

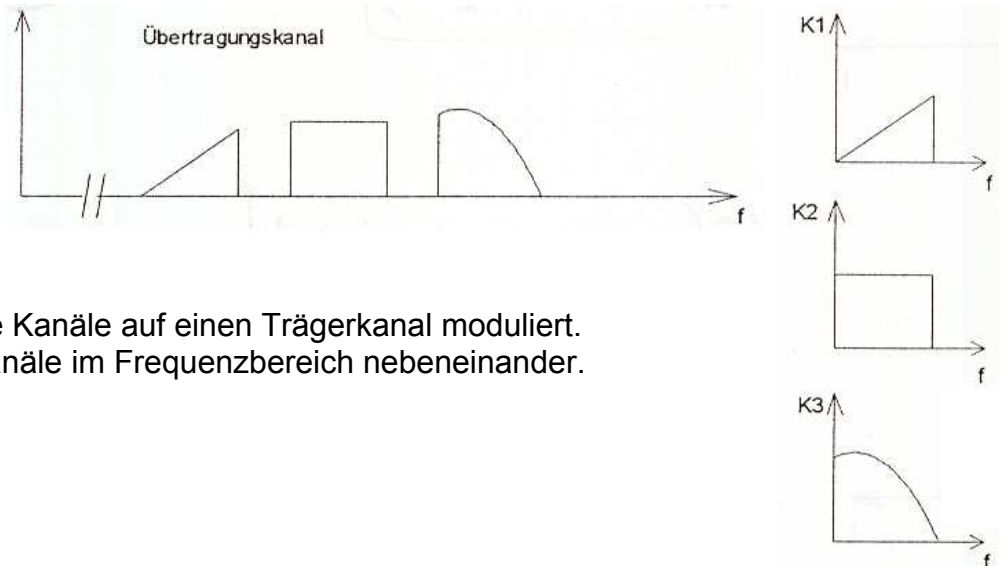
Inhaltsverzeichnis:

Thema	Unterpunkt	Seite
Modulation allgemein	Definition	7-2
	Frequenzmultiplex	7-2
	Zeitmultiplex	7-2
Übersicht Modulationsverfahren	Amplitudenmodulation (AM)	7-3
	Winkelmodulation (WM)	7-3
	Pluscodemodulation	7-3
Amplitudenmodulation (AM)	Kennlinien	7-4
	Schaltzeichen	7-4
	Momentanwert der Spannung	7-4
	Modulationsgrad	7-4
	Amplitudenspektrum	7-5
	Amplitudenspektrum bei <i>nicht sinusförmigen</i> Signalfrequenzen	7-5
Erzeugung von AM-Signalen	Prinzipschaltung	7-6
	Erklärung	7-6
	Modulation an einer Diode	7-7
Bandbreiten- und Leistungsbedarf von AM	Bandbreitenbedarf	7-7
	Leistungsbedarf	7-7
Demodulation von AM-Signalen	Definition	7-8
	Hüllkurven-Demodulator	7-8
Aufbau von AM-Empfängern	Geradeusempfänger	7-9
	Überlagerungsempfänger	7-9
	ZF-Frequenz	7-9
Störungen bei AM-Signalen	Störfrequenzen	7-10
	Trägerschwund	7-10
	Rauschen	7-10
Doppelseitenband-Modulation (DSB, ZSB)	Definition	7-10
Erzeugung von DSB-Signalen	Mit Bandsperre	7-10
	Mit gegenphasiger Trägeraddition	7-11
	Mit Ringmodulator	7-11
	Mit Produktmodulator	7-11
Demodulation von DSB-Signalen	Erklärung	7-12
Single-Seitenband-Modulation (ESB, SSB)	Definition	7-12
	Erzeugung	7-12
Winkelmodulation (WM)	Definition	7-13
	Unterscheidung PM und FM	7-13
	Berechnung	7-13
Frequenzmodulation (FM)	Definitionen	7-14
	Besselfunktion für FM	7-14
	Bsp. f. Frequenzspektrum	7-14
Phasenmodulation (PM)	Definitionen	7-15
	Besselfunktion für PM	7-15
	Bsp. f. Frequenzspektrum	7-15
Bandbreitenbedarf für WM-Signale	Berechnungen für FM	7-16
	Berechnungen für PM	7-16

Modulation allgemein:

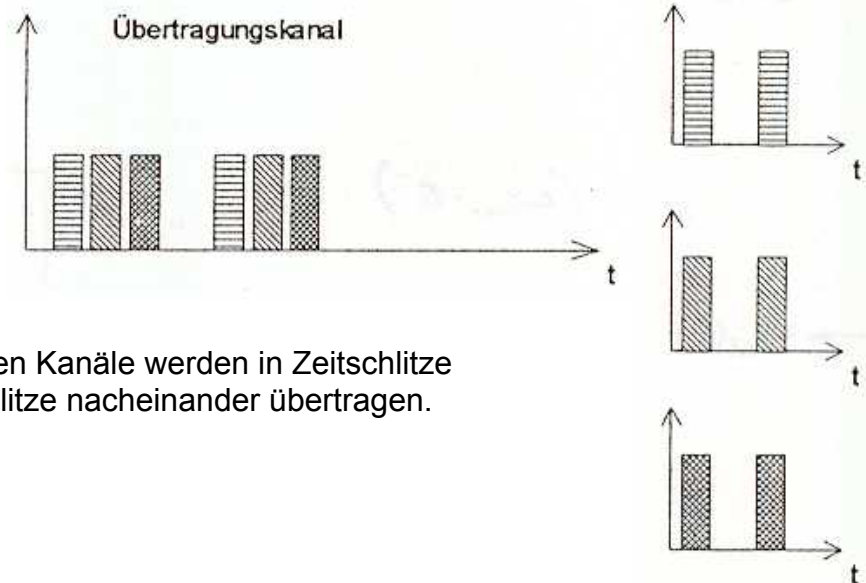
Bei der Nachrichtentechnik ist es vielfach erforderlich, die elektrischen Signale in ihren Parametern den Eigenschaften des Übertragungskanal anzupassen. Dazu wird eine Signalanpassung vorgenommen, die man als Modulation bezeichnet.

Die Modulation wird auch benutzt einen Übertragungskanal mehrfach nutzen zu können. Diese Mehrfachnutzung kann über ein Frequenzmultiplex-Verfahren oder über ein Zeitmultiplex-Verfahren realisiert werden.



Frequenzmultiplex:

Es werden mehrere Kanäle auf einen Trägerkanal moduliert. Dabei liegen die Kanäle im Frequenzbereich nebeneinander.



Zeitmultiplex:

Die einzelnen zu übertragenden Kanäle werden in Zeitschlitze aufgespalten und die Zeitschlitze nacheinander übertragen.

Übersicht Modulationsverfahren:

Das Frequenzmultiplex-Verfahren wird mit einem sinusförmigen Träger durchgeführt.

Unterscheidung:

Amplitudenmodulation (AM):

AM	Es wird der Träger und die beiden Seitenbänder übertragen
DSB (ZSB – Doppel-Seitenb.)	Es werden nur die beiden Seitenbänder übertragen
SSB (ESB – Single-Seitenb.)	Es wird nur ein Seitenband übertragen
RM (Rest-Seitenband)	Es wird nur ein Restseitenband übertragen

Winkelmodulation (WM):

FM (Frequenzmodulation)	Es wird die Frequenz des Trägers moduliert
PM (Phasenmodulation)	Es wird die Phasenlage zwischen Signal und Träger moduliert

Das Zeitmultiplex-Verfahren wird mit einem puls förmigen Träger durchgeführt.

