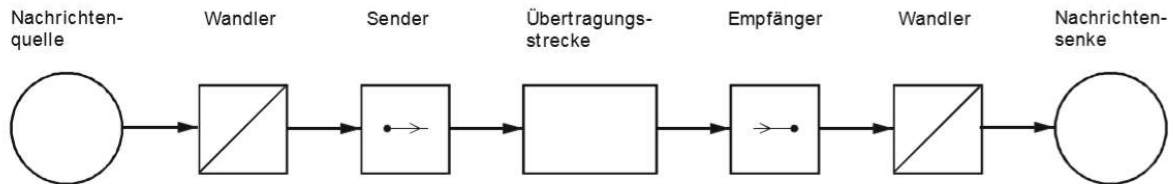


# LICHTWELLENLEITER (LWL)

## Allgemeine Übertragung:



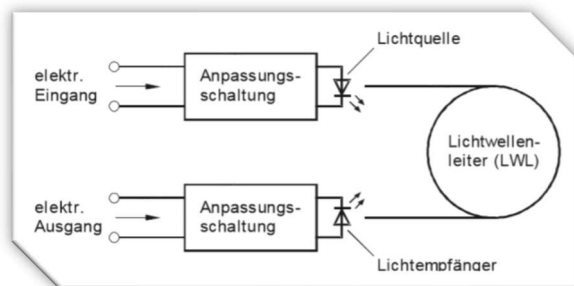
Für die **optische** Übertragung muss das **elektrische** Signal zuerst in ein **optisches** umgewandelt werden. Beim Empfänger wird es anschließend wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt.

**Simplex:** Nur in **eine** Richtung

**Halbduplex:** In beide Richtungen, jedoch **nicht gleichzeitig**

**Duplex:** In beide Richtungen, **gleichzeitig**

## Optisches Übertragungssystem:



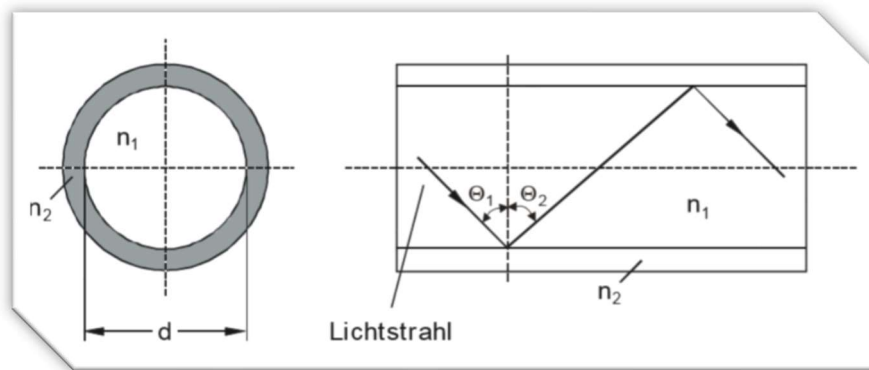
### Frequenzbereich und Streckenlänge sind abhängig von:

- **Eigenschaften** des Lichtwellenleiters
- Der **Leistung** und **Modulierbarkeit** (Frequenzverhalten) des Senders
- Die **Empfindlichkeit** des Empfängers

### Vorteile:

- Geringe Dämpfung
- Große Bandbreite
- Galvanische Trennung
- Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Störungen
- Kleine Kabeldurchmesser und geringes Gewicht
- Höhere Abhörsicherheit
- Kein Nebensprechen

### Innerer Aufbau:



**$n_1$** : Lichtdurchlässiges Material

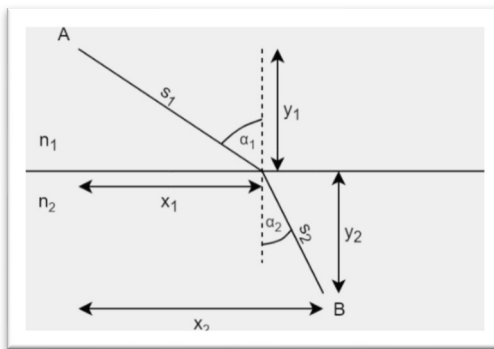
**$n_2$** : Mantel

**$\Theta_1$** : Einfallswinkel

**$\Theta_2$** : Ausfallswinkel

**Einfallswinkel** darf bestimmten Wert **nicht unterschreiten**, ansonsten **nicht reflektiert**, sondern nur **gebrochen** abhängig von  $n_1$  und  $n_2$ .

**Licht** sucht sich immer den **kürzesten Weg**!



$$t(x_1) = t_1(x_1) + t_2(x_1) = \frac{s_1(x_1)}{c_1} + \frac{s_2(x_1)}{c_2}$$

$$t(x_1) = \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + y_2^2}}{c_2}$$

Zeit-Minimum!

$$t'(x_1) = \frac{2x_1}{c_1 2\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} + \frac{-2(x_2 - x_1)}{c_2 2\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + y_2^2}} = 0$$

$$\frac{x_1}{c_1 \sqrt{x_1^2 + y_1^2}} + \frac{x_1 - x_2}{c_2 \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + y_2^2}} = 0$$

