modulationssignal
 b) Frequenzmodulation
 c) Phasenmodulation

Es gilt allgemein: $\omega = d\phi / dt$ Bei

der Frequenzmodulation gilt:

$$\omega_T(t) = \omega_T + \alpha_F u_M(t)$$

α_F Modulatorkonstante

Setzt man für $\hat{u}_M = u_M \cos(\omega_M t)$ (Eintonmodulation) ein, gilt:

$$\omega_T(t) = \omega_T + \alpha_F \hat{u}_M \cos(\omega_M t) = \omega_T + \Delta\omega_T \cos(\omega_M t) = \omega_T (1 + m \cos(\omega_M t))$$

$\Delta\omega_T = m \omega_T$ Frequenzhub

Bei FM schwankt die Trägerfrequenz in Abhängigkeit der Amplitude ($m \omega_T$) und der Frequenz (ω_M) des Modulationssignals.

Diese Frequenzänderung entspricht aber auch einer Änderung der Phase:

$$\int (\omega_T + \Delta\omega_T \cdot \cos(\omega_M \cdot t)) dt \quad \text{ergibt} \quad \omega_T \cdot t + \frac{\sin(\omega_M \cdot t)}{\omega_M} \cdot \Delta\omega_T$$

Bei Phasenmodulation gilt:

$$\varphi_T(t) = \omega_T t + \alpha_P u_M(t)$$

α_P Modulatorkonstante

Setzt man für $u_M = u_M \sin(\omega_M t)$ (Eintonmodulation) ein, gilt:

$$\varphi_T(t) = \omega_T t + \alpha_P u_M \sin(\omega_M t) = \varphi_T + \Delta\varphi_T \sin(\omega_M t) = \varphi_T (1 + m \sin(\omega_M t))$$

$$\Delta\varphi_T = m\varphi_T \text{ Phasenhub}$$

Aus dem Vergleich mit der Phasenänderung bei FM ergibt sich:

$$\Delta\varphi_T = \Delta\omega_T / \omega_M$$

$$\Delta\omega_T / \omega_M = \eta \text{ Modulationsindex}$$

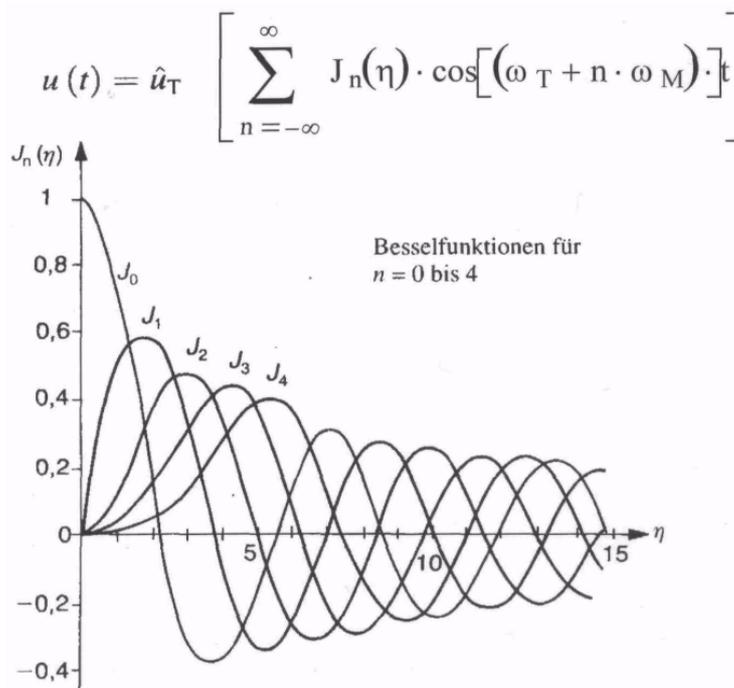
FM kann man also durch Integration des modulierenden Signals und anschließender PM gewonnen werden.

Umgekehrt kann durch Differenzierung des modulierenden Signals und folgender FM ein PM-Signal gebildet werden.