Unterscheidung:

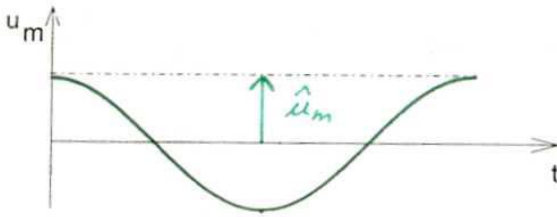
uncodiert:

PAM (Pulsamplitudenmodulation)	Es wird die Amplitudenhöhe des Pulses moduliert
PDM (Pulsdauermodulation)	Es wird die Pulsdauer moduliert
PPM (Pulsphasenmodulation)	Es wird die Phasenlage des Pulses moduliert

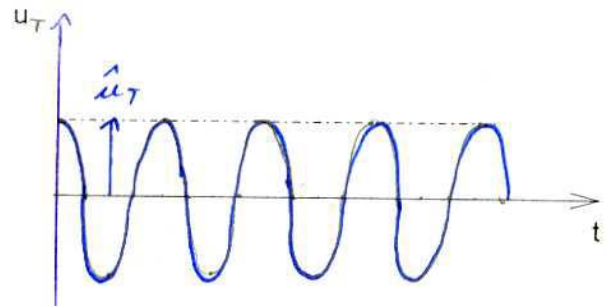
codiert und quantisiert :

PCM (Puls-Code-Modulation)	Es wird die Amplitudenhöhe des Pulses moduliert
----------------------------	---

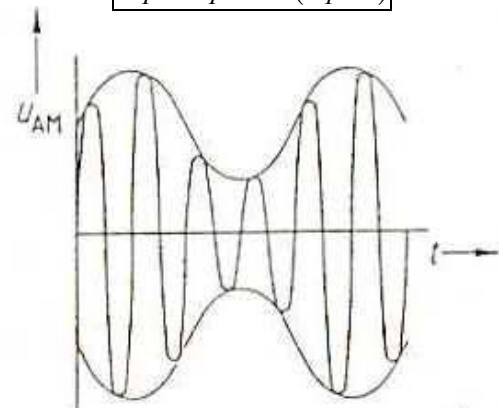
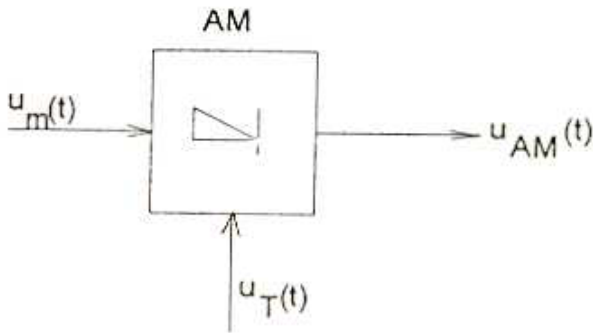
Amplitudenmodulation (AM) :



$$U_m = \hat{u}_m \cdot \cos(\omega_m \cdot t)$$



$$U_T = \hat{u}_T \cdot \cos(\omega_T \cdot t)$$



$$U_{AM} = [\hat{u}_T \cdot \cos(\omega_T \cdot t)] + \left[\frac{1}{2} \cdot \hat{u}_m \cdot \cos(\omega_T \cdot t - \omega_m \cdot t) \right] + \left[\frac{1}{2} \cdot \hat{u}_m \cdot \cos(\omega_T \cdot t + \omega_m \cdot t) \right] \quad \text{RAD !!!}$$

Träger

Unteres Seitenband

Oberes Seitenband

$$d = 2 \cdot (\hat{u}_T - \hat{u}_m)$$

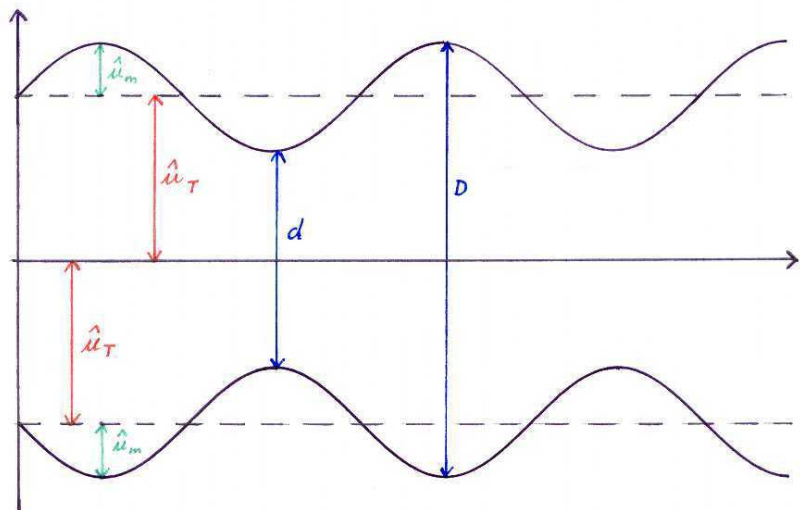
$$D = 2 \cdot (\hat{u}_T + \hat{u}_m)$$

$$m = \frac{\hat{u}_m}{\hat{u}_T}$$

$$m = \frac{D - d}{D + d}$$

Bei m=1 gilt:

$$\hat{u}_{SB} = \frac{\hat{u}_T}{2}$$



$$U_{AM} = [\hat{u}_T \cdot \cos(\omega_T \cdot t)] + \left[m \cdot \frac{\hat{u}_T}{2} \cdot \cos(\omega_T \cdot t - \omega_m \cdot t) \right] + \left[m \cdot \frac{\hat{u}_T}{2} \cdot \cos(\omega_T \cdot t + \omega_m \cdot t) \right] \quad \text{RAD !!!}$$

U_m, U_T, U_{AM} = Momentanwerte der Spannungen in V zum Zeitpunkt t

\hat{u}_m, \hat{u}_T = Amplituden der Spannungen in V

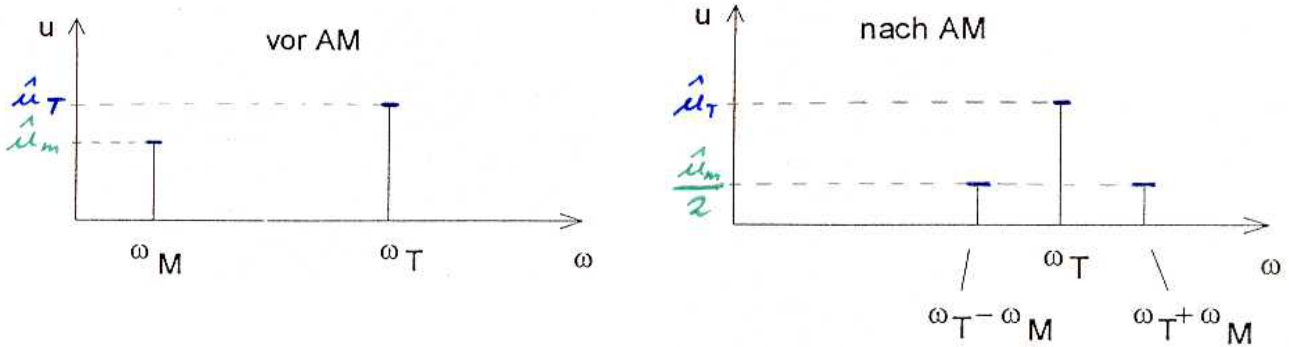
ω_m, ω_T = Kreisfrequenzen in $\frac{1}{s}$

m = Modulationsgrad (Für reproduzierbare Signale immer ≤ 1) (In der Praxis: $m=0,7=70\%$)

D = $\hat{u}_{AM \text{ ss max}}$ (max. Spitze-Spitze-Spannung von \hat{u}_{AM})

d = $\hat{u}_{AM \text{ ss min}}$ (min. Spitze-Spitze-Spannung von \hat{u}_{AM})

Amplitudenspektrum eines AM-Signals:



Vor der AM-Modulation ist im Frequenzspektrum nur die Trägerfrequenz f_T und die Signalfrequenz f_m bzw. die Signalfrequenzen (wenn f_m ein Mischsignale ist) vorhanden.

Nach der AM-Modulation ist die Trägerfrequenz f_T und die Frequenzen der beiden Seitenbänder $f_T - f_m$ bzw. $f_T + f_m$ vorhanden bzw. bei Mischsignalen der Frequenzbereich des Unteren Seitenbandes von $f_T - f_{m \max}$ bis $f_T - f_{m \min}$ und der Frequenzbereich des oberen Seitenbandes von $f_T + f_{m \min}$ bis $f_T + f_{m \max}$

Ist die Signalfrequenz kein Sinussignal, kommt die Fourier-Analyse zum Tragen.