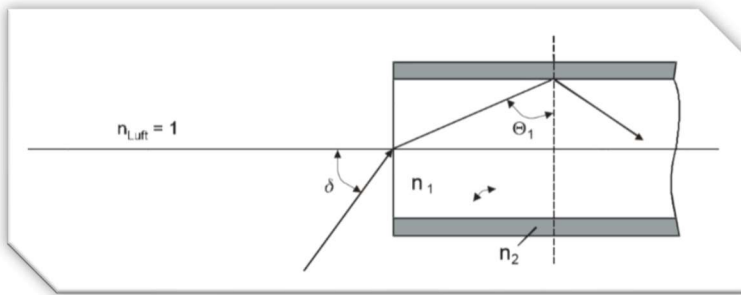
$$\frac{x_1}{c_1 \sqrt{x_1^2 + y_1^2}} = \frac{x_2 - x_1}{c_2 \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + y_2^2}}$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{c_1} = \frac{\sin \alpha_2}{c_2} \rightarrow \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$c_1 = \frac{c_0}{n_1} \quad c_2 = \frac{c_0}{n_2}$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\frac{c_0}{n_1}}{\frac{c_0}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

### Grenzwinkel und numerische Apertur:



$\Theta_g$ : **Grenzwinkel** für die **Totalreflektion**, abhängig von  $n_1$  und  $n_2$

$\delta_A$ : **Akzeptanzwinkel** damit **Totalreflektion** stattfindet, abhängig von  $n_1$  und  $n_2$

$$\sin(\Theta_g) = \frac{n_2}{n_1}, \text{ Sinus des max. Winkels, damit Totalreflektion stattfindet}$$

$$n_0 \sin(\delta_{max}) = n_1 \sin(90 - \Theta_1)$$

$$n_0 \sin(\delta_{max}) = n_1 \cos(\Theta_1)$$

$$n_0 \sin(\delta_{max}) = n_1 \sqrt{1 - \sin^2(\Theta_1)}$$

$$n_0 \sin(\delta_{max}) = n_1 \sqrt{1 - \sin^2(\sin^{-1}(\frac{n_2}{n_1}))}$$

$$n_0 \sin(\delta_{max}) = n_1 \sqrt{1 - (\frac{n_2}{n_1})^2} = n_1 \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}}$$

$$n_0 \sin(\delta_{max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad n_0 \text{ bei Luft} = 1$$

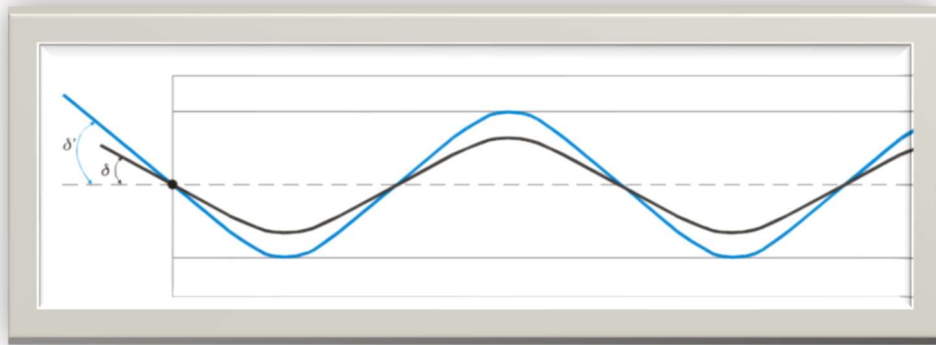
$$\text{numerische Apertur NA} = \sin(\delta_{max}) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \text{ Sinus des max. Einkoppelungswinkel}$$

### Mode: Ausbreitungsweg für Licht

- **Mehrmodfasern (Multimodfasern):** Mehrere Moden
- **Einmodfasern (Singlemodfasern):** Eine Mode

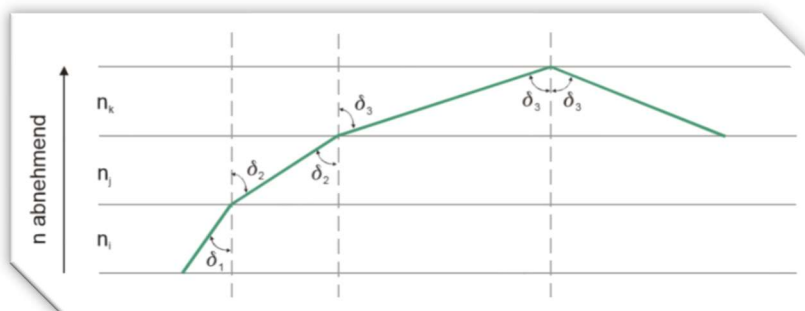
## Indexfasern und Indexprofile:

### Gradientenindexfasern



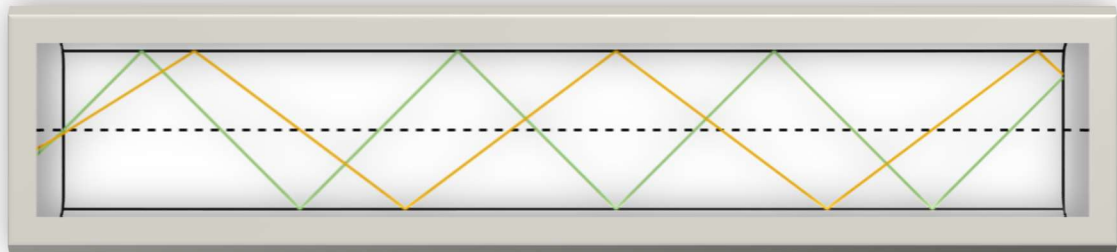
Keine Laufzeitunterschiede bei Multimodefasern

