

9 TRÄGERFREQUENZMESSUNGEN

9.1 Grundgedanken für die Instrumentierung großer Anlagen

Die Messung elektrischer Größen ist vorwiegend eine Instrumental-technik. Man unterscheidet Meßgeräte mit Zubehör und Meßschaltungen. Anzeiger und Schreiber gehören zum Gebiet der Meßgeräte, während Meßbrücken, Kompensatoren und Meßverstärker zu den Meßschaltungen zählen.

Die elektrische Meßtechnik nichtelektrischer Größen schließt eine Umformungs- und Übertragungstechnik mit ein. Die zu messende nichtelektrische Größe muß nämlich in eine elektrische Größe abgebildet werden. Dazu benötigt man nicht nur Meßgeräte mit ihrem Zubehör, sondern eine Kette meßtechnischer Übertragungsglieder. Auf diese Weise entsteht eine *Meßkette*, bzw. ein *Meßkanal*.

Die einfachste Meßkette besteht aus drei Übertragungsgliedern, nämlich *Fühler*, *Meßumformer* und *Anzeiger*, wie in Bild 2 gezeigt wird.

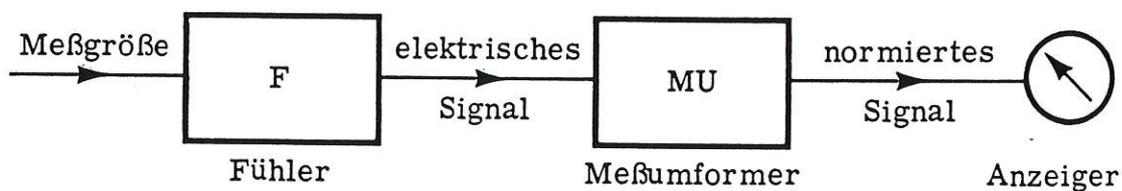


Bild 2 Meßkette

Der Fühler dient zur Erfassung und Umwandlung der nichtelektrischen Größe in ein elektrisches Signal, der Meßumformer zur Verstärkung und Normierung des Signals. Das normierte Ausgangssignal des Meßumformers wird dem elektrischen Anzeiger zugeführt.

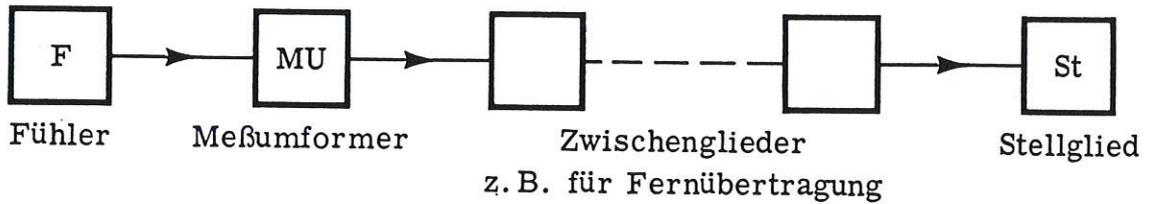
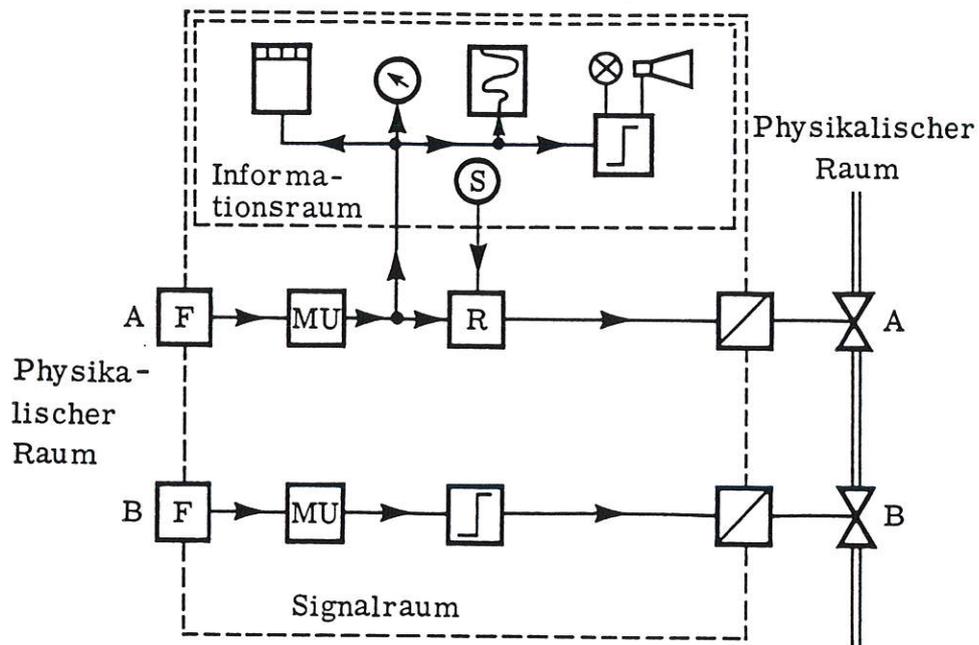


Bild 3 Steuerkette

Das Signal ist eine zeitlich veränderliche Größe, welche Träger einer Nachricht ist; in dieser Nachricht ist die Meßgröße enthalten.

Die dreigliedrige Meßkette ist die einfachste Form eines Meßkanals. Es gibt längere und komplizierter aufgebaute Meßketten. Bei der Fernmessung treten oft noch Umsetzer hinzu, die ein analoges Signal in eine proportionale Frequenz verwandeln und Modulatoren, die diese



A - A Kombiniertes Meß- und Regelkanal
B - B Abschaltkanal

- | | | |
|-------------------|-----------------|---------------------|
| F Fühler | Zähler | Warnlampe |
| MU Meßumformer | Schreiber | Hupe |
| R Regler | Anzeiger | Signalverzweigung |
| Grenzwertschalter | Sollwertsteller | Signalflussrichtung |
| Stellmotor | Stellorgan | |

Bild 4 Instrumentierung großer Anlagen

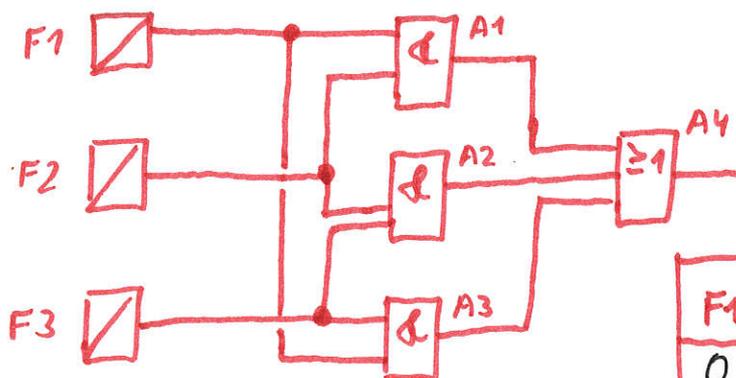
Frequenz einem hochfrequenten Träger aufmodulieren (Trägerfrequenztechnik). Entsprechend benötigt man auch Demodulatoren und weitere Umsetzer, die das in der Frequenz enthaltene Signal in einen proportionalen Gleichstrom umwandeln. Ein solcher Meßkanal ist ein Sonderfall einer Steuerkette.

Eine Steuerkette ist eine "perlschnurartige" Anordnung von Übertragungsgliedern, beginnend mit dem Fühler und endigend mit einem Stellglied (Bild 3).

Oft treten auch Verzweigungen im Meßkanal auf, die zu neuen Übertragungsgliedern führen, z.B. Grenzwertschalter, Regler, Leitgeräte, Stellorgane. Wenn eine besonders hohe Übertragungssicherheit erzielt werden soll, wird der Meßkanal in parallele Stränge aufgeteilt. Praktisch ausgeführt wird diese "strukturelle Redundanz" z.B. in den Sicherheitssystemen der Kernkraftwerke. Wenn einer von drei parallelen, für die Übertragung des Meßwertes verwendeten Strängen fehlerhaft sein sollte, so stellen die verbliebenen beiden Stränge sicher, daß der Meßwert trotzdem fehlerfrei übertragen wird.

2 von 3

Bild 4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau und das Zusammenwirken der Übertragungsglieder bei der Instrumentierung großer Anlagen. Es sind drei Räume angedeutet, der physikalische Raum, in ihm eingebettet der Signalraum und innerhalb dieses Gebietes der Informationsraum.



2 von 3 = AUSWAHL

F1	F2	F3	A1	A2	A3	A4
0	1	1	0	1	0	1
1	0	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	0	1
1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0

9.2 Die drei Grundstrukturen und das Modulationsprinzip

Meßsignalverarbeitung durch strukturelle Maßnahmen

Für die erreichbaren Übertragungseigenschaften von Meßeinrichtungen ist in starkem Maße die Struktur der Vermaschung der einzelnen Meßglieder maßgebend. Die Qualität der Meßeinrichtungen ist von der *durch strukturelle Maßnahmen bedingten Meßsignalverarbeitung* abhängig.

Zunächst lassen sich drei Grundstrukturen, nämlich

- die Kettenstruktur,
- die Parallelstruktur und
- die Kreisstruktur

unterscheiden.

In Kettenstruktur werden *Meßketten* von der nichtelektrischen Meßgröße als Eingangsgröße eines Aufnehmers bis zum Ausgangssignal eines Ausgabegerätes realisiert. Die Anpassung des Aufnehmer-Ausgangssignals an das Eingangssignal des sog. Ausgebers erfolgt meist über eine Meßschaltung, einen Meßverstärker und/oder ein geeignetes Rechenggerät. Häufig wird in Kettenstruktur auch die nichtlineare Kennlinie eines Meßgrößen-Aufnehmers

linearisiert, indem ein Meßglied mit inverser Übertragungscharakteristik nachgeschaltet wird.

Die Parallelstruktur wird am häufigsten in Form des *Differenzprinzips* angewendet. Zwei sonst gleichartige Meßglieder werden um einen bestimmten Arbeitspunkt herum gegensinnig angesteuert und die erhaltenen Ausgangssignale voneinander subtrahiert. Daraus resultiert zunächst eine Linearisierung der Übertragungskennlinie. Außerdem wird der Einfluß gleichsinniger Störungen, z. B. von Umgebungstemperaturänderungen, stark reduziert.

Die Kreisstruktur wird häufig in Form des Kompensationsprinzips (Gegenkopplung) eingesetzt. Die Ausgangsgröße eines in der Rückführung liegenden Meßgliedes wird dabei der Meßgröße entgegengeschaltet (Gegenkopplung) und so lange verändert, bis sie näherungsweise gleich der Meßgröße geworden ist. Es findet eine Umkehrung der Wirkungsrichtung statt. So ist z. B. der Spannungsteiler in der Rückführung eines gegengekoppelten Meßverstärkers das bestimmende Meßglied für die Übertragungseigenschaften des erhaltenen Spannungsverstärkers. Die kleine Ausgangsspannung des Spannungsteilers wird zur Eingangsgröße, und die Versorgungsspannung des Spannungsteilers wird zur Ausgangsgröße.