Dreieck-Signal:

$k = 1, 3, 5, 7$ mit $a_k = \frac{8 \cdot h}{\pi^2 \cdot k^2}$, $h = \hat{u}_m \Rightarrow \hat{u}_{mk} = \frac{8 \cdot \hat{u}_m}{\pi^2 \cdot k^2}$ $f_{mk} = f_m \cdot k$

Rechteck-Signal:

$k = 1, 3, 5, 7$ mit $b_k = \frac{4 \cdot h}{\pi \cdot k}$, $h = \hat{u}_m \Rightarrow \hat{u}_{mk} = \frac{4 \cdot \hat{u}_m}{\pi \cdot k}$ $f_{mk} = f_m \cdot k$

Sägezahn-Signal:

$k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ mit $b_k = \frac{2 \cdot h}{\pi \cdot k}$, $h = \hat{u}_m \Rightarrow \hat{u}_{mk} = \frac{2 \cdot \hat{u}_m}{\pi \cdot k}$ $f_{mk} = f_m \cdot k$

$k =$ ganzzahliger Faktor

$\hat{u}_m =$ Amplitude der Signalfrequenz in V

$\hat{u}_{mk} =$ Amplitude der k -ten Oberwelle in V

$f_m =$ Signalfrequenz in Hz

$f_{mk} =$ Frequenz der k -ten Oberwelle in Hz

Im Frequenzspektrum werden die Oberwellen mit

- entsprechenden Abstand $f_T \pm f_{mk}$

- und halber Amplitude $\frac{\hat{u}_{mk}}{2}$

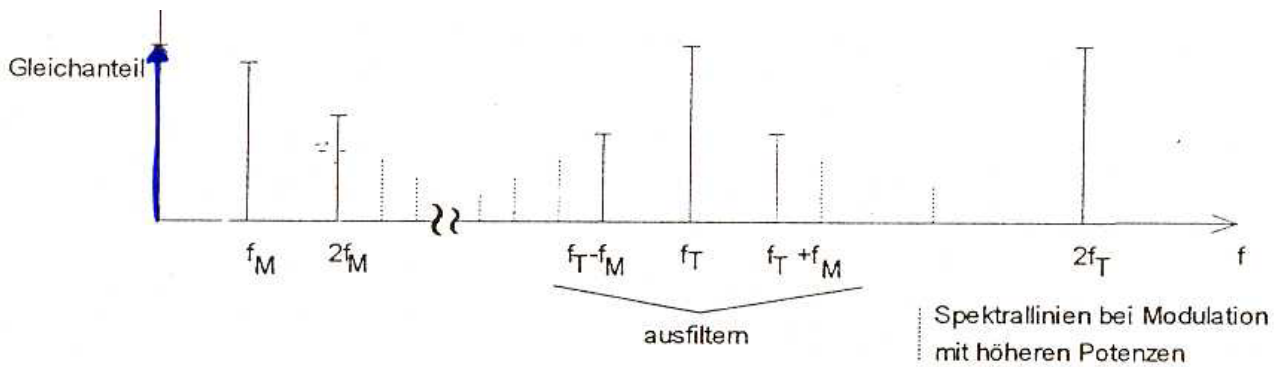
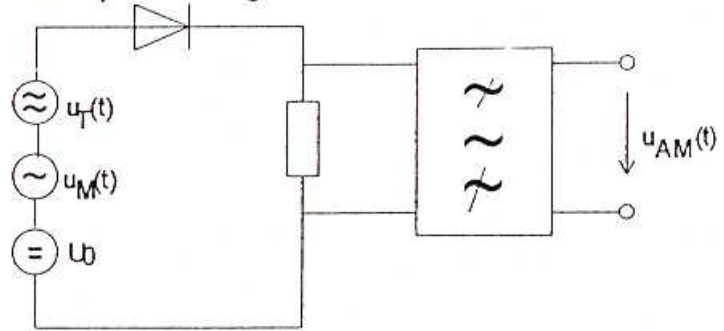
ingezeichnet.

Erzeugung von AM:

Um eine amplitudenmodulierte Spannung zu erzeugen, müssen die beteiligten Frequenzen an einem Bauteil mit nichtlinearer (am besten quadratischer) Kennlinie moduliert werden.

Bei der Modulation an einer nicht-linearen Kennlinie entstehen aber auch unerwünschte Frequenzen die mit einem Bandpass ausgefiltert werden müssen.

Prinzipschaltung:



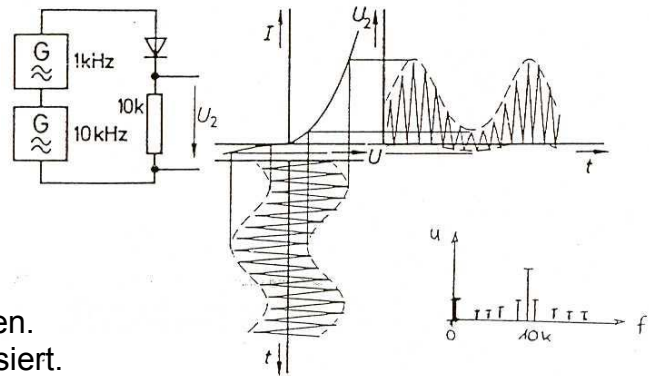
Wenn an einem Bauteil mit quadratischer Kennlinie moduliert wird entsteht ein breiteres Frequenzspektrum. Es besteht die Gefahr daß das gewünschte Frequenzspektrum von höheren Modulationsprodukten überlagert wird und es damit zu Verzerrungen kommt. Man spricht hier von Kreuzmodulation.

$\omega_M = \omega_m =$ Kreisfrequenz des Signals
 $u_M = u_m =$ Spannung des Signals
 $U_0 =$ Gleichspannungsanteil

$\omega_T =$ Kreisfrequenz des Trägers
 $u_T =$ Spannung des Trägers

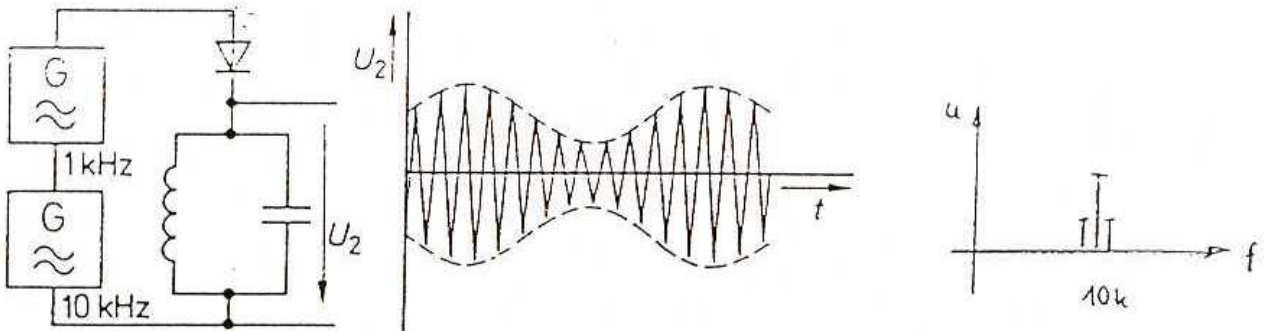
Erzeugung von AM durch Modulation an einer Diode:

Durch die Modulation an einer Diode entsteht ein sehr breites Frequenzspektrum, das noch mehr als die gewünschten Frequenzen enthält.



Die unerwünschten Frequenzen müssen noch mit einem Bandpass ausgefiltert werden. Die wird meist mit einem Schwingkreis realisiert.