### Gradientenindexprofil



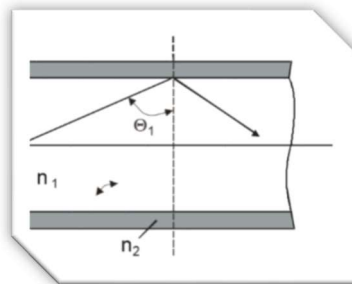
Sinusförmig

## Stufenindexfasern

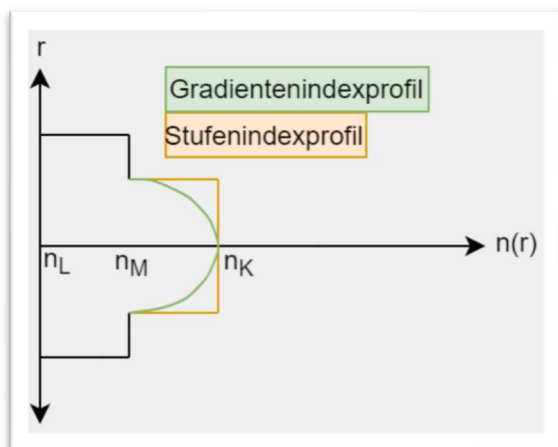


**Laufzeitunterschiede** bei Multimodefasern

## Stufenindexprofil



**Stufenförmig**

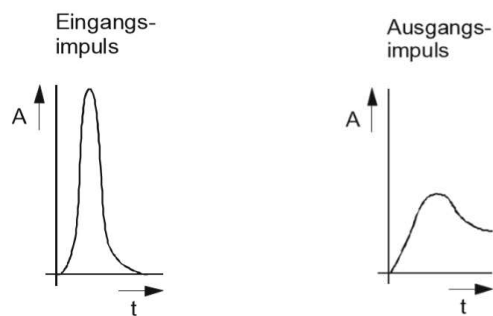


**Brechungsindex** abhängig von der **Entfernung** zu der **Mitte** des **Kernes** bei **Gradienten-** und **Stufenindexprofil**.

### Liste der Fasern:

Fasertyp	Bezeichnung	Kerndurchmesser
Kunststofffaser	APF (All Plastic Fibre) oder POF (Plastic Optical Fibre)	250 $\mu\text{m}$ ... 980 $\mu\text{m}$
Glas-Kunststofffaser	PCS (Plastic Coated Silicon) Glas-Kunststofffaser mit weichem Mantel	200 $\mu\text{m}$
Glas-Kunststofffaser	HCS (Hard Clad Silicon) Glas-Kunststofffaser mit hartem Mantel	50 $\mu\text{m}$ ... 600 $\mu\text{m}$
Glasfaser	SIF (Step Index Fibre) Stufenindexfaser	10 $\mu\text{m}$ ... 200 $\mu\text{m}$
Glasfaser	GIF (Gradient Index Fibre) Gradientenindexfaser	50 $\mu\text{m}$ ... 100 $\mu\text{m}$
Glasfaser	SMF (Single Mode Fibre) Einmodenfaser	5 $\mu\text{m}$ ... 12 $\mu\text{m}$

### Dispersion: Effekte die zur Impulsverbreiterung führen



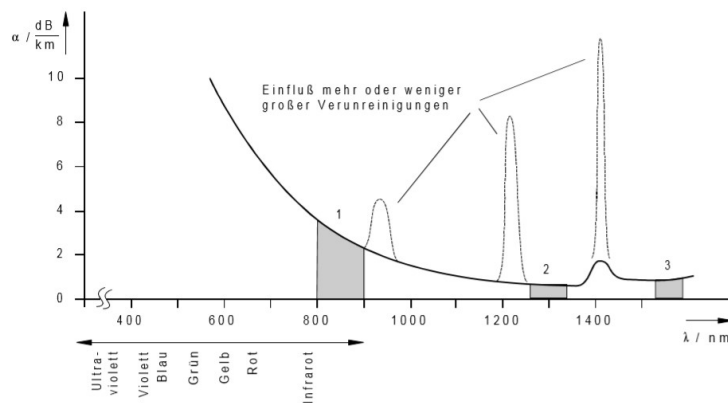
#### **Modendispersion**

Multimodefasern mit Stufenindexprofil führen zu Laufzeitunterschieden, aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Leiter.

#### **Chromatische Dispersion**

Unterschiedliche Geschwindigkeiten der Wellenlängen führen ebenso zu einer Impulsverbreiterung  
→ schränkt Übertragungsreichweite ein! Chromatische Dispersion deswegen, weil sie von der Wellenlänge (Farbe) abhängig ist. Gering, wenn nur eine Wellenlänge ausgestrahlt wird und diese ungefähr 1300nm beträgt.

## Dämpfung:



### Wird hauptsächlich verursacht durch

- **Streueffekte** von Inhomogenitäten im Material (Rayleigh-Streuung)
- **Absorptionsverluste** der Strahlung durch Verunreinigung des Quarzmaterials, durch z.B. Wasser (OH-Absorption)
- Es kann auch durch Krümmung zu Verlusten kommen, deshalb muss der max. **Biegeradius** eingehalten werden (Datenblatt).