In Kreisstruktur werden auch Oszillatoren durch Mitkopplung realisiert. Das Ausgangssignal eines frequenzabhängigen Netzwerks wird dabei gleichphasig auf den Eingang zurückgeführt (Mitkopplung), und es entstehen Schwingungen, wenn durch entsprechende Verstärkung im Kreis auch die Amplitudenbedingung erfüllt ist.

Außer diesen drei Grundstrukturen ist das Modulationsprinzip von besonderer Bedeutung. Es ähnelt der Kettenstruktur und wird gerne zur nullpunktsicheren Verstärkung oder Umformung kleiner Meßsignale verwendet.

Der in der Regel gestörte untere Frequenzbereich eines Nutzsignals wird durch Modulation der Amplitude eines Trägerfrequenzsignals in einen vergleichsweise wenig gestörten mittleren Frequenzbereich transformiert.

Das modulierte Signal kann dann nullpunktsicher verstärkt und anschließend phasenrichtig demoduliert werden. Auf diese Weise ist sowohl die nullpunktsichere Verstärkung kleiner Spannungen und Ströme mit Hilfe von Zerhackerverstärkern (Chopper) möglich; aber auch die nullpunktsichere Umformung kleiner Signaländerungen von ohmschen, induktiven oder kapazitiven Widerständen in trägerfrequenzgespeisten Meßbrücken. Auch bei der Messung optischer oder daraus abgeleiteter Meßgrößen bedient man sich gerne des Modulationsprinzips, indem ein Lichtstrom von einer rotierenden Modulatorscheibe periodisch moduliert wird.

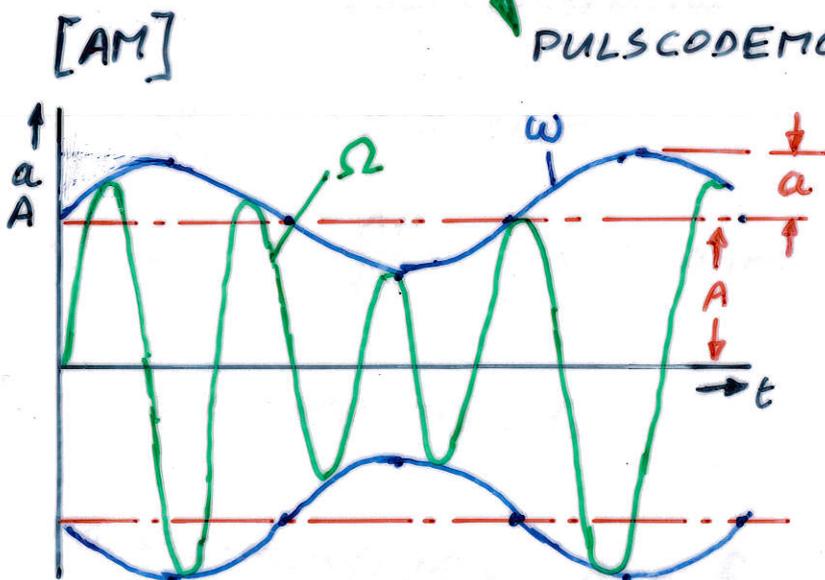
MODULATION IST DIE PLANMÄSSIGE BEEINFLUSSUNG EINES TRÄGERSIGNALS DURCH DAS MODULATIONSSIGNAL (ZU ÜBERTRAGENDES SIGNAL).

SCHWINGUNGSMODULATION = MODULATION EINES SINUSFÖRMIGEN TRÄGERSIGNALS

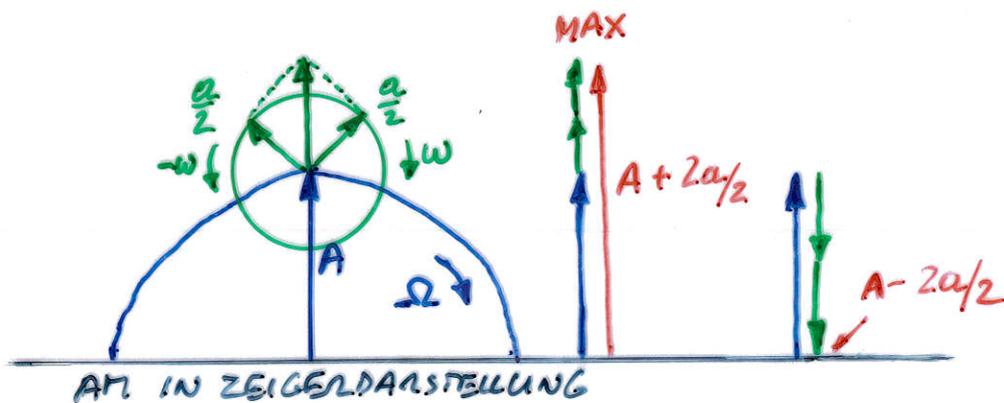
PULSMODULATION = MODULATION EINES PULSFÖRMIGEN TRÄGERSIGNALS

SCHWINGUNGSMODULATION → AMPLITUDENMODULATION [AM]
 → FREQUENZMODULATION [FM]
 → PHASENMODULATION [PM]

PULSMODULATION → PULSAMPLITUDENMODULATION [PAM]
 → PULSDAUERMODULATION [PDM]
 → PULSFREQUENZMODULATION [PFM]
 → PULSPHASENMODULATION [PPM]
 → PULSCODEMODULATION [PCM]

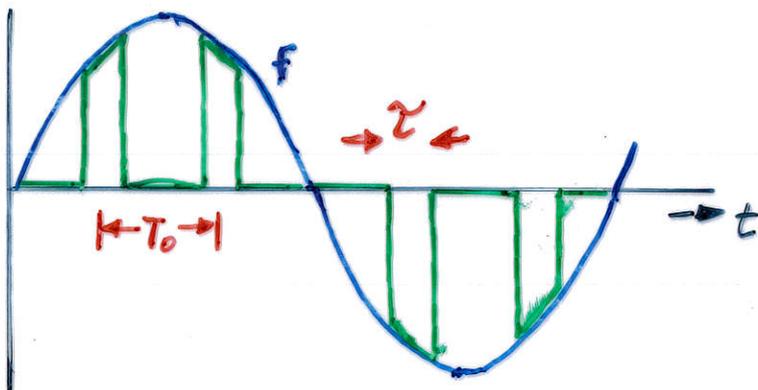


A = TRÄGERAMPLITUDE
 Ω = TRÄGERFREQUENZ
 a = MODULATIONSAMPLITUDE
 ω = MODULATIONSFREQUENZ



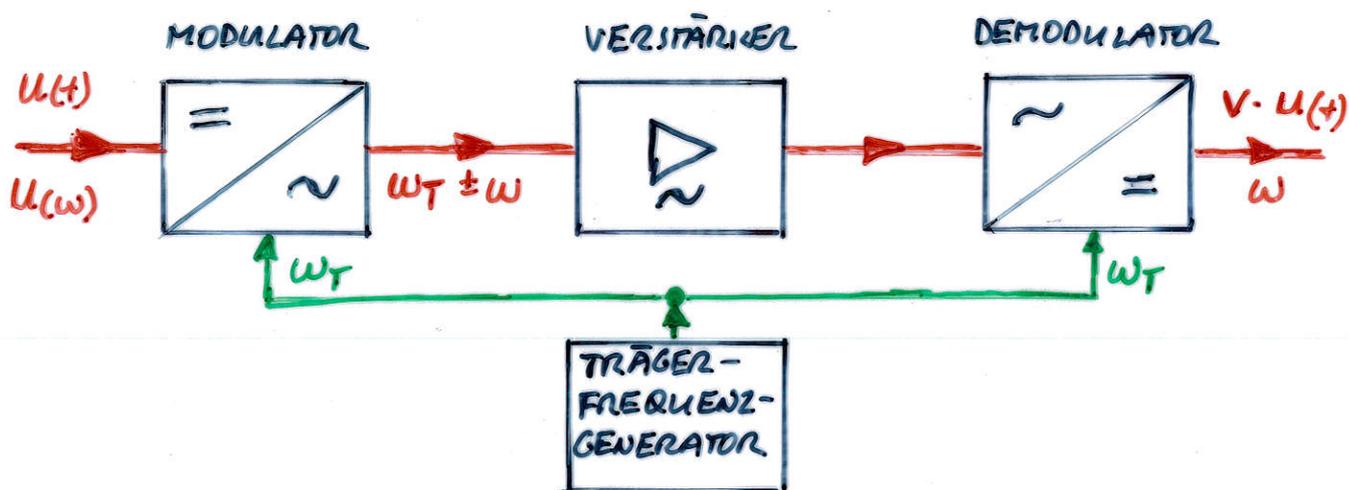
AM IN ZEIGERDARSTELLUNG

[PAM]



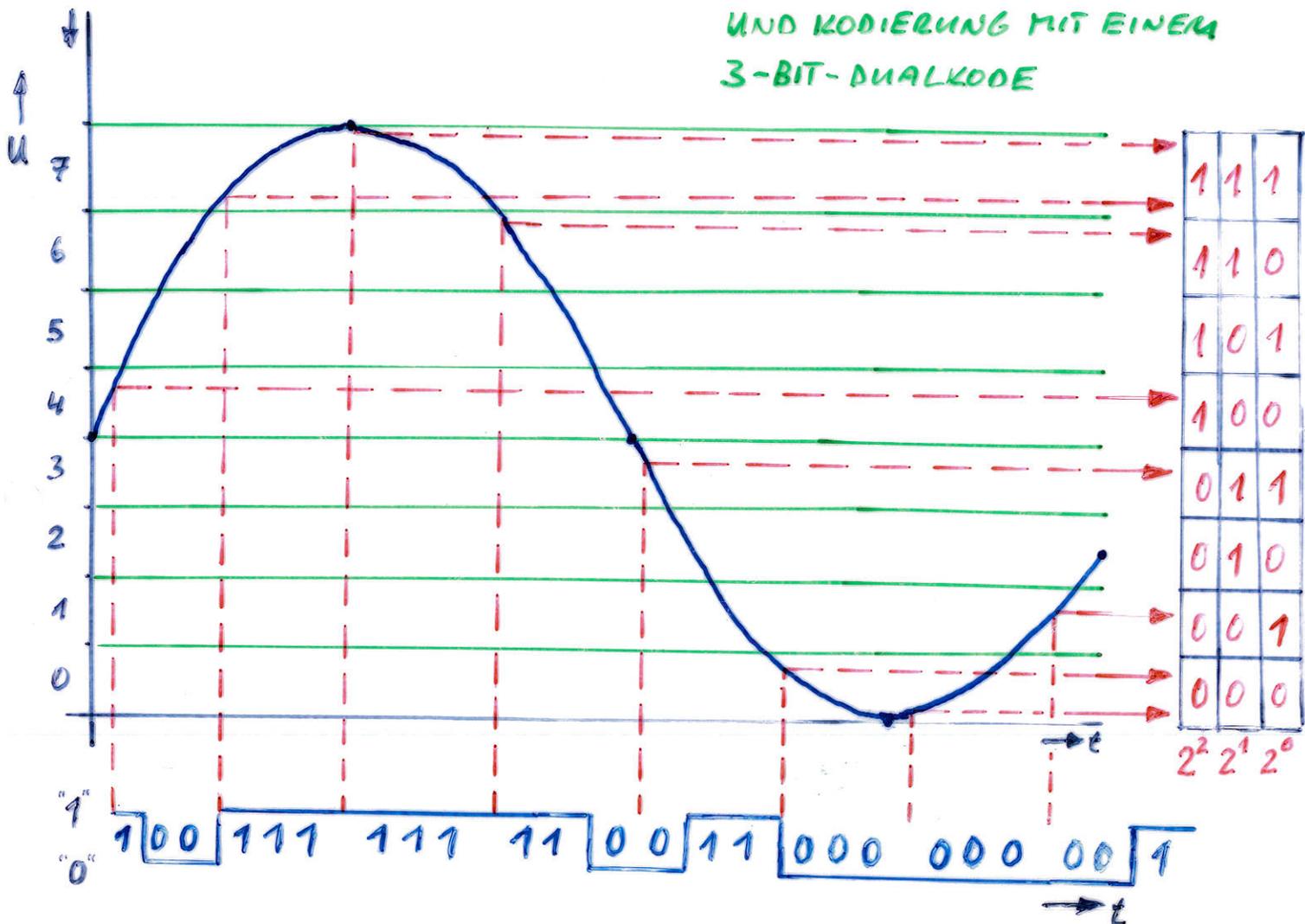
z = IMPULSBREITE
 T_0 = TAKTABSTAND

MODULATIONSPRINZIP



PULSCODEMODULATION (PCM)