Modulation mit einer Diode



Modulierte Spannung an einem Schwingkreis

Bandbreiten- und Leistungsbedarf eines AM-Signals:

Bandbreitenbedarf:

$$B = 2 \cdot f_{m \max}$$

B = Bandbreite in Hz

$f_{m \max}$ = max. Signalfrequenz in Hz

Leistungsbedarf:

$$P_{AM} = P_T + 2 \cdot P_{SB}$$

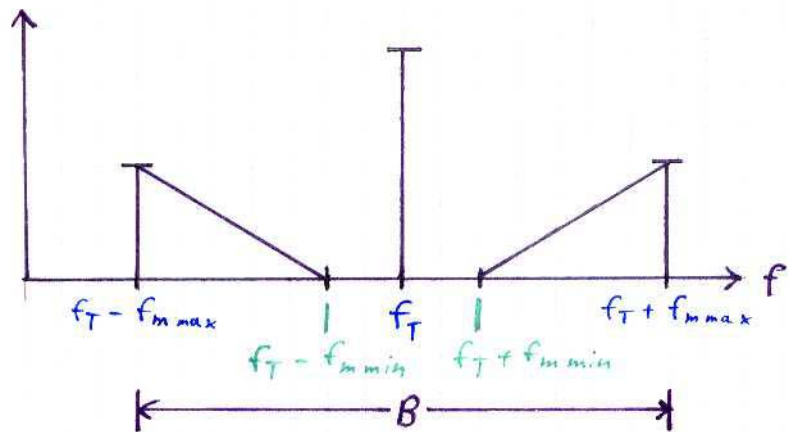
$$P_{AM} = \bar{P}_{AM}$$

$$P_{AM} = \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \cdot P_T$$

$$P_{SB} = \frac{m^2}{4} \cdot P_T$$

$$P_T = \frac{P_{AM}}{\left(1 + \frac{m^2}{2}\right)} = P_{AM} \cdot \frac{2}{2 + m^2}$$

$$P_{SB} = \frac{1}{2} \cdot P_{AM} \cdot \frac{m^2}{2 + m^2}$$



P_{AM} = Gesamtleistung des AM-Signals in W

\bar{P}_{AM} = Mittelwert (= Wirkleistung) des AM-Signals bei min. Signalfrequenz und 1 Periode

P_T = Leistung des Trägers in W

P_{SB} = Leistung **eines (!!!)** Seitenbandes in W

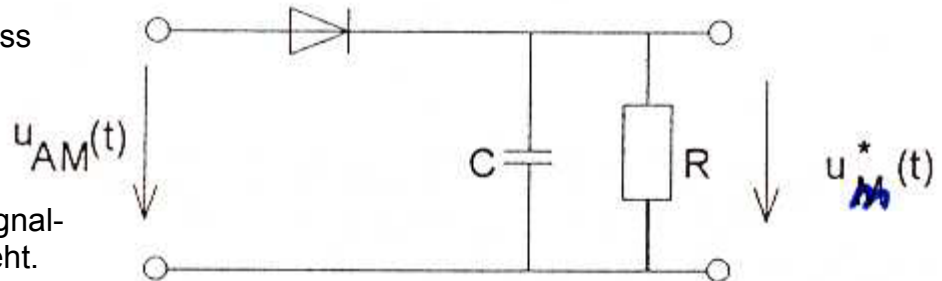
m = Modulationsgrad des AM-Signals (ohne Einheit !!!)

Demodulation eines AM-Signals:

Die Demodulation dient zur Rückgewinnung der Signalfrequenz aus dem modulierten AM-Signal. Dazu ist wiederum eine Frequenzumsetzung notwendig, die mit einer Amplitudenmodulation realisiert wird, jedoch mit vertauschten Frequenzkomponenten.

Die einfachste Schaltung zur Demodulation ist der Hüllkurven-Demodulator:

Dabei muß der RC-Tiefpass so bemessen sein, dass die Spannungen der Trägerhalbwellen geglättet werden, dabei aber die Amplitude der Signalfrequenz nicht verloren geht.



$$\tau = \sqrt{T_{m \max} \cdot T_T}$$

$$\tau = R \cdot C$$

Für sinnvolle Verwendung des Hüllkurven-Demodulators sollte folgendes erfüllt sein:

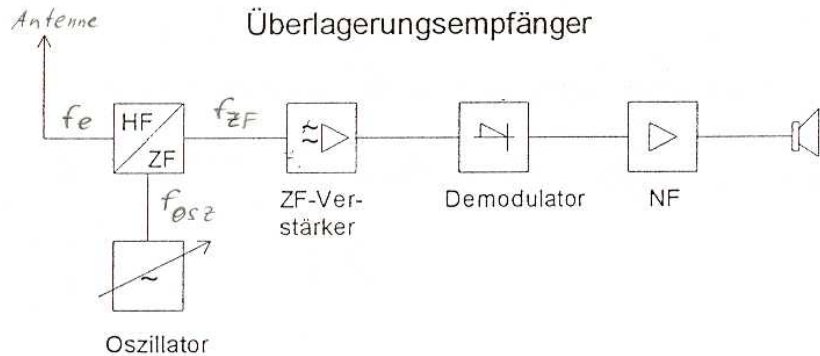
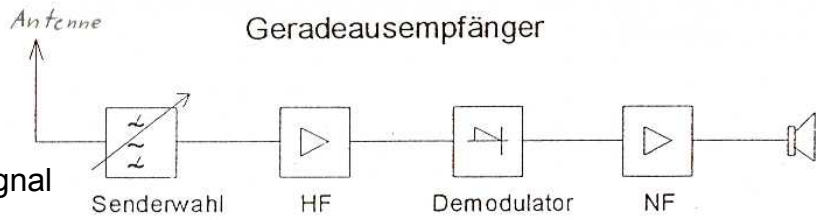
$$T_{m \max} > R \cdot C > T_T$$

- τ = Ladekonstante für das RC-Glied
- $T_{m \max}$ = max. Periodendauer des Signals in s
- T_T = Periodendauer des Trägers in s
- R = Widerstand in Ω
- C = Kapazität in F
- u_m^* = demodulierte NF-Signalspannung in V

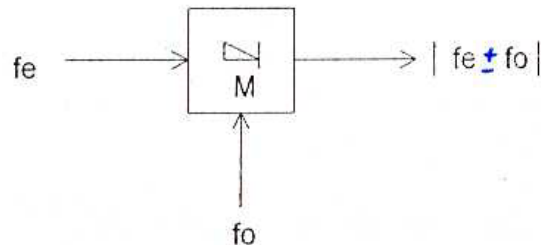
Im demodulierten Signal ist nicht nur das ursprüngliche NF-Signal vorhanden, sondern auch Störungen, die während der Übertragung aufgefangen wurden.

Aufbau von AM-Empfängern:

Gegenüber dem Geradeausempfänger hat der Überlagerungsempfänger den Vorteil, dass das hochfrequente AM-Signal auf eine feste Frequenz, der ZF-Frequenz (Zwischenfrequenz) umgesetzt wird. Dies vereinfacht die Verstärkung des Signals.



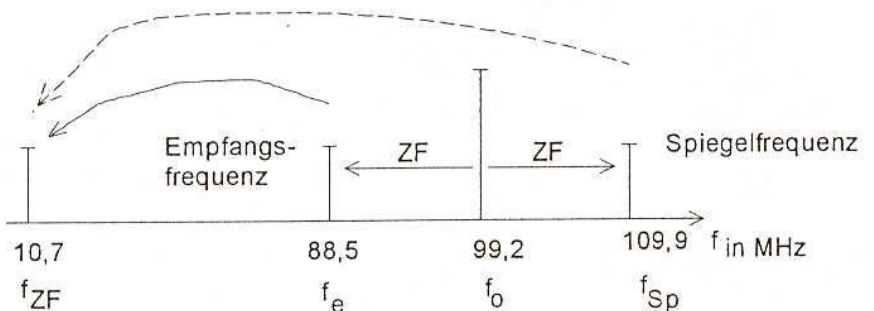
Zur Umsetzung der empfangenen Frequenz f_e wird diese mit der Frequenz eines einstellbaren Oszillators f_{OSZ} gemischt. Dadurch passiert die Frequenzumsetzung.



Es entstehen dabei zwei Mischfrequenzen:

$$f_e + f_{OSZ} \quad \text{und} \quad f_e - f_{OSZ}$$

Diese werden ZF-Frequenz und Spiegelfrequenz genannt.