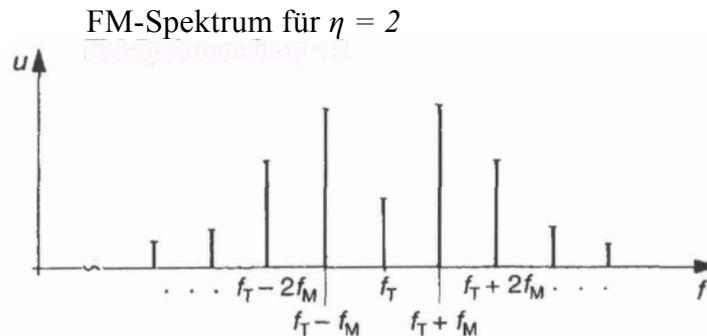
Allgemein gilt bei Eintonmodulation für ein winkelmoduliertes Signal:

$$u(t) = \hat{u}_T \cos(\varphi_T(t)) = \hat{u}_T \cos(\varphi_T t + T \sin(\omega_M t)) \text{ Zerlegt man diese Funktion in}$$

einzelne spektrale Anteile, führt das zu folgender Reihe:



Bei Winkelmodulation entsteht ein Frequenzspektrum, das aus der Trägerfrequenz und den Seitenfrequenzen $\pm n \omega_M$ mit den Amplituden $\hat{u} J_n(\eta)$ besteht.



Die Seitenschwingungen sind nicht mehr wie bei der AM selbstständige Träger von Informationen. Das Spektrum ist unendlich breit. Praktisch werden aber nur Amplituden $>10\%$ des unmodulierten Trägers übertragen. Das ergibt eine Übertragungsbandbreite von

$$B_{FM} = 2f_M (\eta + 1) = 2(\Delta f_T + f_M)$$

Bei kleinem Modulationsindex ($\eta < 1$) können die Besselfunktionen für $n > 1$ vernachlässigt werden, sodaß die Bandbreite der vom AM entspricht. (Schmalband FM)

Grundsätzlich kann folgendes gesagt werden:

Wird beim Empfänger die Bandbreite vermindert, führt dies zu einer grösseren Verzerrung, allerdings wird dadurch die Nachbarkanalselektivität (Abminderung des Einflusses benachbarter Sender) erhöht.

Anwendung von Schmalband FM: Fernempfang

Anwendung von Breitband FM: Nahempfang

Der Vorteil der Breitbandmodulation ($\eta > 1$) liegt in der geringeren Störempfindlichkeit auf Grund des hohen Leistungsanteils in den Seitenfrequenzen.

Frequenzmodulation wird durch Variieren der Frequenz eines Oszillators erreicht. Dazu muss im frequenzbestimmenden Netzwerk des Oszillators eine der Reaktanzen durch das Modulationssignal gesteuert werden. (z.B. mittels Kapazitätsdiode oder steuerbarer induktiver und kapazitiver Blindwiderstände in Reaktanzschaltungen) Bei der Phasenmodulation wird nur die Phase der Trägerschwingung durch das Modulationssignal verändert. Die Trägerfrequenz bleibt konstant, sodass stabilisierte Oszillatoren eingesetzt werden können.

FM hat (wie AM) den Vorteil, dass es Empfangsmethoden gibt, bei denen der Träger im Empfänger nicht benötigt wird.

Die Information des winkelmodulierten Signals liegt in den Nulldurchgängen, nicht aber in der Amplitude.

Bei der Demodulation können grundsätzlich zwei Arten unterschieden werden: -

Umwandlung in eine AM: Flankendemodulator, Diskriminatoren -direkte

Demodulation: Koinzidenzdemodulator, PLL-Diskriminator

5. Tastmodulation (Digitale Modulation)

Die Tastmodulation dient zur Übertragung digitaler Signale. Dabei wird ein Sinusträger verwendet, der entweder in seiner Amplitude, seiner Frequenz oder in seiner Phase umgetastet wird.

Bei einer Periodendauer T_0 des zu übertragenden Rechtecksignals ergibt sich erfahrungsgemäß eine notwendige Übertragungsbandbreite von:

$$B = 1,6 / T_0 \text{ (bzw. } 2 * 1,6 / T_0 \text{ bei Amplitudentastung)}$$

Üblicherweise wird das Modulationssignal vor der Tastung in seiner Bandbreite begrenzt. Die Rechteckschwingungen werden dadurch zu Trapezschwingungen verformt. Bei dieser sogenannten Weichtastung sind Modulatoren bzw. Demodulatoren ähnlich denen bei analogen Modulationssignalen notwendig, mit geringerer Anforderung an die Linearität. Erfolgt keine Bandbegrenzung vor der Modulation, spricht man von Harttastung. Bei der Harttastung werden Schalter zur Modulation (Umtastung von Amplitude, Frequenz oder Phase des Trägers) eingesetzt.