SCHEMA DER QUANTISIERUNG
UND KODIERUNG MIT EINEM
3-BIT-DUALKODE



DEZIMALZAHN	DUALKODE	GRAYKODE
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

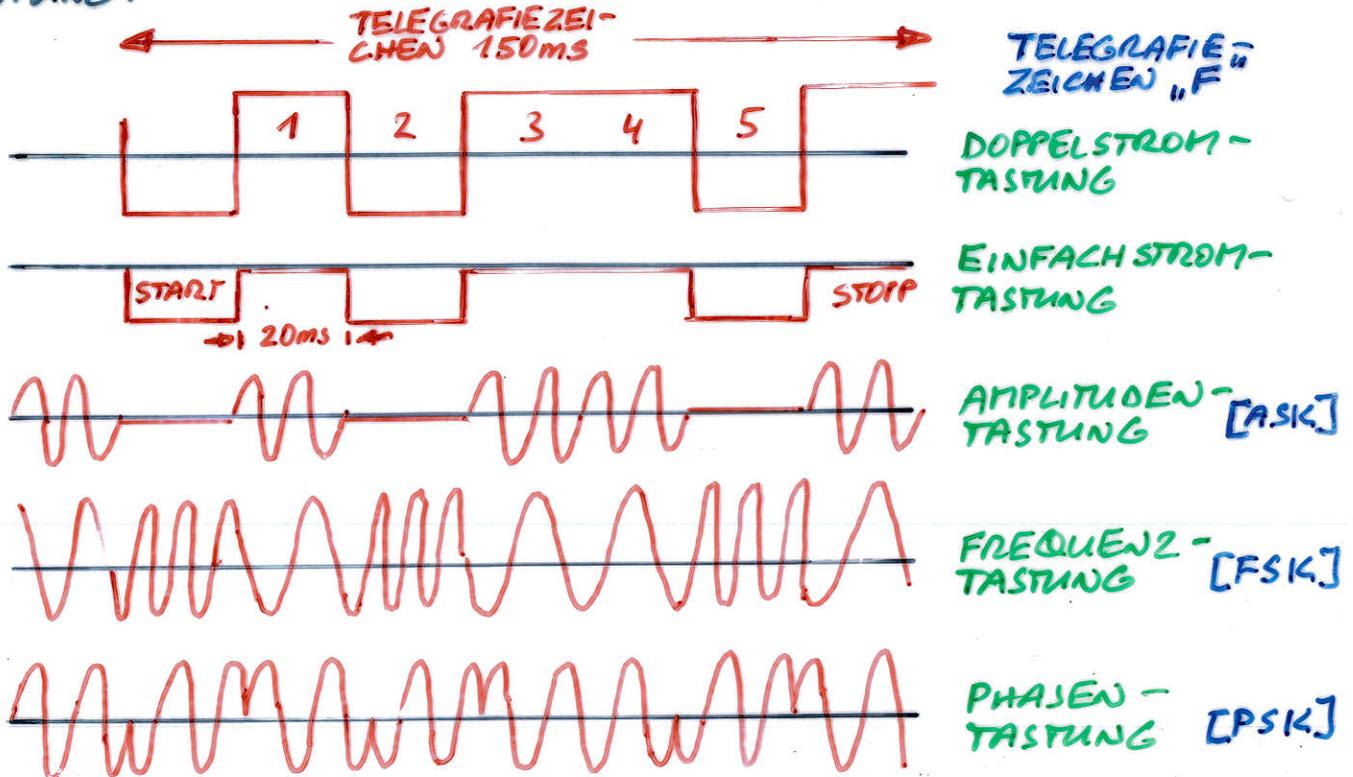
GRAYKODE : BEVORZUGT, DA GERINGERE FEHLERWAHRSCHEIN-
LICHKEIT BEI STÖRUNGEN IM ÜBERTRAGUNGS-
WEG!

MODULATIONART "TASTUNG"

M. TRIER
06/01

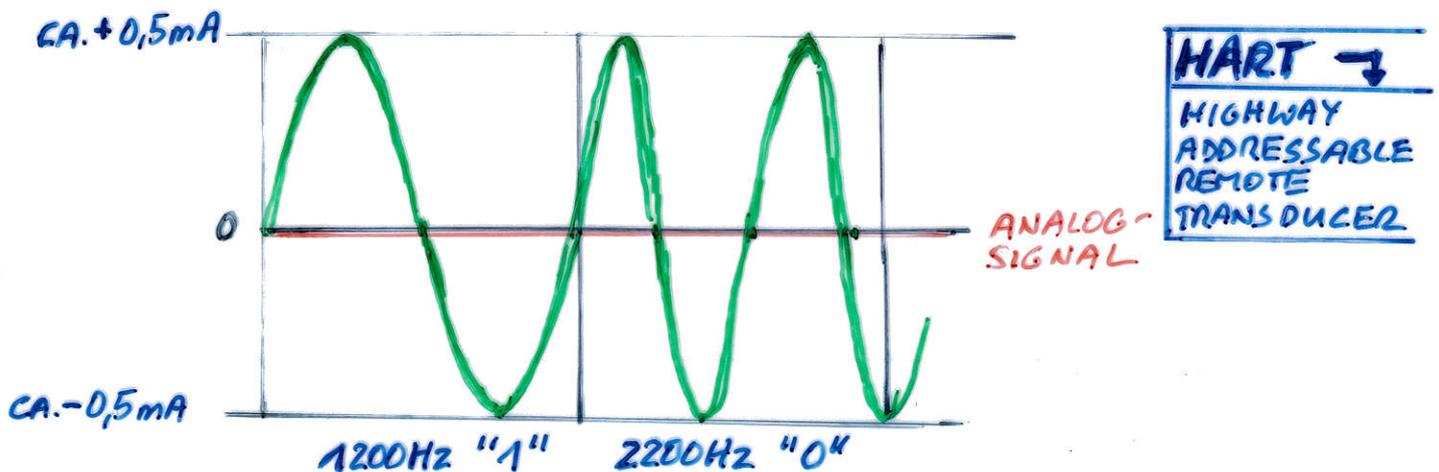
TASTUNG IST EINE SEHR EINFACHE ART DER MODULATION. BEKANNTLICH LÄSST SICH ALLEIN DURCH EIN- UND AUS-SCHALTEN EINES LICHTSTRAHLS EINE NACHRICHT ÜBERTRAGEN. BEI DEN ELEKTNISCHEN MODULATIONSVERFAHREN DIESE ART SPRICHT MAN VON TASTUNG

WIRD EINE WECHSELSPANNUNG ALS TRÄGER DER INFORMATION VERWENDET, DIES DURCH AUS- UND EINSCHALTEN DIE NACHRICHT AUFMODULIERT WIRD, HAT MAN WECHSELSTROM-TASTUNG.



ES VERSTEHT SICH, DASS NUR DIGITAL VORLIEGENDE NACHRICHTEN ALSO Z.B. MORSE ZEICHEN ODER BINÄR KODIERTE FERNSCHREIBZEICHEN ODER DATEN AUFMODULIERT WERDEN KÖNNEN.

FSK (FREQUENCY SHIFT KEYING) BEIM HART-PROTOKOLL



9.3 MODULATION / DEMODULATION

Einführung

Jedes in irgendeiner Form zu übertragende Nutzsinal ist durch sein Frequenzband beschreibbar. Beim Beispiel des Telefons ist dieses bekanntlich zwischen 300 Hz und 3400 Hz festgelegt. Bei der Systembetrachtung haben wir außerdem erkannt, daß für eine einwandfreie Übertragung die Übertragungsstrecke entsprechend geeignet sein muß, also im Idealfall die obere und untere Grenzfrequenz von Signal und Übertragungsstrecke übereinstimmen. Dieses ist in der Praxis jedoch nur selten der Fall.

Bei leitungsgebundener Übertragung ist die Grenzfrequenz der als Tiefpaß wirkenden Leitung meistens wesentlich größer als die obere Grenzfrequenz des Signals. Damit bleiben mögliche Frequenzbereiche ungenutzt.

Die unmittelbare Verwendung der Atmosphäre als Übertragungsstrecke, also drahtlose Übertragung, ist nach unseren Erkenntnissen über die elektromagnetischen Wellen z.B. für niederfrequente Signale überhaupt nicht möglich. Für eine Übertragung sind hochfrequente Wellen erforderlich.

Vorstehende Überlegungen zeigen, daß in den meisten Fällen das Signal nicht in seiner ursprünglichen Frequenzlage übertragen werden kann. Abhilfe stellt die Verwendung eines Trägersignals dar, das der vorhandenen Übertragungsstrecke angepaßt ist und welches das Nutzsinal im Huckepack-Verfahren transportiert. Dieses Verfahren der planmäßigen Beeinflussung eines Trägersignals zum Zwecke der Übertragung heißt Modulation, wobei das den Träger verändernde Nutzsinal jetzt Modulationssignal genannt wird.

Als Trägersignale sind im Prinzip beliebige Formen möglich. In der Praxis kommen jedoch fast ausschließlich nur Sinusschwingungen oder Pulse zur Anwendung, da diese einfach erzeugt werden können und auch mathematisch überschaubar sind. Als Pulse sind dabei periodische Folgen gleicher Impulse zu verstehen. Letztere sind Signale, die während einer festgelegten Zeitspanne einen beliebigen von Null abweichenden Verlauf des Signalwertes aufweisen.

Aus vorstehenden Gründen unterscheiden wir zwischen den Verfahren der Schwingungsmodulation und denen der Pulsmodulation. Sie werden diese in den nächsten beiden Abschnitten kennenlernen.

Beschreibung des zu übertragenden Signals durch sein Frequenzband

Anpassung zwischen Signal und Übertragungsstrecke ist meistens nicht gegeben

Die Übertragung eines Signals ist in den meisten Fällen nicht in seiner ursprünglichen Frequenzlage möglich.

Modulation ist die planmäßige Beeinflussung eines Trägersignals durch das Modulationssignal (= zu übertragendes Nutzsinal).