## Sendeelemente:

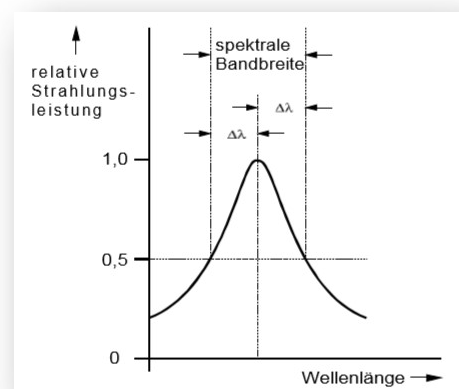
### LED

Frequenzgemisch, bis zu 30MHz

### Laserdiode

Gebündeltes Licht, monochromatisch, nur eine Wellenlänge

Bei **Monomodefasern** muss eine **Laserdiode** verwendet werden, außerdem hat sie eine größere Strahlungsleistung



### Empfangselemente:

#### Fototransistor

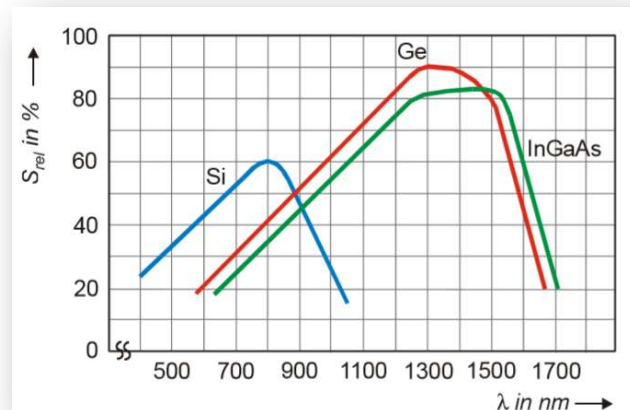
**Große Anstiegs- und Abfallzeiten**, nur für langsame niederfrequente Vorgänge

#### PIN-Fotodiode

I...**Intrinsic**-Zone, Weite Raumladungszone und somit **niedrige Kapazität** → schnelle **Schaltzeiten**, detektieren auch **schwache** Lichtstärken gut

Empfangsdiode muss im **Wellenbereich** der **Senderdiode** liegen, vom Halbleitermaterial abhängig.

Maß ist die Spektrale Empfindlichkeit ( $S_{rel}$ ):



### Beispiel:

Die Kernbrechzahl eines LWL beträgt 1,55, die des Mantels 1,51. Der Kerndurchmesser beträgt 50  $\mu\text{m}$ . Der LWL wird bei einer Wellenlänge von 0,8  $\mu\text{m}$  betrieben.

Gesucht:  $c$  in Kern ( $c_1$ );  $\Theta_g$ ; NA;  $\Theta_{max}$ ; Vorteile gegenüber Kupfer-Leiter

$$c_1 = \frac{c}{n_1} = \frac{299\,792}{1,51} = 193\,414 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$\Theta_g = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{1,51}{1,55}\right) = 76,95^\circ$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,55^2 - 1,51^2} = 0,35$$

$$\Theta_{max} = \sin^{-1}(NA) = \sin^{-1}(0,3498 \dots) = 20,48^\circ$$

Größere Bandbreite, weniger Dämpfung, größere Kanal-Kapazität, keine ohmschen-Verluste, Gewicht

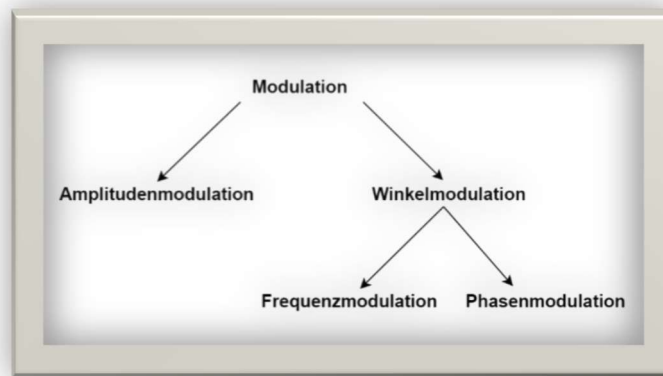


# MODULATION

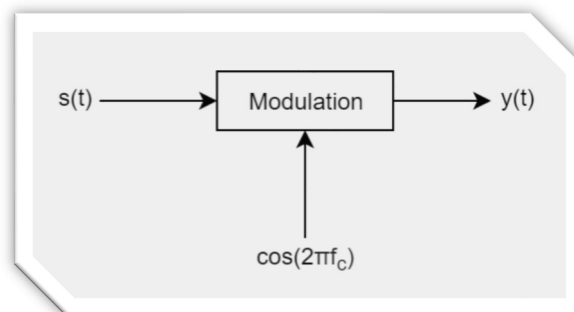
## Warum?

Passt das Signal an den Übertragungskanal an

## Arten der Modulation:



## Allgemeine Funktion:



$$y(t) = a(t)\cos(2\pi f_c t + \varphi(t))$$

# AMPLITUDENMODULATION

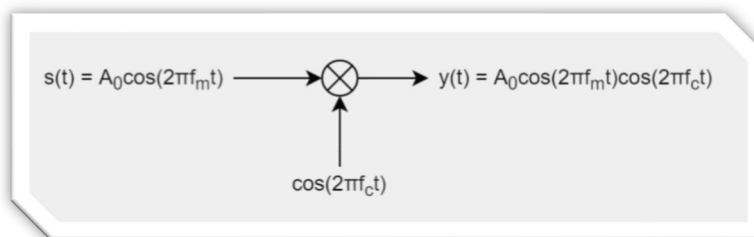
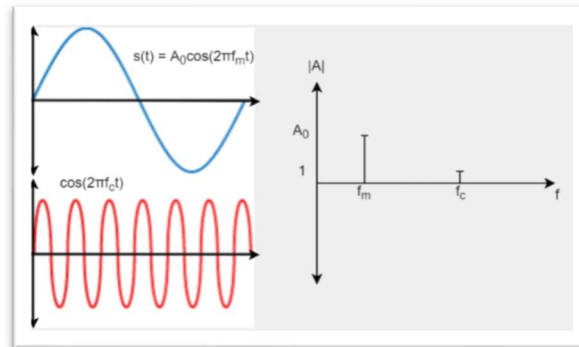
## Funktion:

$$a(t) = f\{s(t)\}$$

$$\varphi(t) = \varphi_0$$

Die Amplitude des Ausgangssignals ist abhängig von der Amplitude des Eingangssignals