Die Zwischenfrequenz ist **meist** auf 10,7 MHz genormt (auch Frequenznormal genannt). Daraus folgt:

$$f_{ZF} = f_{OSZ} - f_e \quad \quad f_{ZF} = f_{SP} - f_{OSZ}$$

Wenn $f_{OSZ} > f_e$ (Regelfall) dann gilt: $f_{SP} = f_e + 2 \cdot f_{ZF}$ sonst: $f_{SP} = f_e - 2 \cdot f_{ZF}$

Für den AM-Empfang stellen also f_e oder f_{SP} die Trägerfrequenz des zu empfangenden Signals dar.

- f_e = Empfangsfrequenz in Hz
- $f_o = f_{OSZ}$ = Oszillatorfrequenz in Hz
- f_{ZF} = Zwischenfrequenz in Hz (auch Frequenznormal) (meist 10,7 MHz)
- f_{SP} = Spiegelfrequenz in Hz

Störungen bei AM:Diskrete Störfrequenzen im Empfangsband:

$$SNR = m \cdot \frac{\hat{u}_{T0}}{\hat{u}_{ST}}$$

$$m = \frac{SNR \cdot \hat{u}_{ST}}{\hat{u}_{T0}}$$

$$\hat{u}_{ST} = m \cdot \frac{\hat{u}_{T0}}{SNR}$$

SNR = signal noise reduction

m = Modulationsgrad

 \hat{u}_{T0} = Amplitude der Trägerfrequenz \hat{u}_{ST} = Amplitude der Störfrequenz

Bei steigender Amplitude der Störfrequenz steigt auch m.

Trägerschwund:

Indem die Amplitude der Trägerfrequenz kleiner wird, fällt auch der Modulationsgrad m.

Rauschen:

$$P_R = 4 \cdot k \cdot T \cdot B \cdot F$$

k = Boltzmannkonstante ($1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}$)

T = Temperatur in Kelvin

B = Bandbreite in $\frac{1}{s}$ F = Empfängerrauschzahl **Ohne Einheit !!**Seitenbandunterdrückung:

Durch ein unscharfes Filter wird ein Seitenband in der Amplitude gekappt.

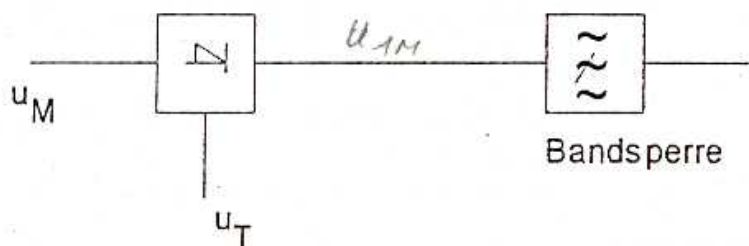
DSB-Modulation (Doppenseitenband-Modulation, ZSB-Modulation):

Da zur Übertragung der Trägerfrequenz ein Großteil der Sendeleistung benötigt wird, in der Trägerfrequenz aber keine Information übertragen wird, liegt es nahe auf die Übertragung des Trägers zu verzichten.

Mit $P_T = P_{AM} \cdot \frac{2}{2+m^2}$ und z.B. m=1 folgt daraus $P_T = P_{AM} \cdot \frac{2}{2+1^2} = P_{AM} \cdot \frac{2}{3}$ ⇒ P_T beträgt 66 % der Sendeleistung P_{AM} **Erzeugung eines DSB-Signals:*****Mit einer Bandsperre:***

Problem:

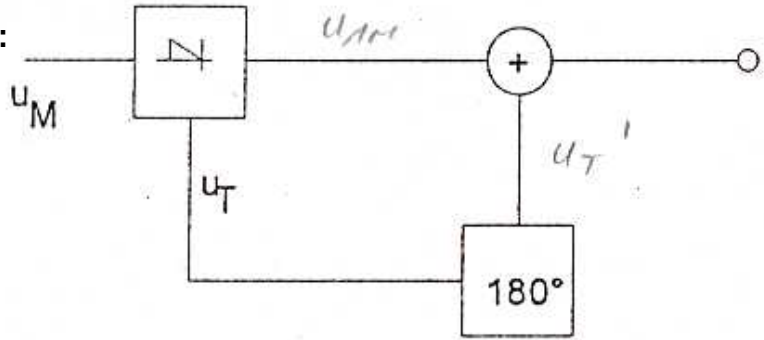
Die Bandsperre muss sehr schmalbandig sein, da die minimale Signalfrequenz sehr nahe an der Trägerfrequenz liegt. Dadurch entstehen leichte Verzerrungen.



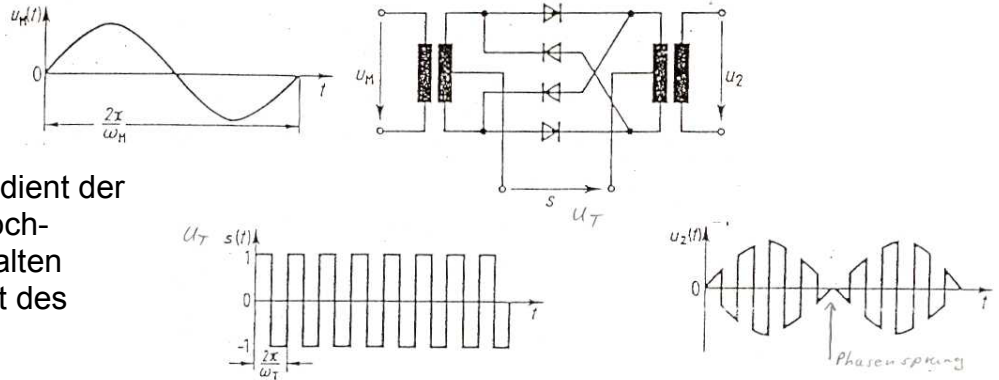
Fortsetzung Erzeugung eines DSB-Signals:

Mit gegenphasiger Trägeraddition:

Problem:
Bei sogenannter Endstufenmodulation nicht durchführbar.



Mit Ringmodulator:



Beim Ringmodulator dient der Träger u_T nur zum hochfrequenten durchschalten der Dioden und damit des NF-Signals u_m .

Charakteristisch für den Ringmodulator ist der Phasensprung des modulierten Ausgangssignals u_{AM} (hier u_2) beim Nulldurchgang des NF-Signals u_m

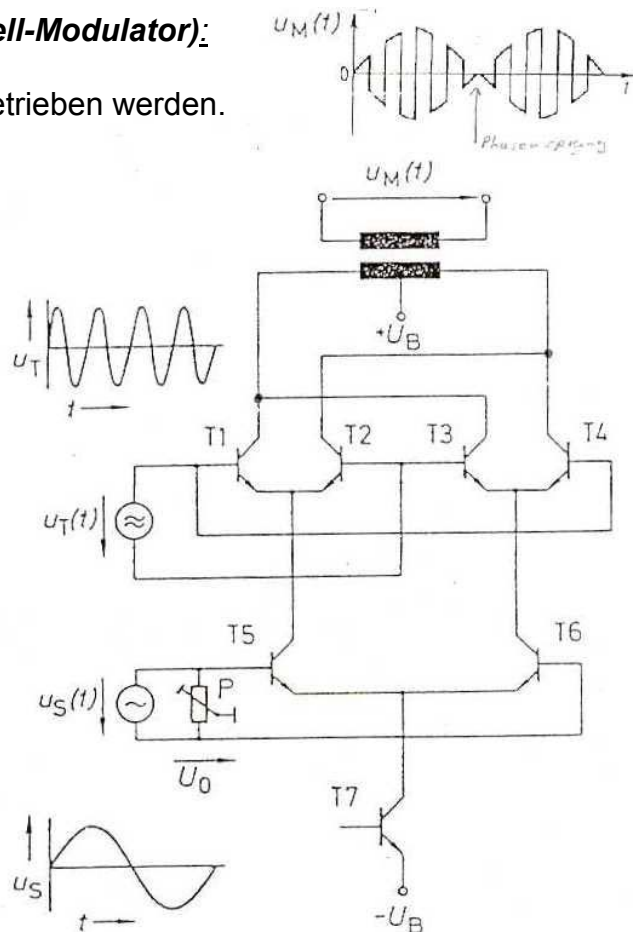
Mit dem Produktmodulator (z.B. Gilbert-Cell-Modulator):

Der Produktmodulator kann auf zwei Arten betrieben werden.