UNTERSCHIEDUNG IN :

- a) **Schwingungsmodulation = Modulation eines sinusförmigen Trägersignals**
- a) **Pulsmodulation = Modulation eines pulsförmigen Trägersignals**

Die Modulation des Trägersignals geschieht stets auf der Senderseite eines Übertragungssystems. Sie stellt sozusagen den Beladevorgang dar. Auf der Empfängerseite muß daher die Abladung stattfinden, weil nur das Modulationssignal von Interesse ist. Es findet die Demodulation statt. Sie ist Thema eines getrennten Kapitels.

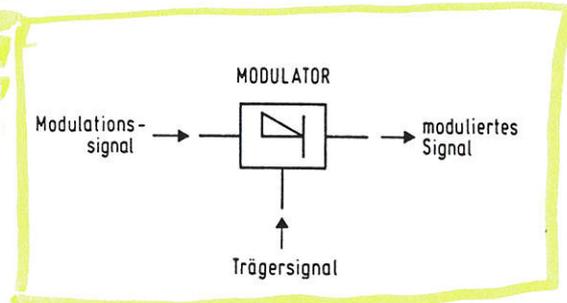


Bild 3.1.0-1 Modulation

SIEHE S. 295

Schwingungsmodulation

Prinzip

Das sinusförmige Trägersignal bei der Schwingungsmodulation kann in seiner allgemeinen Form wie folgt beschrieben werden:

Als veränderliche Werte, Parameter genannt, sind somit die Amplitude (= Scheitelwert) \hat{u}_T , die Frequenz ω_T und der Phasenwinkel φ_T denkbar. Die steuernde Größe ist das Modulationssignal. Dieses kann ebenfalls grundsätzlich als sinusförmig betrachtet werden, da nach unseren Erkenntnissen über die FOURIER-Analyse auch nichtsinusförmige Verläufe aus der Überlagerung von Sinuskurven unterschiedlicher Amplitude und Frequenz bestehen.

Die drei Möglichkeiten zur Beeinflussung des Trägersignals durch das Modulationssignal führen in der Praxis zu den verschiedenen Verfahren der Schwingungsmodulation. Ändert sich die Amplitude, also der Scheitelwert des Trägersignals im Rhythmus des Modulationssignals, dann liegt Amplitudenmodulation (Abk.: AM) vor. Die Variation der Frequenz des Trägersignals führt zur Frequenzmodulation (Abk.: FM), während entsprechende Phasenwinkeländerungen die Phasenmodulation (Abk.: PM) hervorrufen. Die einzelne Modulation können Sie so verstehen, als ob die jeweilige Größe des Trägersignals durch das zeitabhängige und mit Hilfe einer Konstanten k angepaßte Modulationssignal ersetzt wird. Die beiden anderen Größen des Trägersignals bleiben dabei konstant.

Trägersignal

$$u_T(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(\omega_T t \pm \varphi_T) \quad (3.1.1-1)$$

Modulationssignal

$$u_M(t) = \hat{u}_M \cdot \sin(\omega_M t \pm \varphi_M) \quad (3.1.1-2)$$

ALLGEMEINE
FORM DER
SCHWINGUNGS-
MODULATION



AM = Amplitudenmodulation

$$u_{AM}(t) = \underbrace{k \cdot u_M(t)}_{\text{AMPLITUDE}} \cdot \sin(\omega_T t \pm \varphi_T) \quad (3.1.1-3)$$

SIEHE 289

FM = Frequenzmodulation

$$u_{FM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(\underbrace{k \cdot u_M(t) \cdot t}_{\text{FREQUENZ}} \pm \varphi_T) \quad (3.1.1-4)$$

SIEHE 290

PM = Phasenmodulation

$$u_{PM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(\omega_T t \pm \underbrace{k \cdot u_M(t)}_{\text{PHASE}}) \quad (3.1.1-5)$$

k : ZEITABHÄNGIGE KONSTANTE $\hat{=}$ MODULATIONSSIGNAL

Überlagerung und Mischung

Überlagert man zwei Spannungen verschiedener oder gleicher Frequenz in einem **linearen** System, so **addieren** sich die Amplituden in jedem Zeitpunkt, ohne daß dabei neue Frequenzen entstehen. Aus der Summenschwingung kann man die einzelnen Frequenzen durch einfache frequenzabhängige Glieder (Filter) wieder voneinander trennen. Sind jedoch die Frequenzen ω_1 und ω_2 der Teilschwingungen

$$a_1 = A_1 \sin \omega_1 t$$

$$a_2 = A_2 \sin \omega_2 t$$

nur wenig voneinander verschieden und die Amplituden A_1 und A_2 annähernd gleich, so tritt

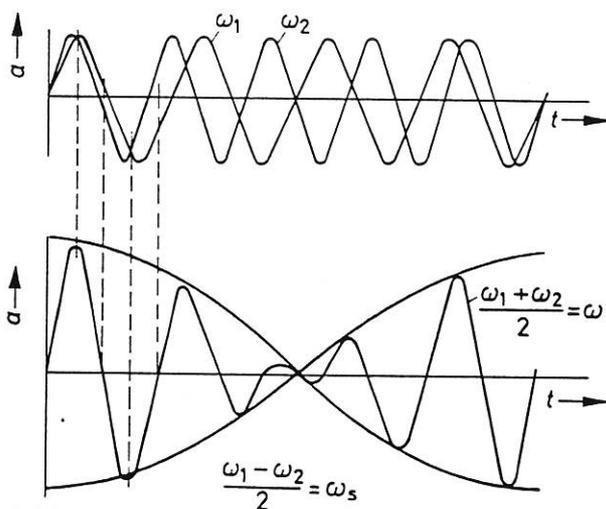


Bild 6.1 Schwebung

Differenzfrequenzen sowie deren Oberschwingungen wie auch die Oberschwingungen der Grundfrequenzen auftreten. **Diese Produktbildung durch Mischung ist eine Modulation.**

Von den vielen Modulationsprodukten sind lediglich die Summenfrequenz $\Omega + \omega$ und die Differenzfrequenz $\Omega - \omega$ nachrichtentechnisch interessant, da jede dieser Frequenzen für sich bereits den vollen Nachrichteninhalt aufweist. $\Omega + \omega$ und $\Omega - \omega$ heißen Seitenfrequenzen (Bild 6.2) und, wenn ω als Modulationsfrequenz z.B. im Nf-Sprachband ($\Delta\omega$) schwanken kann, die entsprechenden Frequenzbereiche oberhalb und unterhalb der Mittenfrequenz Ω Seitenbänder.

bei einer Überlagerung noch eine **Schwebungsfrequenz** ω_s auf, die die Hüllkurve der Summenschwingung der beiden Grundfrequenzen darstellt (Bild 6.1).

Aus der Addition und Umformung

$$\begin{aligned} a &= a_1 + a_2 = A_1 (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t) \\ &= 2 A_1 \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \end{aligned}$$

folgt mit

$$\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \omega \quad \text{und} \quad \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} = \omega_s$$

der Ausdruck

$$a = 2 A_1 \cos \omega_s t \sin \omega t$$

für die Sinusschwingung mit der Frequenz ω , deren Amplitude sich zusätzlich mit der Frequenz ω_s ändert. Hierbei wurde $A_1 = A_2$ zugrunde gelegt. Aus Bild 6.1 ist zu erkennen, daß die Summenschwingung ω im Augenblick des Nulldurchganges der Schwingung ω_s einen Phasensprung erlebt, der die beiden Halbwellen links und rechts vom Schwebungsnull um jeweils 90° verkürzt.

Überlagert man im Gegensatz zur **einfachen Überlagerung** in einem linearen System zwei Spannungen in einem **nichtlinearen** System, so erhält man eine **Mischung**, bei der das Produkt der beiden Grundschwingungen mit den Frequenzen Ω und ω gebildet wird und Summen- und

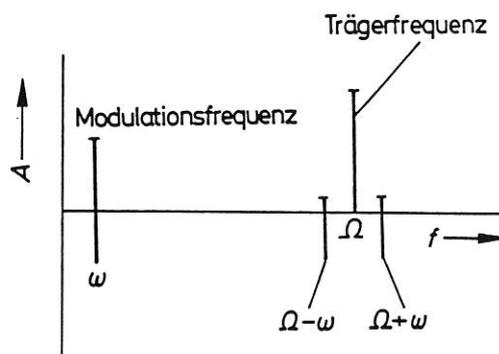


Bild 6.2 $\Omega - \omega$ und $\Omega + \omega$ sind Seitenfrequenzen

Amplitudenmodulation

Die Amplitudenmodulation (AM) ist dadurch gekennzeichnet, daß die Amplitude der Trägerfrequenzspannung im Rhythmus der modulierenden Spannung schwankt. Ist die Gleichung der Trägerschwingung

$$s_1 = A \cos \Omega t$$

und die Modulationsspannung

$$s_2 = a \cos \omega t,$$

so gilt

$$s = (A + a \cos \omega t) \cos \Omega t.$$

Nach Umformung lautet die Gleichung der amplitudenmodulierten Schwingung:

$$s = A \cos \Omega t + \frac{a}{2} \cos (\Omega + \omega)t + \frac{a}{2} \cos (\Omega - \omega)t.$$

Darin sind die beiden letzten Glieder die Seitenfrequenzen $\Omega + \omega$ und $\Omega - \omega$. Setzt man noch den **Modulationsgrad** $m = a/A$ (siehe Bild 6.3) ein, so lautet die Schwingungsgleichung

$$s = A \left[\cos \Omega t + \frac{m}{2} \cos (\Omega + \omega)t + \frac{m}{2} \cos (\Omega - \omega)t \right].$$

Diese Gleichung, die nur die Trägerschwingung und die beiden Seitenfrequenzen enthält, gilt nur bei sinusförmigen Spannungen und idealer Modulatorkennlinie (Parabel zweiten Grades).

Bei nichtidealer Kennlinie oder verzerrten Spannungen treten Seitenfrequenzen höherer Ordnung auf.

Sehr übersichtlich ist die Zeigerdarstellung der Modulation (Bild 6.4). An den Zeiger der Trägerschwingung A , der mit Ω rotiert, sind die Zeiger der Modulationsspannung angesetzt, die jeweils $a/2$ lang sind und gegenläufig mit ω um die Spitze von A umlaufen. Als Maximalwert der modulierten Schwingung ist $A + 2a/2$ und als Minimalwert $A - 2a/2$ in Momentdarstellung herausgezeichnet.