## AM ohne Träger:



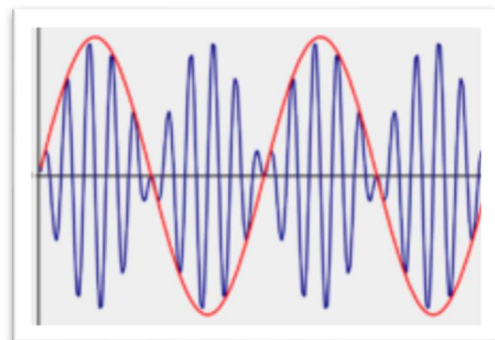
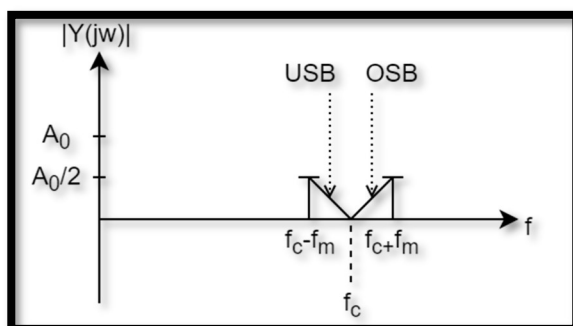
$$y(t) = A_0 \cos(2\pi f_m t) \cos(2\pi f_c t)$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) - \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) + \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

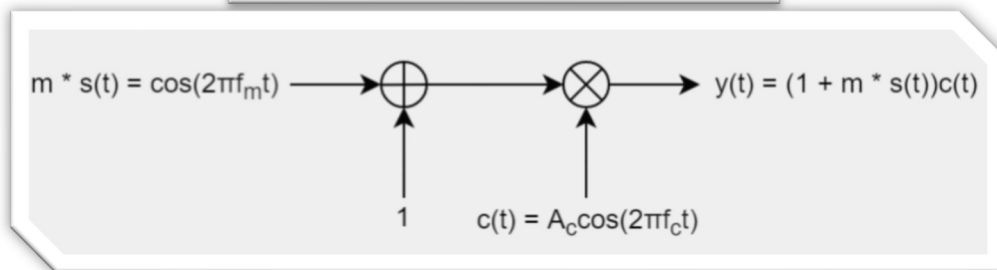
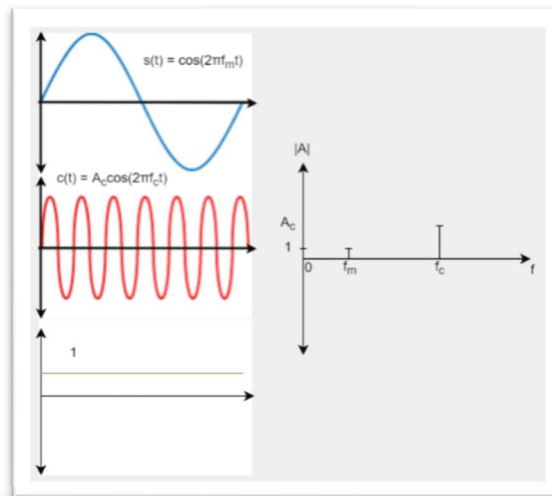
$$\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta) = 2\cos(\alpha) \cos(\beta)$$

$$y(t) = \frac{A_0}{2} \{ \cos[2\pi(f_c - f_m)t] + \cos[2\pi(f_c + f_m)t] \}$$



Amplitudenmodulation mit unterdrücktem Träger

## AM mit Träger:



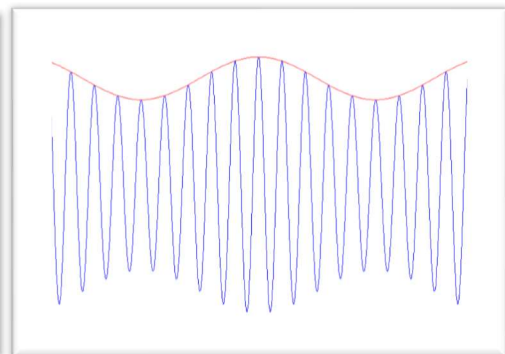
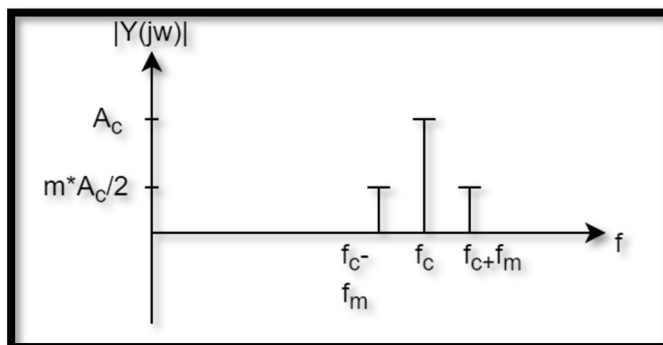
$$y(t) = (1 + m * s(t))c(t)$$

$$y(t) = (1 + m * \cos(2\pi f_m t))A_c \cos(2\pi f_c t)$$

$$y(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + A_c * m * \cos(2\pi f_m t) * \cos(2\pi f_c t)$$