Wird bei der Amplitudentastung der Träger nur ein und ausgeschaltet, kann kein Senderausfall erkannt werden. Es ist deshalb eine Umtastung zwischen zwei Trägeramplituden denkbar, sodass ein Totalausfall als Fehler erkannt werden kann. Die Empfindlichkeit gegenüber Amplitudenstörungen, kann dadurch aber nicht beseitigt werden.

Bei der Frequenztastung erfolgt Umschaltung zwischen zwei unterschiedlichen Trägerfrequenzen. (z. B. durch Zu- und Abschalten einer Kapazität im Trägerschwingkreis) Demodulation und Eigenschaften siehe analoge FM.

Der Vorteil der Frequenztastung gegenüber der Amplitudentastung, liegt in der größeren Störsicherheit.

Ein Nachteil besteht darin, dass die Trägerschwingung in keinem quarzstabilisierten Generator erzeugt werden kann.

Phasenumtastung (PSK) ist das gegen Störspannungen am wenigsten anfällige Verfahren.

Die Phasenumtastung ist mit einer Phasenverschiebung von 180° verbunden.

Für die Demodulation muss der unmodulierte Träger mit übertragen oder phasenrichtig aus dem übertragenen Signal erzeugt werden. Dies kann durch Differenzphasentastung umgangen werden.

Bei der Differenzphasenumtastung steckt die Information in der Änderung der hintereinander übertragenen Bits. Der Sender muss dabei einen Synchronisierungstakt mitliefern, der die zeitlich richtige Zustandsabfrage ermöglicht.

Bei der 4Phasen PSK erfolgt eine Umtastung zwischen 4 Zuständen (90° Phasenverschiebung). Dadurch kann pro Schritt eine grössere Informationsmenge übertragen werden.

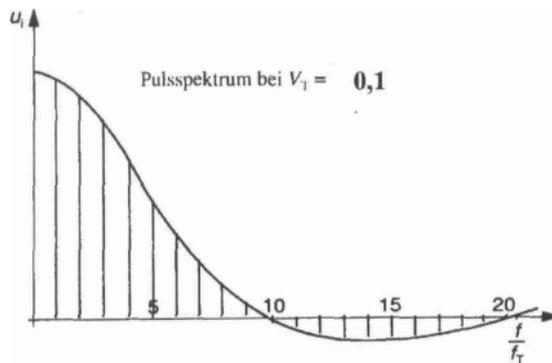
Beim Farbfernsehen werden unterschiedliche Amplitudenstufen mit unterschiedlichen Phasenlagen kombiniert. Die Amplitudenstufen werden (z. B. bei der Quadraturmodulation (QAM)) zwei um 90° in der Phase versetzten gleichfrequenten Trägern aufgeprägt. Damit stehen zwei Kanäle mit unterschiedlichen Amplitudenstufen zur Verfügung.

6. Pulsmodulation 6.1.

Pulsträger

Bei der Pulsmodulation dient als Träger eine periodische Impulsfolge (Puls). Das modulierende Signal wird nur im Takt der Trägerpulse erfasst. Das Abtasttheorem ist einzuhalten.

Ein wesentlicher Unterschied zu den Modulationsarten mit Sinusträger besteht darin, dass der Träger nicht nur eine Spektralfrequenz aufweist. Das folgende Bild stellt die Spektralanteile für ein Tastverhältnis V_T (Pulsdauer zu Periodendauer) von 1/10 dar.



Es sind die Anteile bis $f/f_T = 1/V_T$ zu übertragen. Ein kleines Tastverhältnis ist aber für Zeitmultiplex anzustreben, um möglichst viele Kanäle übertragen zu können. Damit steigt aber die zu übertragende Bandbreite.

Abhilfe schaffen statt Rechteckschwingungen Pulse mit \cos^2 -förmigen Flanken.

Neben Amplitude, Frequenz und Phase können bei Pulsträger auch das Tastverhältnis zur Modulation herangezogen werden.