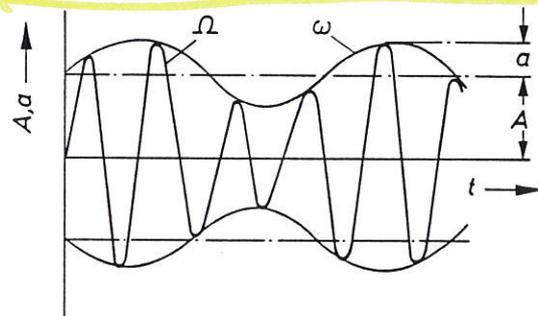


Bild 6.3 Amplitudenmodulation

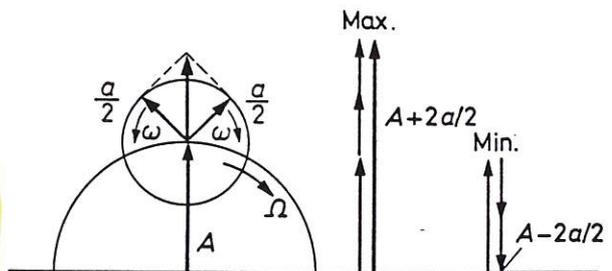


Bild 6.4 AM in Zeigerdarstellung

$A = \text{TRÄGERAMPLITUDE}$
 $\Omega = \text{TRÄGERFREQUENZ}$
 $a = \text{MODULATIONSAMPLITUDE}$
 $\omega = \text{MODULATIONSFREQUENZ}$

Frequenzmodulation

Frequenzmodulation (FM) ist die Änderung der Momentanfrequenz einer Trägerschwingung Ω_0 im Takt einer Modulationsspannung. Schematisch ist dies in Bild 6.5 dargestellt. Die **Frequenz f_m** der Modulationsspannung bestimmt dabei die **Häufigkeit** der Frequenzänderungen der Trägerschwingung. D.h., wird die Trägerschwingung mit einer Modulationsspannung von 100 Hz moduliert, so ändert sie 100mal je Sekunde ihre Frequenz, und zwar bei jeder Modulationsschwingung nach oben und nach unten. Man kann sich dies an einem Schwingkreis vorstellen, dessen Kondensator seine Kapazität im Rhythmus einer angelegten Nf-Spannung ändert; damit schwankt auch die Frequenz des Schwingkreises im Rhythmus der Niederfrequenz. Wie weit sich die Frequenz ändert, also der **Frequenzhub ΔF** , hängt dabei von der **Amplitude** der Modulationsspannung ab.

Die Gleichung der modulierten Schwingung lautet

$$s = A \cos \left[\Omega_0 t - \frac{\Delta \Omega}{\omega} \cos (\omega t + \varphi) \right].$$

Hierin ist $\Delta \Omega / \omega$ der **Modulationsindex η** ; er bedeutet das Verhältnis von $\Delta \Omega = 2 \pi \Delta F$ zur

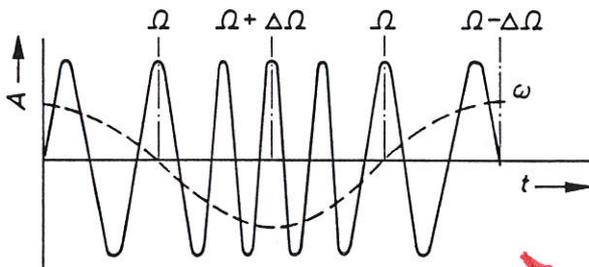


Bild 6.5 Frequenzmodulation

Phasenmodulation

Eng mit der Frequenzmodulation verwandt ist die Phasenmodulation. Zum Unterschied geht man hier aber von einer konstanten, mit allen Mitteln stabilisierbaren Frequenz aus, deren Phase im Takt der Modulationsfrequenz verändert wird, was, momentan betrachtet, auch eine Frequenzänderung ist, da sich der Zeiger beim Vor- und Zurückschwingen schneller und langsamer bewegt. Die **Größe** der Zeigerauslenkung, also der

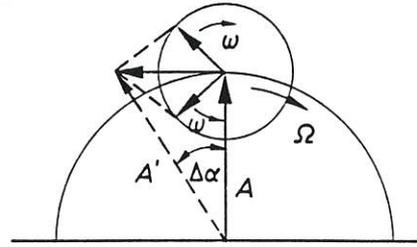


Bild 6.6 FM in Zeigerdarstellung

Modulationskreisfrequenz $\omega = 2 \pi f_m$. Bei sinusförmiger Frequenzmodulation ist der Modulationsindex gleich dem **Phasenhub $\Delta \alpha$** . Zwar wird die Amplitude der Trägerschwingung bei der Frequenzmodulation nicht direkt beeinflusst, doch ist aus der Zeigerdarstellung (Bild 6.6) zu erkennen, daß die Resultierende der an der Spitze des Zeigers A gegensinnig umlaufenden Zeiger der Modulationsspannung eine, wenn auch wegen des kleinen Phasenhubes, für den Bild 6.6 nur gilt, nur geringe Änderung der Amplitude von A zur Folge hat.

Gegenüber der Amplitudenmodulation entstehen unendlich viele Seitenfrequenzen als Vielfache der Modulationsfrequenz f_m , die allerdings sehr rasch auf unbedeutende Amplituden abfallen. Die Einengung des Spektrums durch Begrenzen der Bandbreite hat nichtlineare Verzerrungen zur Folge, so daß die notwendige Übertragungsbandbreite nach der zulässigen Verzerrung festgelegt wird. Die Bandbreite sollte mindestens $2(\Delta F + 2 f_m)$ betragen, da außerhalb des Frequenzhubbereiches noch mindestens zwei Seitenfrequenzen mit erheblicher Amplitude (abhängig vom Modulationsindex) auftreten.

A = TRÄGERAMPLITUDE
Ω = TRÄGERFREQUENZ
α = MODULATIONSSAMPLITUDE
ω = MODULATIONSFREQUENZ

Phasenhub $\Delta \alpha$, ist hier der **Amplitude** der Modulationsschwingung proportional; die **Häufigkeit** der Auslenkung entspricht der **Frequenz** der Modulationsschwingung.

Der mit Phasenmodulation erzielbare Frequenzhub (die zeitliche Ableitung der Phase) ist sehr klein. Man moduliert hierzu eine niedrige Trägerfrequenz und vervielfacht diese dann in mehreren Stufen. Bei jeder Frequenzvervielfachung erhöht

Bei Phasenmodulation ist der Phasenhub unabhängig von der Modulationsfrequenz, dagegen nimmt der Frequenzhub mit zunehmender Modulationsfrequenz zu.

Dieser Satz wird anhand von Bild 7.1 verdeutlicht. Es handelt sich bei a und bei b um den gleichen Träger, der jedoch bei b mit der doppelten Modulationsfrequenz moduliert wird. Die Modulations-

$$\begin{aligned} \text{a) } & 5 \cdot 2\pi - 4 \cdot 2\pi = 2\pi \\ \text{b) } & 3 \cdot 2\pi - 2 \cdot 2\pi = 2\pi \end{aligned}$$

Daß bei b in der Hälfte der zur Verfügung stehenden Zeit, $T_M/4$, der gleiche Phasenhub hervorgebracht werden kann wie bei a, ist nur dadurch möglich, daß die Frequenz innerhalb dieser Viertelperiode entsprechend höher ist. Man beachte bei b das engere Zusammenrücken der Schwingungen im Gebiet der Verdichtung – ein Zeichen größeren Frequenzhubs.

7.2. Erzeugung der Phasenmodulation

Von den zahlreichen Verfahren der Phasenmodulationserzeugung sollen nur einige im Prinzip gezeigt werden, um dem Verständnis der Phasenmodulation zu dienen und den Unterschied zur FM zu kennzeichnen.

1. Überlagerung 90° verschobener AM-Schwingungen

Diese Methode ist zwar wenig gebräuchlich, zeigt aber das Prinzip der Phasenmodulation deutlich, nämlich die Proportionalität zwischen Modulationsamplitude und Phasenhub (Bild 7.2). Zwei im Gegentakt AM-modulierte Schwingungen werden überlagert. Wichtig ist, daß die Hf-Schwingungen beider gegeneinander 90° phasenverschoben sind. Der Summenzeiger läge im unmodulierten Fall dadurch unter 45° und ist um den Faktor $\sqrt{2}$ größer als die Trägeramplituden der einzelnen AM-Schwingungen; er pendelt winkelmoduliert um diese Lage. Es ist aus der Zeichnung leicht zu entnehmen, daß (bei kleinen Hüben) der Phasenhub proportional zur AM-Modulationstiefe, also zu u_M , ist. Wir haben es also mit Phasenmodulation zu tun. Es entsteht gleichzeitig eine mit zunehmendem Hub wachsende unerwünschte Amplitudenmodulation.

2. Überlagerung 90° verschobener Seitenschwingungen zum Träger

Auch bei diesem Verfahren (Bild 7.3) ist ein 90° -Phasenschieber notwendig. Ein fester Träger, der quarzstabilisiert sein darf, dient gleichzeitig nach Durchlaufen eines 90° -Phasenschiebers zur Herstellung zweier Seitenbänder der Modulationsspannung in einem Ringmodulator. Er wird mit den so um 90° verschobenen Seitenbändern überlagert. Es gibt sich eine winkelmodulierte

Schwingung. Der Winkel ist proportional zur Amplitude der Summe der Seitenschwingungen und diese ihrerseits zu u_M , also: Phasenmodulation! Es versteht sich, daß dieses Verfahren auch wieder nur für kleine Phasenhub, werden hier doch nur die Seitenschwingungen 1. Ordnung des Spektrums zum Träger addiert.

3. Nachgeschalteter Phasenschieber

Einem Festfrequenzgenerator wird ein Netzwerk nachgeschaltet, dessen Phase durch u_M variiert werden kann. Im einfachsten Fall kann dies ein Schwingkreis sein, der auf die Festfrequenz abgestimmt ist. Beeinflußt u_M die Kapazität (z.B. Kondensatormikrofon), so verschiebt sich die

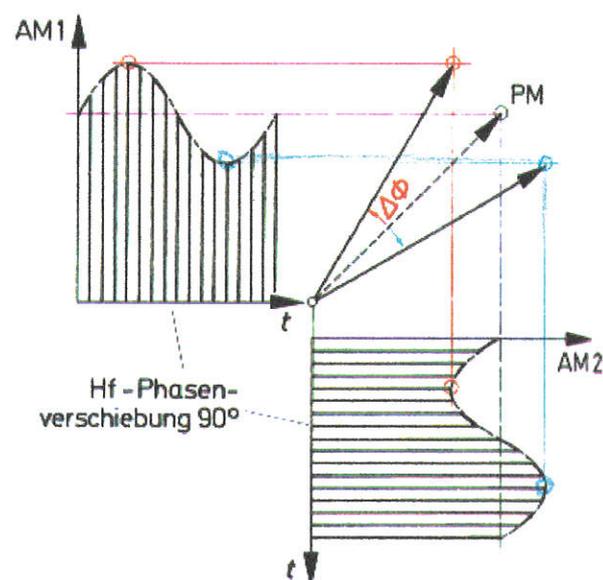
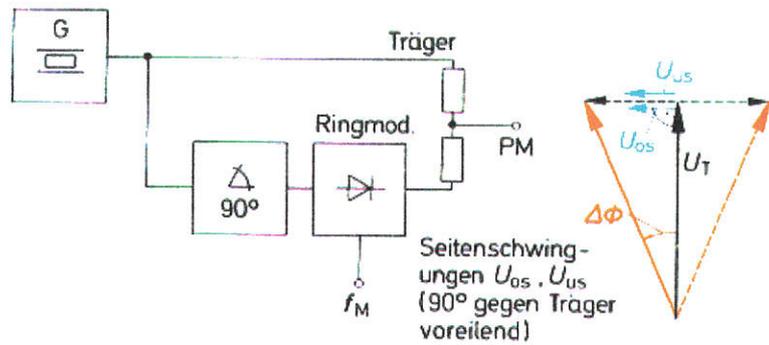


Bild 7.2 Überlagerung 90° verschobener amplitudenmodulierter Hf-Schwingungen

Bild 7.3 Überlagerung von Träger und 90° verschobener Seitenschwingungen



Resonanzkurve (rote und blaue Kurve in Bild 7.4a) und mit ihr die Phasenkurve (Bild a, unten). Abgesehen davon, daß nun die Festfrequenz infolge der Flankendämpfung eine leichte Amplitudeneinbuße erfährt und dadurch eine unerwünschte Amplitudenmodulation mit entsteht, ergibt sich die gewünschte Winkelmodulation, weil die Ausgangsspannung in einen anderen Phasenstand übergehen muß, der größer oder kleiner als 0° ist.