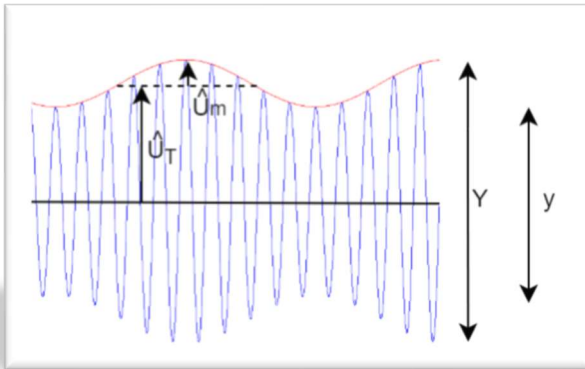
Träger ist präsent!

$$y(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) + \frac{A_c * m}{2} \{ \cos[2\pi(f_c - f_m)t] + \cos[2\pi(f_c + f_m)t] \}$$



Amplitudenmodulation mit Träger

### Kenngrößen:



### Modulationsgrad

$$m = \frac{Y - y}{Y + y}, \text{ Stärke der Modulations, falls größer als 1} \rightarrow \text{Übersteuerung}$$

### Spannungen

$$U_{Am,max} = \frac{Y}{2} \quad U_{Am,min} = \frac{y}{2}$$

$$\hat{U}_M = \frac{U_{Am,max} - U_{Am,min}}{2} = \frac{Y - y}{4}, \text{ Amplitude des Modulationssignals}$$

$$\hat{U}_T = \frac{U_{Am,max} + U_{Am,min}}{2} = \frac{Y + y}{4}, \text{ Amplitude des Trägersignals}$$

### Leistungen, am Widerstand R

$$P_c = \frac{\hat{U}_T^2}{2R}, \text{ Leistung des Trägers}$$

$$P_{SB} = \frac{\hat{U}_m^2}{8R}, \text{ Leistung eines Seitenbandes}$$

$$P_M = 2P_{SB} = 2 \frac{\hat{U}_m^2}{8R} = \frac{\hat{U}_m^2}{4R}, \text{ Leistung des Modulationssignals} - 2 \text{ Seitenbänder}$$

$$P_{AM} = P_c \left( 1 + \frac{m^2}{2} \right), \text{ mittlere Leistung der AM}$$

$$PEP = P_c (1 + m)^2, \text{ max. Leistung der Einhüllenden}$$

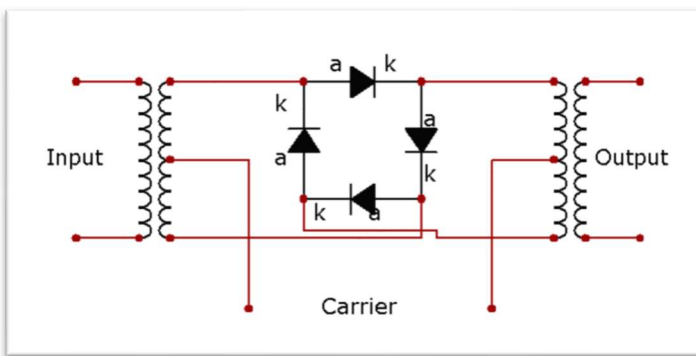
### Frequenzen

$$f_{OSB} = f_T + f_M, \text{ Frequenz des oberen Seitenbandes}$$

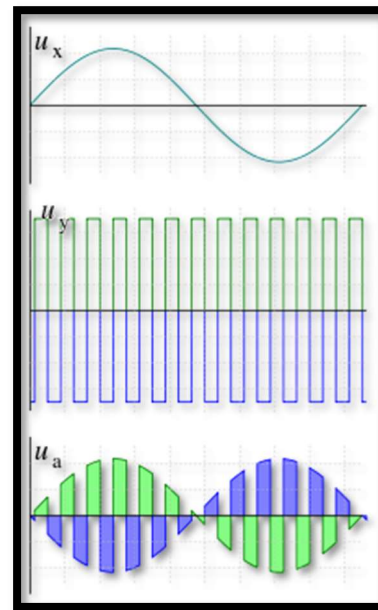
$$f_{USB} = f_T - f_M, \text{ Frequenz des unteren Seitenbandes}$$

$$B = f_{OSB} - f_{USB} = 2f_m, \text{ Bandbreite}$$

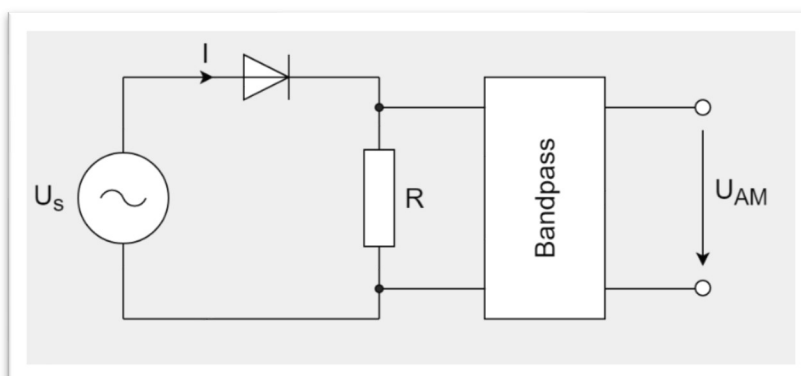
### Ringmodulator:



Der Ringmodulator multipliziert die Input- und Carrierspannung miteinander. Die Spannung am Carrier legt fest, welche Dioden leiten. Dadurch wird die Spannung am Input entweder normal weitergegeben oder negiert. Voraussetzung dafür ist, dass die Carrierspannung deutlich höher als die Modulationsspannung ist.