- mit kleiner Trägeramplitude (50 – 100 mV):
Im sogenannten **Analogbetrieb** wird durch die Trägeramplitude die Verstärkung der Transistoren T1 bis T4 verändert.
- mit großer Trägeramplitude (0,4 – 0,7 V)
Im sogenannten **Digitalbetrieb** arbeiten die Transistoren als Schalter

Der Träger dient auch hier nur zum hochfrequenten Durchschalten des NF-Signals u_s .

Das Poti P dient zur Einstellung der Symmetrie der Transistoren T5 und T6. Stellt man die Transistoren unsymmetrisch ein, so kann ein Teil des Trägersignales mit übertragen werden. Man spricht dann von einer DSB-Modulation mit Restträger.



Demodulation von DSB-Signalen:

Da der Träger nicht mehr im DSB-Signal vorhanden ist, kann kein Hüllkurvenmodulator eingesetzt werden.

Die Demodulation kann also nur mit der gleichen Schaltung wie die Modulation erreicht werden. Damit die Demodulation jedoch das ursprüngliche NF-Signal zurückliefert, muß am Demodulator der Träger mit ausreichender Amplitude, gleicher Frequenz und gleicher Phase wie bei der Modulation zugesetzt werden.

Dies erreicht man, indem man einen Restträger überträgt (Problem bei Trägerschwund) oder den Träger aus dem DSB-Signal rückgewinnt.

Anwendung von DSB:

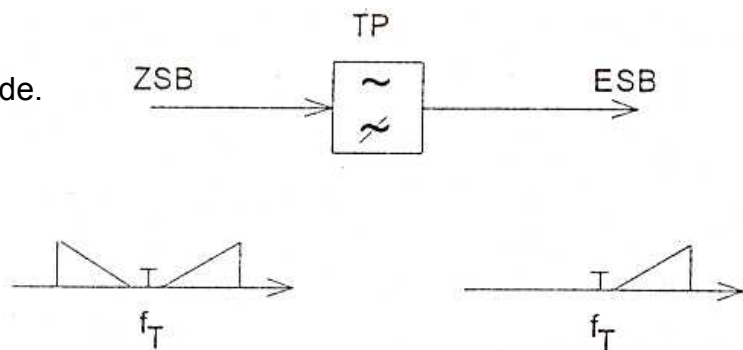
- Vorstufe zur ESB-Modulation
- UKW-Stereo-Betrieb
- Übertragung des Farbträgers bei NTSC- und PAL-Farbfernseh-Systemen

ESB-Modulation (Single-Seitenband-Modulation, SSB-Modulation):

Als einfachster Weg zur Erzeugung eines ESB-Signals gilt die Filtermethode.

Mit Hilfe des Tiefpasses wird aus dem DSB-Signal (=ZSB-Signal) das untere Seitenband ausgefiltert.

Für die korrekte Demodulation des ESB-Signales ist die Übertragung eines Restträgers im DSB-Signal notwendig.



Je nach Abstand der zu trennenden Frequenzen und der geforderten Unterdrückung des Seitenbandes muss ein entsprechend trennscharfer (=aufwendiger) Tiefpass verwendet werden.

Vorteil der ESB-Modulation:

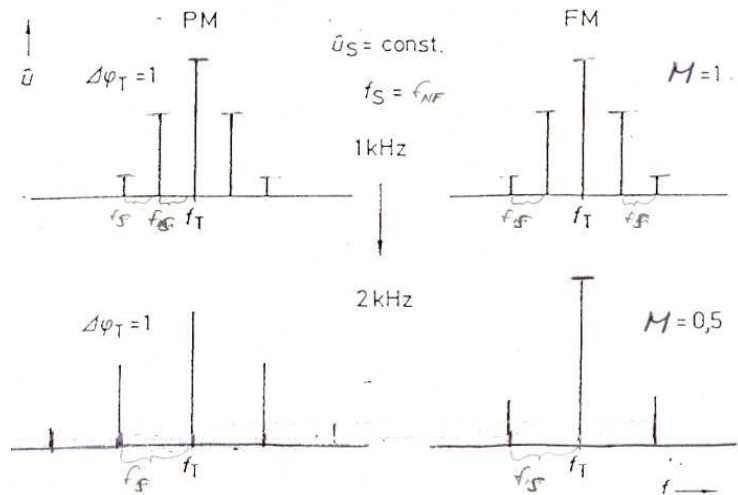
Es wird nur ca. die halbe Bandbreite als beim DSB-Signal benötigt. Auch wenn ein Teil der Sendeleistung durch die Aussiebung des Seitenbandes verloren geht, ist die ESB-Modulation dennoch wirtschaftlicher.

Winkelmodulation allgemein:

Das NF-Signal beeinflusst den Momentanwinkel der Trägerschwingung.
Dadurch ändert sich auch die Momentanfrequenz der Trägerschwingung.

Man unterscheidet die Winkelmodulation in Phasenmodulation (PM) und Frequenzmodulation (FM).

Eine Unterscheidung zwischen PM und FM ist erst möglich, wenn man die Frequenzspektren beider modulierten Signale bei verschiedenen Signalfrequenzen vergleicht.



Die Amplitude des Trägers ist immer konstant !!

Es gilt:

$$\hat{u}_m \uparrow \Rightarrow \Delta\varphi_T \uparrow$$

$$\hat{u}_m \downarrow \Rightarrow \Delta\varphi_T \downarrow$$

$$u_{WM}(t) = \hat{u}_T \cdot \cos[(\omega_T \cdot t) + \Delta\varphi_T \cdot \cos(\omega_m \cdot t)]$$

$$\Delta f_T = \Delta\varphi_T \cdot f_m$$

$$\Delta\varphi_T = \frac{\Delta f_T}{f_m}$$

$$M = \frac{\Delta f_T}{f_m}$$

$$f_{WM}(t) = f_T - [\Delta f_T \cdot \sin(\omega_m \cdot t)]$$

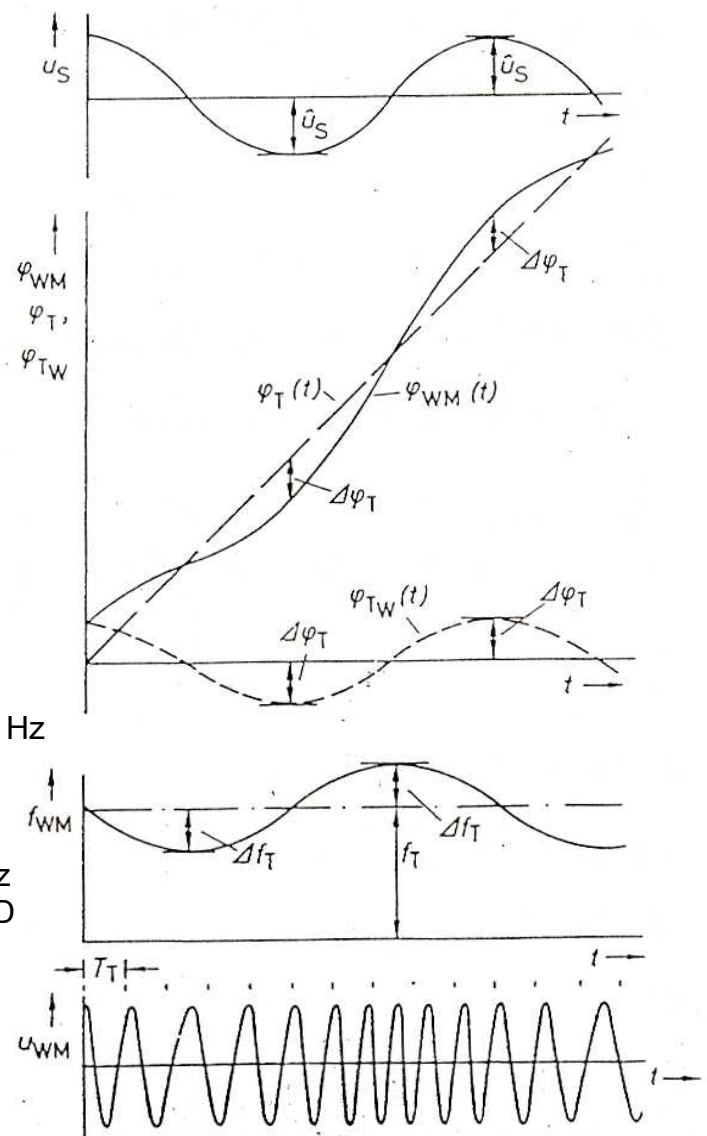
$$\varphi_{WM}(t) = (\omega_T \cdot t) + \Delta\varphi_T \cdot \cos(\omega_m \cdot t)$$

Taschenrechner auf RAD umstellen !!!