Winkelmodulation und Frequenzmodulation gehören untrennbar zusammen, gleichzeitig sperrt man sich aber hier gegen die Vorstellung des Auftretens einer anderen Frequenz, wo doch der Schwingkreis von einem Festfrequenzgenerator gespeist wird. Doch kann man den Übergang einer Schwingung von einem Phasenstand in einen anderen auch als das Auftreten einer anderen Frequenz betrachten (Bild 7.5a). Ist der Übergang vollzogen, wird wieder die ursprüng-

liche Frequenz gemessen. Der Übergang „Winkelzunahme“ ergibt Frequenzzunahme, der Übergang „Winkelabnahme“ ergibt Frequenzabnahme (man vergleiche hierzu $\omega = \Delta\phi/\Delta t$, S. 90). Bei Sinusmodulation der Phase entsteht 90° verschobene Sinusmodulation der Frequenz (Bild 7.5b). Es können auch bei dieser Schaltung nur geringe Phasenhübe erzeugt werden. Eine Verbesserung bringt ein mehrkreisiges Filter anstelle des Schwingkreises. Infolge des flachen Durchlaßdämpfungsverlaufs verringert sich die störende zusätzliche AM, und die größere Steilheit der Phasenwinkelkurve liefert größeren Phasenhub. Die Schaltung Bild 7.4b zeigt gleichzeitig einen wesentlichen Unterschied zwischen Phasenmodulations- und FM-Erzeugung. Bei Phasenmodulation wird lediglich die Phase einer Schwingung geändert. Der Vorgang geschieht **nach** Erzeugung der Festfrequenz. Diese darf quartztabil sein. Bei FM-Erzeugung greift die Modulations-

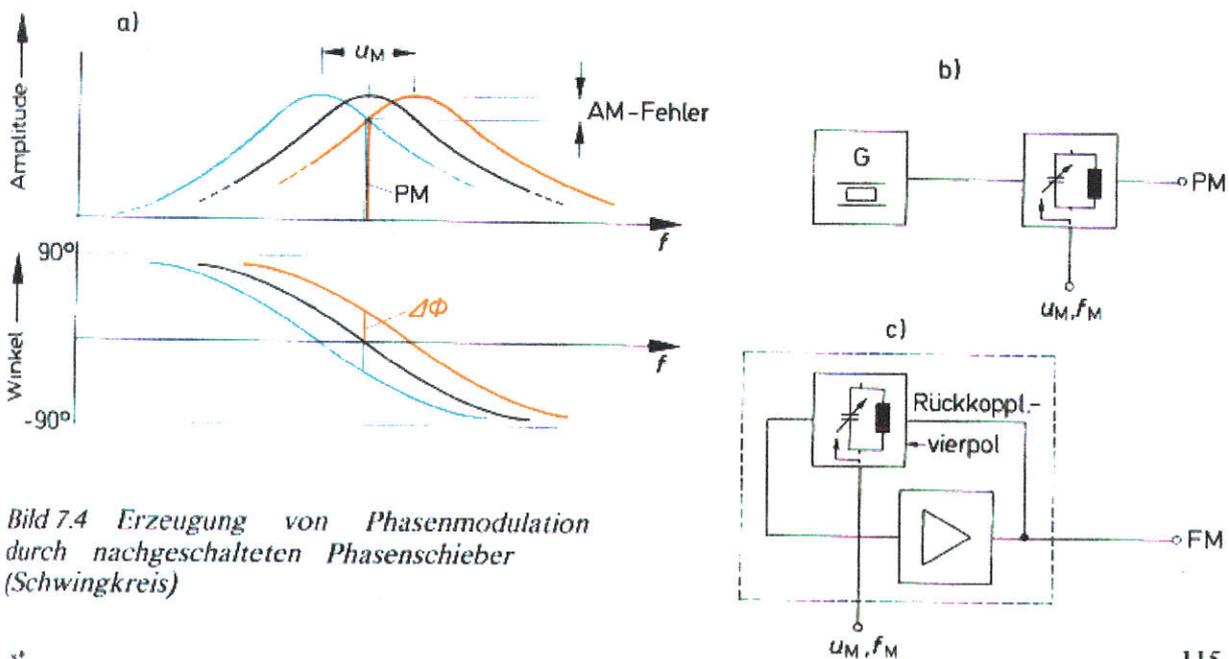


Bild 7.4 Erzeugung von Phasenmodulation durch nachgeschalteten Phasenschieber (Schwingkreis)

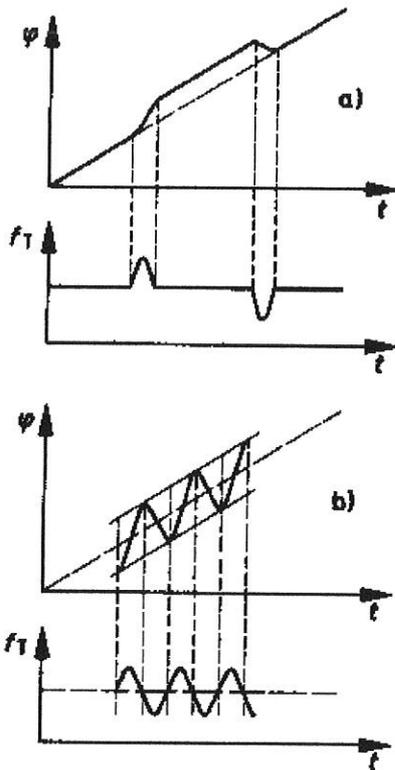


Bild 7.5 Zusammenhang zwischen Frequenz und Phase

spannung in den Rückkopplungs-zweig ein; dort wird die Phasenverschiebung des frequenzbestimmenden Rückkopplungsvierpols geändert. Das rückgekoppelte System muß auf eine andere Frequenz umschwingen, damit die Rückkopplungsbedingung wieder stimmt (Bild 7.4c). Auf Bild a übertragen, würde das bedeuten, daß die entstehende Frequenz dem jeweiligen Maximum der Schwingkreischarakteristik folgt.

4. Phasenmodulation als FM mit frequenzabhängiger Modulationsspannung

Bild 7.6 zeigt das Prinzip. Bei FM nimmt der Phasenhub mit zunehmender Modulationsfrequenz ab. Gleichet man dies dadurch aus, daß man die Modulationsspannung mit Hilfe eines Netzwerks mit geeignetem frequenzabhängigen Übertragungsfaktors linear mit der Modulationsspannung ansteigen läßt, kann die Phasenhubabnahme ausgeglichen werden. Man erhält konstanten Phasenhub im Übertragungsband (Bild 7.6 rechts).

Es ist dies eine ähnliche Maßnahme wie die der Preemphasis. Praktisch werden hier FM-Oszillatorschaltungen (s. S. 87) verwendet, jedoch zusätzlich der Vierpol zur frequenzabhängigen Spannungsformung der Modulationsspannung.

Vor- und Nachteile der vier Verfahren

Die ersten drei genannten Verfahren haben den Vorteil, daß quarzstabile Trägergeneratoren verwendet werden können. Nachteilig ist, daß nur geringe Phasenhub möglich sind und daß mit zunehmendem Hub störende AM auftritt.

Größere Phasenhub müssen z.B. durch Frequenzvervielfachung gemacht werden. Bei Frequenzverdoppelung verdoppeln sich auch größte und kleinste Augenblicksfrequenz, also der Frequenzhub und mit ihm der Phasenhub.

Von praktischer Bedeutung ist das vierte Verfahren wegen des größeren erreichbaren Hubs. Der Nachteil, daß keine quarzstabile Trägerfrequenz möglich ist, muß nötigenfalls durch Frequenzregelung behoben werden.

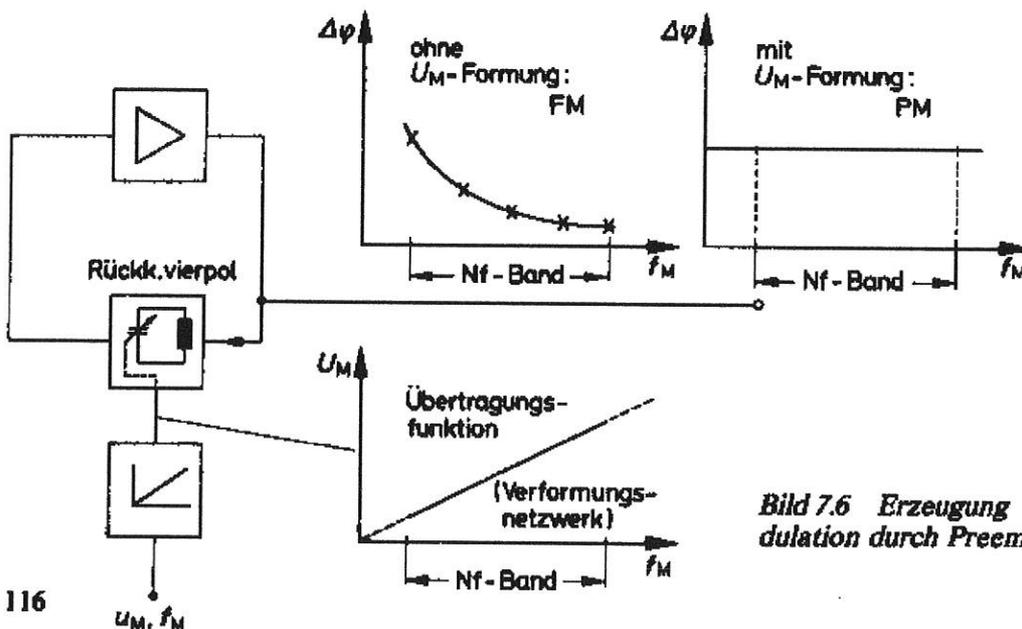


Bild 7.6 Erzeugung von Phasenmodulation durch Preemphasis

sich der Frequenzhub um den gleichen Faktor, so daß man letzten Endes auf den Frequenzhub kommt, der für eine verzerrungsfreie Übertragung notwendig ist. Wie bei der Frequenzmodulation treten hier unendlich viele Seitenfrequenzen auf.

Der besondere Vorteil der Frequenz- und Phasenmodulation, die beide oft unter dem Oberbegriff **Winkelmodulation** zusammengefaßt werden, ist der Umstand, daß die Trägeramplitude

kein Signal enthält. Auf dem Übertragungsweg erlittene Amplitudenverzerrungen oder überlagerte Störspannungen ändern die Zeicheninformation nicht. Sie können durch Begrenzung der Amplitude des Trägers unterdrückt werden, denn die Information steckt nur in der Folge der Nulldurchgänge der Trägerschwingung bzw. deren zeitlicher Verschiebung gegen Ω_0 . Die Winkelmodulation bietet also eine relativ störungsfreie Übertragung.