### Diodenmodulator:



$$U_R = I * R$$

$$I = I_0 \left( e^{\frac{U}{mU_T}} - 1 \right)$$

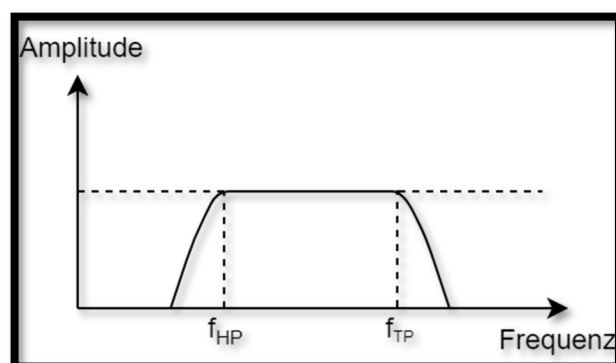
$$I \sim e^{\frac{U}{k}} - 1$$

$e^{\frac{U}{k}} - 1 = \frac{U}{k} + \frac{1}{2!} \left( \frac{U}{k} \right)^2 + \frac{1}{3!} \left( \frac{U}{k} \right)^3 \dots \rightarrow$  Strom ist proportional zum Quadrat der Spannung

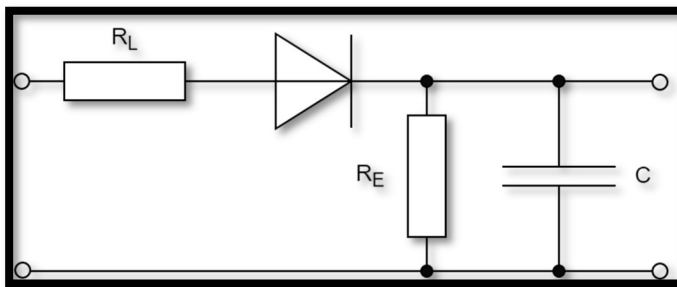
$$U_s = m \cos(2\pi f_m t) + A_c \cos(2\pi f_c t)$$

$$I \sim U_s^2 \sim [m \cos(2\pi f_m t) + A_c \cos(2\pi f_c t)]^2$$

Durch Lösen der binomischen Formel und Anwendung der Kosinussätze lässt sich herleiten, dass im Signal nach der Diode folgende Frequenzen vorhanden sind:  $f_c$ ,  $f_c - f_m$ ,  $f_c + f_m$  und genau genommen unendlich weitere, die durch die **Mischprodukte** zustande kommen (siehe Reihenentwicklung **e-Funktion**). Weil aber für uns nur der quadratische Anteil wichtig ist, werden alle anderen mit einem **Bandpass** herausgefiltert.



### Hüllkurvendemodulator:

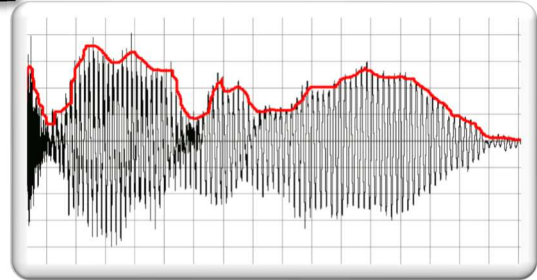


Während der positiven Halbwelle lädt sich der Kondensator auf. Während der negativen entlädt er sich. Ist die Aufladezeit kürzer als die Entladezeit, so kann man sehr gut die einhüllende Kurve herausfiltern.

$$\tau_1 = R_L C, \text{ möglichst klein}$$

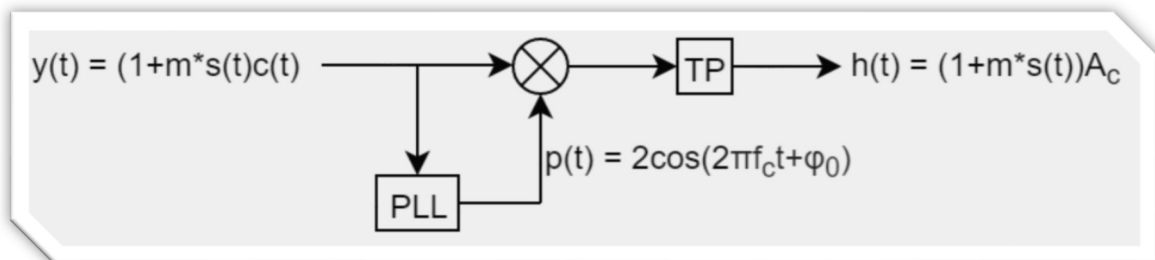
$$\tau_1 = R_E C, \text{ möglichst groß}$$

$$f_M \ll \frac{1}{\tau_1} \ll f_T$$



### Synchrondemodulator: Kohärente AM-Demodulation

- Falls Phasenlage unbekannt



PLL misst Phasenverschiebung und stellt anschließend einen Oszillator ein, bis die Phasenverschiebung 0 ist → Trägerrekonstruktion.