- \hat{u}_m = Amplitude des NF-Signales f_m in V
- \hat{u}_T = Amplitude des Trägersignales f_T in V
- Δf_T = Frequenzhub
- $\Delta\varphi_T$ = Phasenhub
- M = Modulationsindex
- f_m = NF-Signal (=zu modulierendes Signal) in Hz
- f_T = Trägerschwingung in Hz

- $u_{WM}(t)$ = Momentanwert des WM-Signals in V
- $f_{WM}(t)$ = Momentanfrequenz WM-Signals in Hz
- $\varphi_{WM}(t)$ = Momentanwinkel WM-Signals in RAD

$\Delta\varphi_T$ ist um 90° phasenverschoben zu Δf_T



Frequenzmodulation (FM):

Bei FM-Modulation ist:

- der Frequenzhub Δf_T unabhängig von der NF-Signalfrequenz f_m ($= f_s$)
- der Modulationsindex M abhängig von f_m

$$u_{FM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(M) \cdot \cos[(\omega_T \cdot t) + (M \cdot n \cdot \omega_m \cdot t)]$$

$u_{FM}(t)$ = Momentanwert des FM-Signals in V

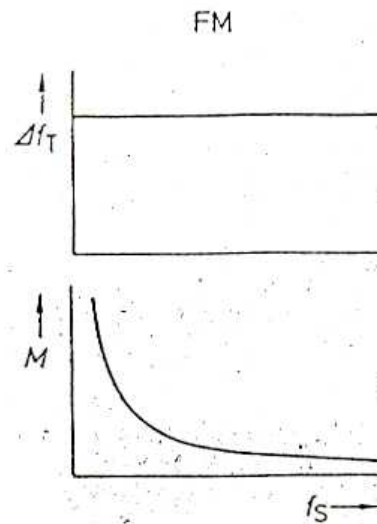
\hat{u}_T = Amplitude der Trägerschwingung

$J_n(M)$ = Besselfunktionswert des Index n in Abhängigkeit von M

M = Modulationsindex

n = Index des Seitenbandes

($n=0 \Rightarrow$ normierte Trägeramplitude, $n>0 \Rightarrow$ normierte Seitenband-Amplituden)

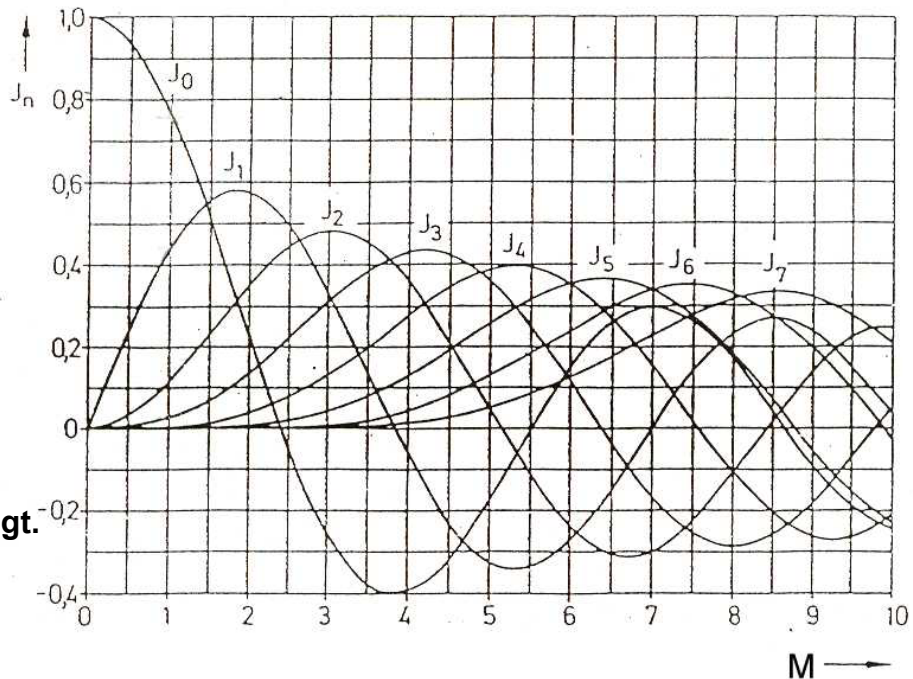


Kennlinie der Besselfunktion für FM:

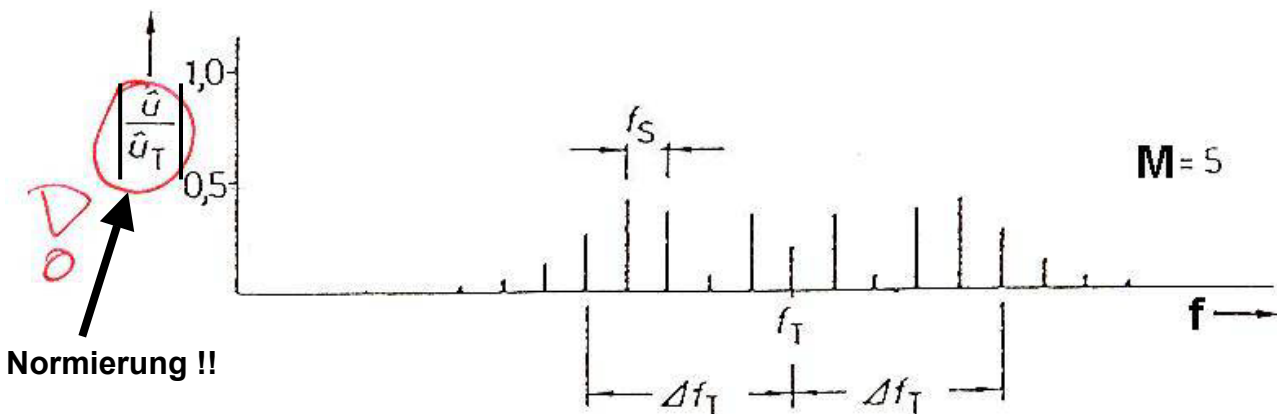
Die aus dem Diagramm ermittelten Werte beziehen sich auf die Trägeramplitude \hat{u}_T . (= normiert auf \hat{u}_T)

Daher ist es wichtig, im Frequenzspektrum an der y-Achse die Normierung zu kennzeichnen, indem man den Betrag von \hat{u} zu \hat{u}_T

$\frac{\hat{u}}{\hat{u}_T}$ an der Achse anträgt.