Pulsmodulation

Ein Impuls ist ein Strom- oder Spannungsstoß, der durch seine Länge (Dauer), Amplitude und Phase bestimmt ist. Eine Folge von Impulsen ist ein Puls. Zur Modulation wird eine der Bestimmungsgrößen des Pulses verändert. Entsprechend unterscheidet man Pulsamplitudenmodulation (PAM), Pulsdauermodulation (PDM), Pulsfrequenzmodulation (PFM) und Pulsphasenmodulation (PPM). Eine weitere Modulationsart ist die Pulsmodulation (PCM), bei der die Impulsfolge entsprechend der Nachricht in einem bestimmten Kode ausgesendet wird.

Die Pulsmodulation ist eine Darstellung der Nachricht in Form einer entsprechend beeinflussten Impulsfolge, die sich jedoch noch im niederfrequenten Bereich befindet. Um auf einen hochfrequenten Träger übertragen zu werden, muß der modulierte Puls noch einmal nach einem AM- oder FM-Verfahren den Träger modulieren. D.h., zur Übertragung der Nachricht mit Pulsmodulation und einem hochfrequenten Träger muß zweimal moduliert werden. Man spricht dann z.B. von PAM-FM.

zen, die höher als die höchste in der Nachricht vorkommende Frequenz f_0 sind, durch einen Tiefpaß zu unterdrücken. Hinter dem Tiefpaß ist die Nachricht originalgetreu wieder verfügbar. Bei einem Telefoniekanal beträgt die Bandbreite 300 Hz bis 3,4 kHz. Entsprechend dem Abtasttheorem müßte die minimale Abtastfrequenz also $F_0 = 6,8$ kHz betragen. Die europäischen Postverwaltungen verwenden bei der Anwendung dieser Technik in PCM-Systemen (siehe Seite 119) eine Abtastfrequenz von 8 kHz, um einen genügenden Abstand zur Minimalforderung zu gewinnen.

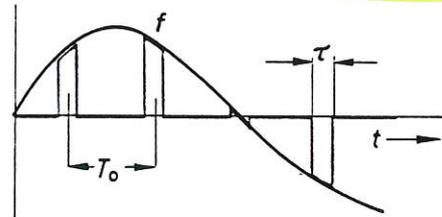


Bild 6.7 Pulsamplitudenmodulation PAM

τ = IMPULSBREITE
 T_0 = TAKTABSTAND

Das Abtasttheorem

Das Abtasttheorem besagt, daß eine kontinuierliche Funktion, z.B. eine Nachrichtenschwingung, in ihrem Verlauf eindeutig bestimmt ist, wenn aus einem vollen Sinusschwingungszug mindestens zwei diskrete Amplitudenwerte im Abstand T_0 bekannt sind (Bild 6.7). Man kann also eine Nachrichtenschwingung mit einer Impulsfolge abtasten, deren Frequenz F_0 mindestens zweimal so groß ist als die höchste im Nachrichten-Frequenzgemisch vorkommende Frequenz f_0 und daraus die Nachricht originalgetreu wiedergewinnen. Zum Wiedergewinnen der Nachricht aus der Impulsfolge ist es notwendig, alle im Frequenzspektrum der Impulse vorkommenden Frequen-

Auf der Grundlage des Abtasttheorems ist das **Zeitmultiplexverfahren** aufgebaut. Hierbei werden die Impulse verschiedener Nachrichtenquellen zeitlich hintereinander verschachtelt auf den gleichen Übertragungskanal gegeben und am Ende der Übertragungstrecke wieder voneinander getrennt. Die einer Nachrichtenquelle zugehörigen Impulse liegen im Abstand T_0 voneinander. Zwischen zwei so aufeinanderfolgenden Impulsen ist Platz für die Impulse anderer Nachrichtenquellen, die ebenfalls im Abstand T_0 liegen. Wieviele Impulse sich in diesem Platz unterbringen lassen, hängt ab von der Zeit T_0 und

τ = IMPULSBREITE
 T_0 = TAKTABSTAND

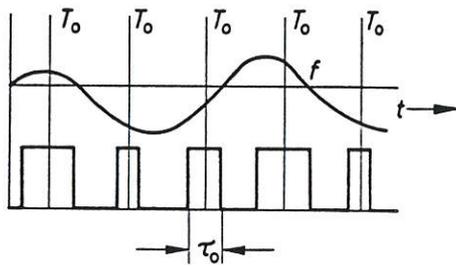


Bild 6.8 Pulsdauermodulation PDM

$\Delta\alpha$ = PHASENHUB
 α_0 = ZEITHUB

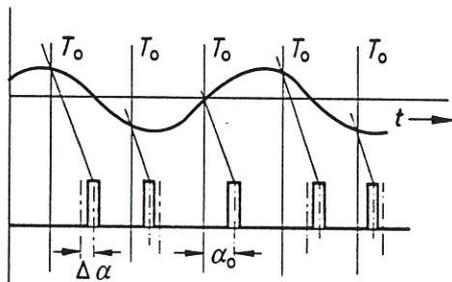


Bild 6.9 Pulsphasenmodulation PPM

von der Breite τ der einzelnen Impulse. Die Impulse der einzelnen Nachrichtenquellen werden in zeitlicher Folge auf den Kanal geschaltet und am Ausgang mit einem synchron zu diesem Schalter laufenden zweiten Schalter auf die jeweiligen Empfängerleitungen verteilt.

6.5.2. Pulsamplitudenmodulation

Hierbei wird die Amplitude der im gleichen Taktabstand T_0 aufeinanderfolgenden Impulse von der Modulationsspannung her beeinflusst (Bild 6.7). Die Amplitude der Impulse gibt ein getreues Bild der Amplitude der Modulationsspannung zum jeweiligen Zeitpunkt. Die minimale Häufigkeit der Impulse wird durch das Abtasttheorem begrenzt. Die Impulsbreite τ hängt vom Aufwand, den man treiben will, ab und ist nur bei Zeitmultiplexsystemen von wesentlichem Interesse. Allerdings sind die Amplituden des Frequenzspektrums des Impulses vom Verhältnis T_0/τ abhängig. Das Frequenzspektrum reicht beim Rechteckimpuls bis zu sehr vielen Seitenfrequenzen. Der modulierte Impuls hat links und rechts von F_0 Spektrallinien, die jeweils um $F_0 \pm nf$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) verschoben sind. Die F_0 direkt benachbarten Spektrallinien haben die halbe Amplitudenhöhe des Impulses und werden

nach dem Abtasttheorem alleine für die Rückgewinnung der Nachricht benötigt.

6.5.3. Pulsdauermodulation

Träger der Information ist hier die Dauer der Impulse. Je nach der Höhe der im Augenblick T_0 abgetasteten Modulationsspannung wird die Dauer (Länge) des Impulses ausgehend von einer mittleren Breite τ_0 nach größeren und kleineren Werten hin verändert (Bild 6.8). Als Bezugspunkt wird neben der Impulsmitte oft auch die Vorder- oder Hinterflanke verwendet. Das Spektrum des modulierten Impulses ist ähnlich breit wie bei PAM; auch hier werden zur Rückgewinnung der Nachricht nur die beiden F_0 direkt benachbarten Spektrallinien ausgenutzt.

6.5.4. Pulsphasen-(-frequenz-) Modulation

Überträgt man bei einem dauermodulierten Puls z.B. nur die Vorderflanken der Impulse als neue nadelfeine Impulse konstanter Dauer τ_0 , so liegt im Abstand des neuen Impulses von T_0 , also in seiner Phasenlage zu T_0 , die Nachricht. Entsprechend der Amplitude der abgetasteten Modulationsspannung schwankt die Phasenlage des neuen Impulses zu T_0 ; man hat eine **Pulsphasenmodulation** (Bild 6.9). Die größte zeitliche Verschiebung des Impulses von α_0 wird als **Zeithub** bezeichnet und kann maximal $T_0/2$ betragen, abzüglich eines Respektabstandes vom folgenden Impuls, um gegenseitige Störungen zu vermeiden. Im Zeitmultiplexverfahren ist der Zeithub um die Zahl der Kanäle kleiner. Der Zeithub ΔT hängt mit dem **Phasenhub** $\Delta\alpha$ der Impulsfrequenz F_0 nach der Beziehung $\Delta\alpha = \Omega_0 \Delta T$ zusammen. Das für die Wiedergewinnung der Nachricht nutzbare Spektrum des modulierten Impulses ist verzerrt, die PPM wird daher zur Demodulation in eine PAM oder PDM umgewandelt.

Pulsfrequenzmodulation ist eine Phasenmodulation mit Vorverzerrung abhängig von $1/\omega$, so daß der Phasenhub der Modulationsfrequenz f umgekehrt proportional ist.

6.5.5. Pulsmodulation

Tastet man aus einer Schwingung einer variablen Frequenz f_0 nach dem Abtasttheorem mit der Abtastfrequenz F_0 zu bestimmten Zeitpunkten die jeweils gerade anstehenden Amplitudenwerte

heraus, so können diese beliebige Werte zwischen 0 und einem Maximalwert haben. Bei der Pulscode-Modulation (PCM) wird nun diese unendlich hohe Zahl an Amplitudenwerten in eine endliche Zahl von Amplitudenstufen unterteilt (quantisiert) und jeder dieser Amplitudenstufen eine bestimmte Folge von Impulsen (Kode) zugeordnet. Um aus diesen Impulsfolgen den ursprünglichen Amplitudenwert genügend originalgetreu wiedergewinnen zu können, muß man eine Mindestzahl an Stufen (Quantisierungsschritten) vorsehen. Das PCM-System der Post zur Fernsprechübertragung verwendet hierfür z.B. $256 = 2^8$ Stufen für den Wert von negativer zu positiver Amplitudenspitze. Entsprechend setzt

Tafel 5.1. Gegenüberstellung von Dualkode und Graykode mit den zugehörigen Dezimalzahlen für 3 bit

Dezimalzahl	Dualkode	Graykode
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

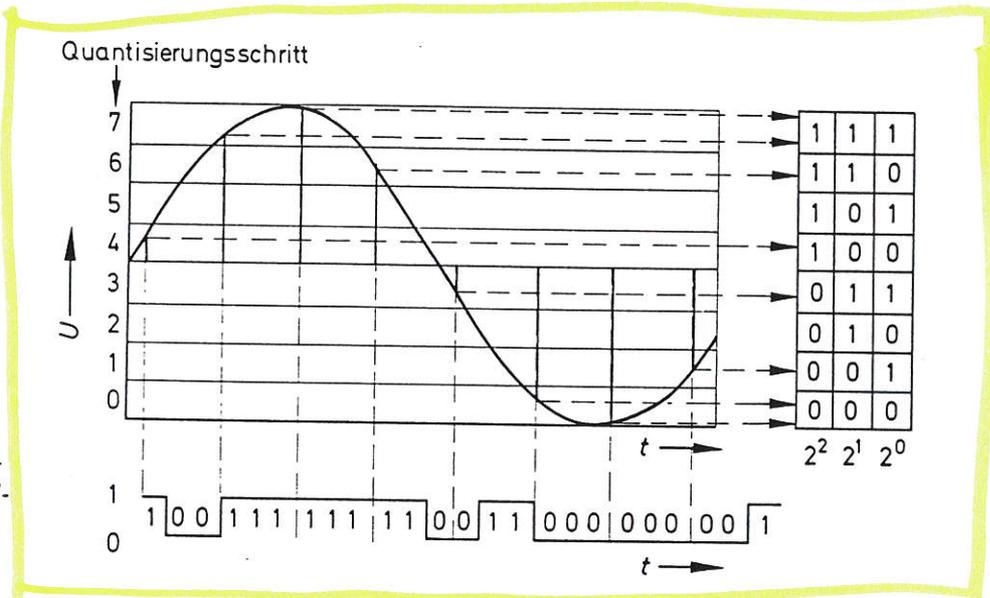


Bild 6.10 Schema der Quantisierung und Kodierung mit einem 3-bit-Dualkode

sich das **Kodewort** (Impulskombination) für eine bestimmte Amplitude aus der Kombination von 8 Impulsen zusammen (8-bit-Kode).