6.2. Pulsamplitudenmodulation

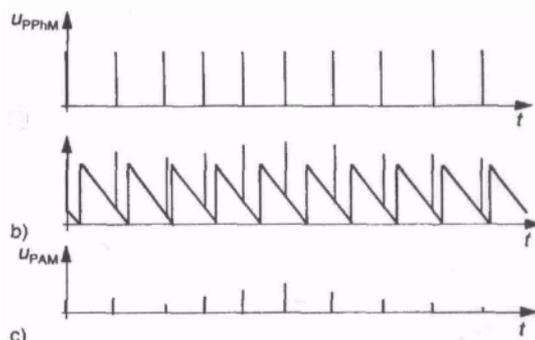
Das Signal wird im Takt des Trägers abgetastet. Der analoge Abtastwert dient zur Modulation der Amplitude des Pulsträgers. Zu jeder Spektrallinie des Pulsträgers treten Seitenbänder (wie bei der AM) auf. Die Bandbreite ist daher nicht viel grösser als die Bandbreite des unmodulierten Pulses.

Bei Zeitmultiplex dürfen sich die zu verschachtelnden PAM Impulse nicht gegenseitig überschneiden. Das Tastverhältnis ist dem entsprechend zu wählen.

PAM ist wie AM sehr anfällig gegen Amplitudenstörungen. Es wird daher auch nicht zur Nachrichtenübertragung, sondern nur als Zwischenstufe zu anderen Pulsmodulationsarten verwendet.

Beispiel Demodulation eines Puls-Phasenmodulierten (PPhM) Signals:

- Prinzip der Pulsphasendemodulation
 a) PPhM-Signal
 b) Sägezahn und PPhM
 c) PAM-Signal



Mittels Sägezahnswingung, die synchron zum unmodulierten Puls ist, wird aus dem PPhM ein PAM-Signal gebildet. Mittels Tiefpass kann daraus das ursprüngliche Signal gebildet werden.

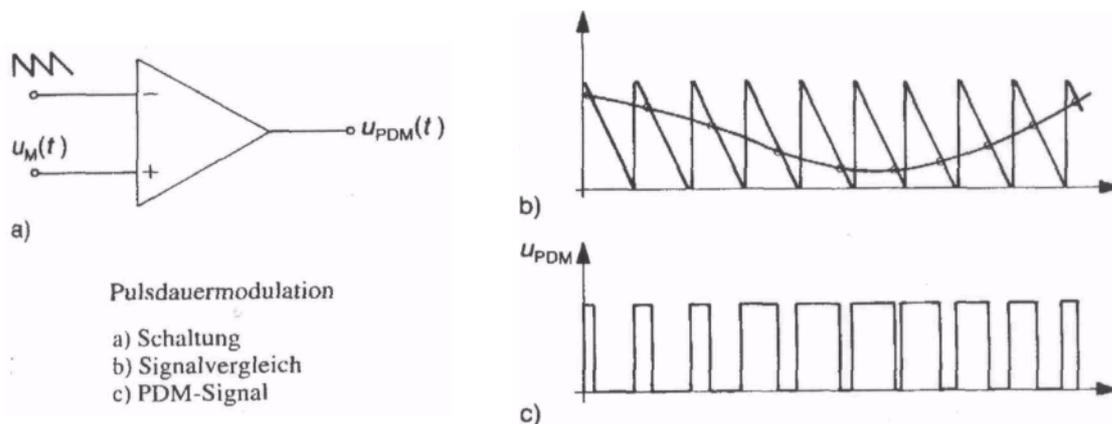
6.3. Pulswinkelmodulation

Die Bandbreite wird auch hier im wesentlichen durch den Pulsträger bestimmt. Der Vorteil besteht darin, dass dieses Verfahren unempfindlich gegen Amplitudenstörung ist. Bei der Pulswinkelmodulation wird ein spannungsgesteuerter Oszillator mit der Modulationsspannung (PFM) oder der integrierten Modulationsspannung (PPhM) beeinflusst. Ein Rechteckimpulsformer erzeugt aus dem Ausgangssignal die Pulsmodulation. Zur Demodulation können die Schaltungen wie bei Sinusträger verwendet werden.