Frequenzspektrum eines FM-Signals bei M=5:

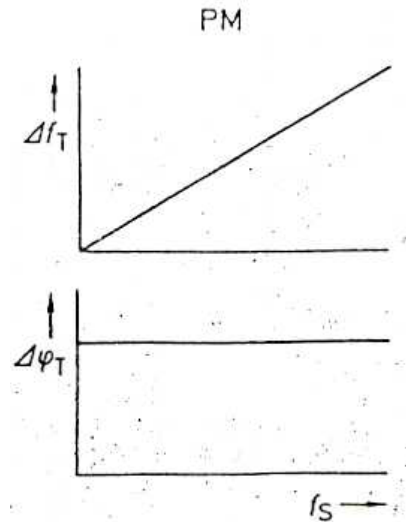


Phasenmodulation (PM):

Bei PM-Modulation ist:

- der Frequenzhub Δf_T abhängig von der NF-Signalfrequenz $f_m (= f_s)$
- der Phasenhub $\Delta\phi_T$ unabhängig von f_m

$$u_{PM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(\Delta\phi_T) \cdot \cos[(\omega_T \cdot t) + (\Delta\phi_T \cdot n \cdot \omega_m \cdot t)]$$



$u_{PM}(t)$ = Momentanwert des PM-Signals in V

\hat{u}_T = Amplitude der Trägerschwingung

$J_n(\Delta\phi_T)$ = Besselfunktionswert des Index n in Abhängigkeit von $\Delta\phi_T$

$\Delta\phi_T$ = Phasenhub

n = Index des Seitenbandes

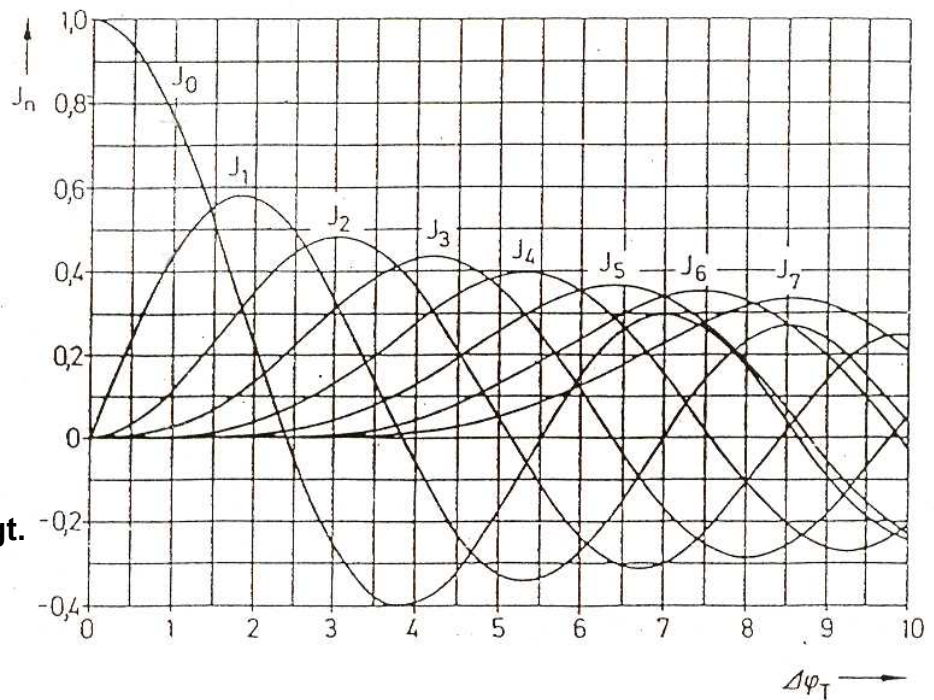
(n=0 \Rightarrow normierte Trägeramplitude, n>0 \Rightarrow normierte Seitenband-Amplituden)

Kennlinie der Besselfunktion für PM:

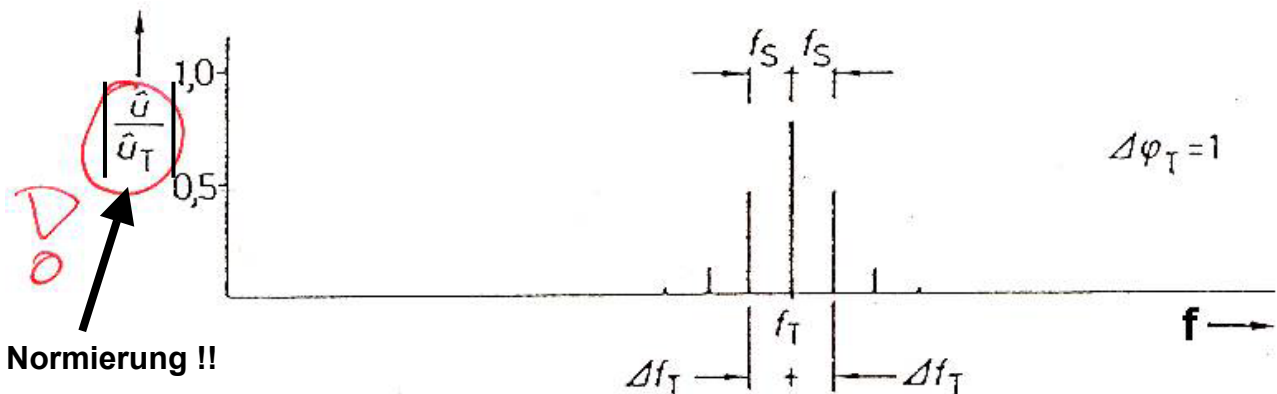
Die aus dem Diagramm ermittelten Werte beziehen sich auf die Trägeramplitude \hat{u}_T . (= normiert auf \hat{u}_T)

Daher ist es wichtig, im Frequenzspektrum an der y-Achse die Normierung zu kennzeichnen, indem man den Betrag von \hat{u} zu \hat{u}_T

$\frac{\hat{u}}{\hat{u}_T}$ an der Achse anträgt.



Frequenzspektrum eines PM-Signals bei $\Delta\phi_T = 1$:



Bandbreitenbedarf von WM-Signalen:

FM	PM
<p>Für Klirrfaktor < 10%</p> $B_{FM} = 2 \cdot f_{m \max} \cdot (M + 1)$ $f_{m \max} = \frac{B_{FM}}{2 \cdot (M + 1)}$ $M = \frac{B_{FM}}{2 \cdot f_{m \max}} - 1$ <p>mit $\Delta f_T = M \cdot f_{m \max} \Rightarrow \Delta f_T = \frac{B_{FM}}{2} - f_{m \max}$</p>	<p>Für Klirrfaktor < 10%</p> $B_{PM} = 2 \cdot f_{m \max} \cdot (\Delta \varphi_T + 1)$ $f_{m \max} = \frac{B_{PM}}{2 \cdot (\Delta \varphi_T + 1)}$ $\Delta \varphi_T = \frac{B_{PM}}{2 \cdot f_{m \max}} - 1$ <p>mit $\Delta f_T = \Delta \varphi_T \cdot f_{m \max} \Rightarrow \Delta f_T = \frac{B_{PM}}{2} - f_{m \max}$</p>
<p>Für Klirrfaktor < 1%</p> $B_{FM} = 2 \cdot f_{m \max} \cdot (M + 2)$ $f_{m \max} = \frac{B_{FM}}{2 \cdot (M + 2)}$ $M = \frac{B_{FM}}{2 \cdot f_{m \max}} - 2$ $\Delta f_T = \frac{B_{FM}}{2} - 2 \cdot f_{m \max}$	<p>Für Klirrfaktor < 1%</p> $B_{PM} = 2 \cdot f_{m \max} \cdot (\Delta \varphi_T + 2)$ $f_{m \max} = \frac{B_{PM}}{2 \cdot (\Delta \varphi_T + 2)}$ $\Delta \varphi_T = \frac{B_{PM}}{2 \cdot f_{m \max}} - 2$ $\Delta f_T = \frac{B_{PM}}{2} - 2 \cdot f_{m \max}$
<p>Anzahl der Seitenbänder:</p> $n = \frac{B_{FM}}{2 \cdot f_{m \max}}$	<p>Anzahl der Seitenbänder:</p> $n = \frac{B_{PM}}{2 \cdot f_{m \max}}$

B_{FM} = Bandbreite eines FM-Signals in Hz
M = Modulationsindex

B_{PM} = Bandbreite eines PM-Signals in Hz
 $\Delta \varphi_T$ = Phasenhub

Δf_T = Frequenzhub

$f_{m \max}$ = maximale Signalfrequenz in Hz

n = ganzzahlige Anzahl der Seitenbänder (bei $n = 2,4 \Rightarrow n = 2$)