Bild 6.10 zeigt das Schema der Quantisierung vereinfacht am Beispiel eines 3-bit-Kode. Dargestellt ist der **Dualkode**, wegen seiner geringeren Fehlerwahrscheinlichkeit bei Störungen im Übertragungsweg wird jedoch der **Graykode** bevorzugt. Die Gegenüberstellung (mit 3 bit) zeigt Tafel 5.1. Der reine **Binärkode**, der nach Bild 6.11 nur die Zustände 0 und 1 kennt, hat verschiedene Nachteile, deren wichtigster ein mitzuübertragender Gleichstromanteil ist. Dies vermeidet man mit einem **pseudoternären Kode**, der die 1-Signale abwechselnd in positiver und negativer Richtung überträgt; man nennt diese Kodeform auch **AMI-Kode** (alternate mark inversion). Auch dieser Kode hat einen Nachteil; bei einer Folge von mehreren Nullen hintereinander fällt die aus den Bits abgeleitete Synchronisierung

außer Tritt. Man hilft sich hier mit einer künstlich dazwischengeschobenen 1, die der Empfänger als solche erkennen kann. Dieser beim PCM-30-System der Post verwendete Kode heißt **HDB-3-Kode** (high density bipolar).

Wie oben am Beispiel des PCM-Systems der Post dargestellt, sind für die Unterscheidung von 256 Quantisierungsstufen 8 bit nötig entsprechend

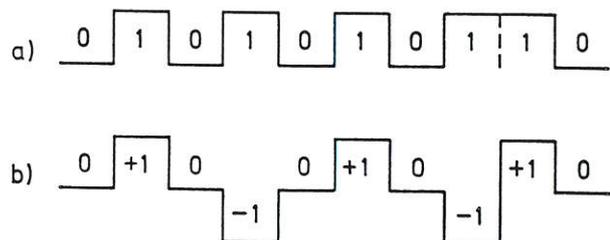


Bild 6.11 Reiner Binärkode (a) und pseudoternärer Kode (b)

der Beziehung $N = 2^n$, wobei N die Zahl der Stufen und n die Zahl der benötigten Bit darstellt. So lassen sich mit den 3 bit im Beispiel Bild 6.10 bis zu 8 Stufenwerte kodieren.

QUANTISIERUNGSGERÄUSCHEN
Aus dem praktisch immer vorhandenen Unterschied zwischen der Originalamplitude und der nächst passenden Quantisierungsstufe resultiert ein Übertragungsfehler, den man **Quantisierungsgeräusch** nennt. Um dieses Geräusch möglichst klein zu halten, muß die Zahl der Stufen so hoch wie möglich sein. Die dafür nötige Bit-Zahl ist aber durch die zur Verfügung stehende Bandbreite begrenzt. So ist die Bandbreite im PCM-30-System gegeben aus der Abtastfrequenz 8 kHz, der Bit-Zahl (= 8) pro abgetastetem Signal und der Zahl der übertragenen Kanäle (32) zu $8000 \times 8 \times 32 = 2,048$ MHz. Wie bei der PCM-Übertragungstechnik auf Seite 119 dargestellt, verringert man das Quantisierungsgeräusch, indem man zuerst mit 12 bit kodiert und die 12-bit-Worte anschließend zur Übertragung in 8-bit-Worte umwandelt.

Die **Kodierung** des abgetasteten Signalwertes wird über den Vergleich mit Normalquellen vorgenommen. Dafür gibt es drei Methoden. Bei der **Zählmethode** entspricht das Normal einem Quantisierungsschritt. Der Impulscode ergibt sich aus der binären Zählung der für die jeweilige Signalamplitude notwendigen Anzahl von Normalen. Bei der **Parallelmethode** gibt es für jede Quantisierungsstufe ein eigenes Vergleichsnormal. Alle Normale werden gleichzeitig an das Signal angelegt, wobei nur das passende Normal seine Kodekombination weitergeben kann. Die **Iterativ- oder Wägemethode** hat nur 8 Normale (beim 8-bit-Kode), deren Größe sich um den Faktor 2 unterscheidet. Mit dem Vergleich wird beim größten Normal begonnen. Ist das Signal kleiner, wird eine 0 ausgegeben und das nächste Normal angelegt. Ist das Signal größer, wird eine 1 ausgegeben. So entsteht die bit-Kombination in der richtigen zeitlichen Reihenfolge. Zur **Dekodierung** auf der Empfangsseite dienen die gleichen Methoden.

Modulationsprinzip

Die nullpunktsichere Verstärkung oder Umformung kleiner Meßsignale ist häufig in unerwünschter Weise durch vorhandene – teils extrem niederfrequente – Störsignale begrenzt. In erster Linie handelt es sich dabei um Temperaturdriften oder um Langzeitdriften aufgrund von Alterungseffekten. Durch geeignete Maßnahmen versucht man nun, die Nullpunktsicherheit zu gewährleisten. Bei

direkt gekoppelten Verstärkern sind z. B. als Maßnahmen üblich

- die Serienschaltung eines Widerstandes direkt am Plus-Eingang eines gegengekoppelten Operationsverstärkers, um damit den Einfluß der beiden Nullpunktfehlerströme auszugleichen,
- die Thermostatisierung oder die Temperaturkompensation der Eingangsstufe(n) bei Gleichgrößen-Verstärkern,
- der automatische Nullabgleich durch entsprechende Einstellung einer Nullpunktspannung. Dabei muß zyklisch der Eingang kurzgeschlossen oder bei fehlendem Eingangssignal mit einem definierten Widerstand beschaltet werden, um dann das Ausgangssignal auf Null abgleichen zu können.

Die letztgenannte Maßnahme liefert auch direkt das Rezept für den Aufbau nullpunktsicherer Gleichgrößenverstärker. Nach Bild 15.5 wird die Amplitude einer oft sinus- oder rechteckförmigen Trägerschwingung mit dem zu verstärkenden Meßsignal moduliert, dann mit einem a priori nullpunktsicheren Wechselspannungverstärker verstärkt und anschließend wieder vorzeichenrichtig gleichgerichtet (demoduliert).

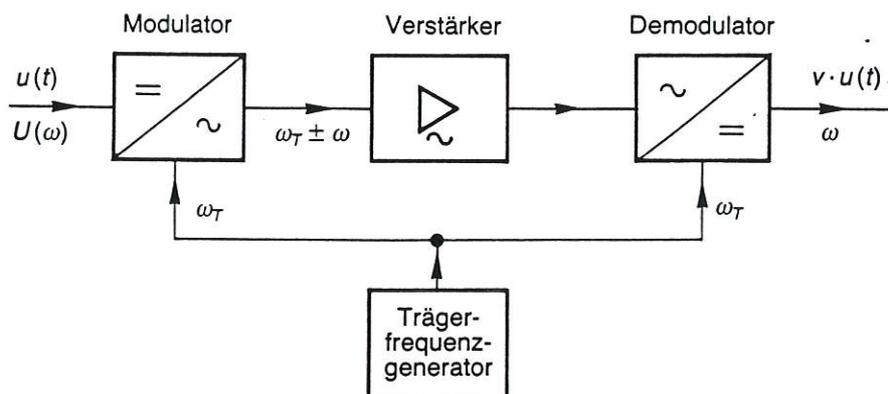


Bild 15.5. Modulationsprinzip.

Modulationsverstärker

Direktgekoppelte Gleichspannungsverstärker besitzen eine relativ hohe Nullpunktdrift, die vor allem bei der Verstärkung kleiner Signale erhebliche Meßfehler verursachen kann. Um diese Nullpunktdrift klein zu halten, verwendet man deshalb für die Verstärkung kleiner Signale Gleichspannungsverstärker nach dem Modulatorprinzip (Bild 196).

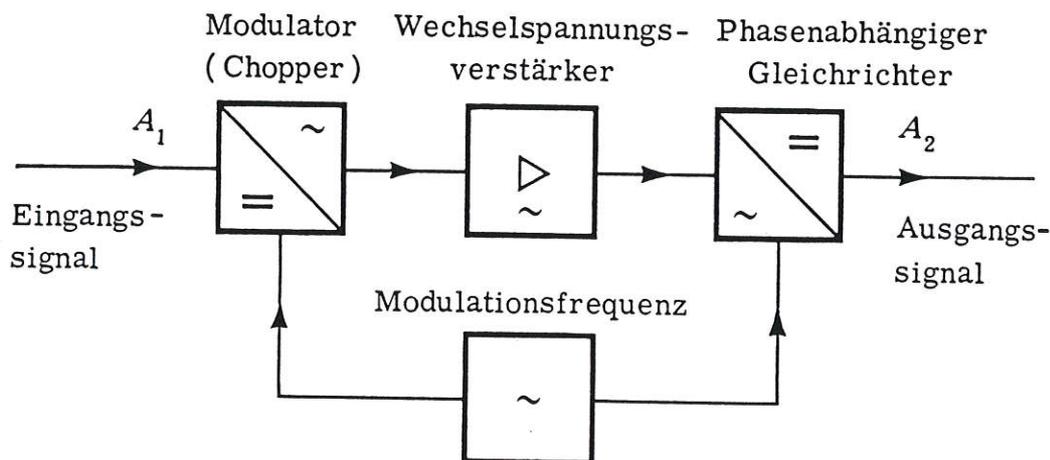


Bild 196 Blockschaltbild eines Modulatorverstärkers

Diese Modulationsverstärker nutzen die Driftfreiheit von Wechselspannungsverstärkern aus. Das Eingangssignal wird durch den Modulator (Chopper) in eine amplitudenmodulierte Wechselspannung umgeformt und in einem Wechselspannungsverstärker verstärkt. Anschließend gelangt das Signal auf den phasenabhängigen Gleichrichter, der von derselben Modulationsfrequenz gesteuert wird wie der Modulator. Auf diese Weise ist es möglich die Drift um mehrere Zehnerpotenzen herabzusetzen.

GLEICHSPANNUNGSMODULATION

Die Modulation des Gleichspannungssignals geschieht meist durch gesteuerte Widerstände, deren Größe im Takt der Modulationsfrequenz (Trägerfrequenz) verändert wird. Bei rechteckförmiger Modulation, die man z.B. durch einen Relaiskontakt erreichen kann, dessen Widerstand zwischen Null und Unendlich verändert wird, bezeichnet man den Modulator als Zerhacker oder Chopper.

Die höchste zulässige Frequenz des Meßsignals, die mit Modulationsverstärkern verarbeitet werden kann, hängt von der Modulationsfrequenz ab und darf im allgemeinen nicht mehr als 10% dieser Trägerfrequenz betragen.