6.4. Pulsdauermodulation (PDM)

Bei der PDM steckt die Information in der Pulslänge. Dadurch ist die Störempfindlichkeit bezüglich der Amplitude geringer als bei PAM. Die Bandbreite wird wieder durch den Impulsträger bestimmt.

Bei der Modulation wird das modulierende Signal mit einer Sägezahn oder Dreieckimpulsfolge mittels Komparator verglichen. Am Ausgang des Komparators entstehen so unterschiedlich lange Impulse.



Die Demodulation kann durch einen Tiefpass (Integrator) erfolgen, da die Spannungszeitfläche proportional dem modulierenden Signal ist. Eine andere Möglichkeit stellt die Abtastung mittels Sägezahn (siehe PAM) dar.

7. Pulscodemodulation

Bei der Pulscodemodulation wird das analoge Modulationssignal abgetastet, quantisiert und codiert. Der codierte Wert wird mittels Pulsträger übertragen.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Störsicherheit.

Beim Abtasten ist das Abtasttheorem einzuhalten.

Beispiel: Telefoniekanal 300 bis 3400Hz => Abtastfrequenz $f_A = 8\text{kHz}$

Die Differenz zwischen Istwert und nächster Quantisierungsstufe nennt man Quantisierungsrauschen.

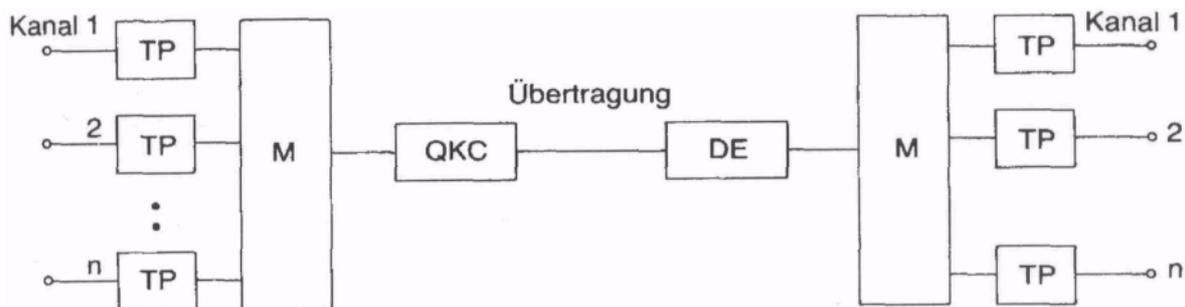
Die Anzahl der Quantisierungsstufen bestimmt den Störabstand (Signal - Rausch - Verhältnis) und bei sinusförmigen Signalen den Klirrfaktor.

In der Fernsprechtechnik genügt eine Codewortlänge von $r = 8\text{bit}$.

Damit ergibt sich eine notwendige Bitrate von:

$$R = r f_A = 64\text{kBit/s}$$

Um einerseits den Störabstand genügend gross zu halten und andererseits nicht zuviele Quantisierungsstufen (Bitratenerhöhung) zu benötigen, wird nichtlineare Quantisierung angewandt. Dabei werden grosse Signale in groben Stufen, kleinere Signale in feineren Stufen quantisiert. Dieser Vorgang wird als Kompondieren bezeichnet.



Aufbau eines PCM-Systems

Die einzelnen Kanäle mit den analogen Nachrichten werden bandbegrenzt (TP), mit Hilfe eines analogen Multiplexers (M) abgetastet. Daran schließt sich die Stufe der Quantisierung, Kompondierung und Codierung (QKC) an. Die Übertragung kann im Basisband oder durch Transformation in einen anderen Frequenzbereich erfolgen.

Auf der Empfängerseite erfolgt Decodierung und Expandierung (DE), Verteilung der Information auf die Kanäle synchron zum Sender (M) und Umwandlung in analoge Signale mit Hilfe von Tiefpässen (TP).

Eine Modifizierung der PCM stellt die Deltamodulation dar. Dabei wird nur die Änderung der zum vorhergehenden Zeitschritt übertragen. Bei genügend hoher Abtastrate sind diese Änderungen klein, sodass damit eine Verminderung der notwendigen Bitrate erzielt wird. Der Empfänger benötigt allerdings eine Anfangsinformation bei der Nachrichtenübertragung, um das Empfangssignal richtig rekonstruieren zu können.