$$h(t) = TP(y(t) * p(t))$$

$$h(t) = TP((1 + m * s(t))A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_0) * 2 \cos(2\pi f_c t + \varphi_0))$$

$$\cos^2(x) = \frac{1}{2}(\cos(2x) + 1) \rightarrow 2\cos^2(x) = (\cos(2x) + 1)$$

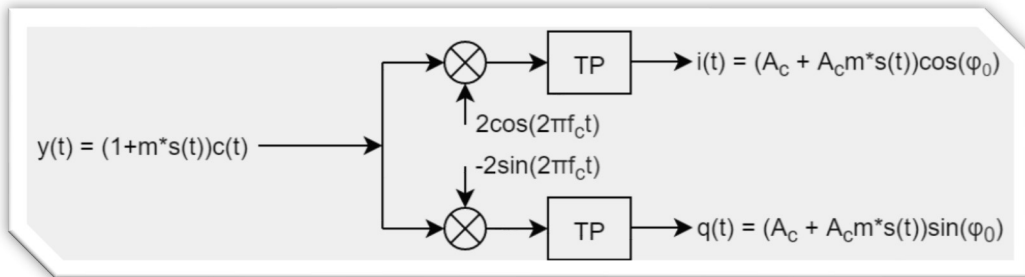
$$h(t) = TP((1 + m * s(t))A_c(\cos(4\pi f_c t + 2\varphi_0)) + 1)$$

$$h(t) = TP((1 + m * s(t))A_c \cos(4\pi f_c t + 2\varphi_0) + A_c), \text{ wird durch Tiefpass eliminiert}$$

$$h(t) = (1 + m * s(t))A_c = A_c + A_c m * s(t)$$

## **IQ-Demodulator:** Kohärente AM-Demodulation

- Falls Phasenlage unbekannt



$$i(t) = TP((1 + m * s(t))c(t) * 2 \cos(2\pi f_c t))$$

$$i(t) = TP((1 + m * s(t))A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_0) 2 \cos(2\pi f_c t))$$

$$\cos(x) \cos(x + y) = \frac{1}{2}(\cos(2x + y) + \cos(y)) \rightarrow 2 \cos(x) \cos(x + y) = \cos(2x + y) + \cos(y)$$

$$i(t) = TP((1 + m * s(t))(A_c \cos(4\pi f_c t + \varphi_0) + A_c \cos(\varphi_0))), \text{wird durch Tiefpass eliminiert}$$

$$i(t) = (1 + m * s(t))A_c \cos(\varphi_0)$$

$$i(t) = (A_c + A_c m * s(t)) \cos(\varphi_0)$$

$$q(t) = TP((1 + m * s(t))c(t) * 2 \sin(2\pi f_c t))$$

$$q(t) = TP((1 + m * s(t))A_c \cos(2\pi f_c t + \varphi_0) (-2) \sin(2\pi f_c t))$$

$$-2 \sin(x) \cos(x + y) = -\sin(2x + y) + \sin(y)$$

$$q(t) = TP((1 + m * s(t))(A_c \cos(4\pi f_c t + \varphi_0) A_c \sin(\varphi_0))), \text{wird durch Tiefpass eliminiert}$$

$$q(t) = (1 + m * s(t))A_c \sin(\varphi_0)$$

$$q(t) = (A_c + A_c m * s(t)) \sin(\varphi_0)$$

$$A_c + A_c m * s(t) = k$$

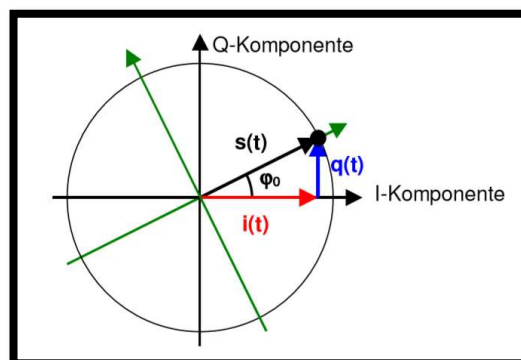
$$s(t) = \sqrt{i(t)^2 + q(t)^2}$$

$$s(t) = \sqrt{k^2 \cos^2(\varphi_0) + k^2 \sin^2(\varphi_0)}$$

$$s(t) = \sqrt{k^2 (\cos^2(\varphi_0) + \sin^2(\varphi_0))}, 1$$

$$s(t) = \sqrt{k^2} = k$$

$$s(t) = A_c + A_c m * s(t)$$



**Beispiel:** Zur Darstellung eines AM-Signals im Zeigerdiagramm sind die Amplituden der Trägerspannung  $\hat{U}_T$  und der Seitenbänder  $\hat{U}_S$  zu berechnen. Die Trägerleistung des AM-Signals beträgt  $P_T = 80W$ , gesucht ist weiters die Spitzenleistung bei einem Modulationsgrad von 60% und einem Innenwiderstand von  $R = 75\Omega$ .

Gesucht:  $P_T, \hat{U}_S, PEP$

$$P_T = \frac{\hat{U}_T^2}{2R} \rightarrow \hat{U}_T = \sqrt{2RP_T} = \sqrt{2 * 75 * 80} = \mathbf{109,544V}$$

$$m = \frac{\hat{U}_S}{\hat{U}_T} \rightarrow \hat{U}_S = m * \hat{U}_T = 0,6 * 109,544 = \mathbf{65,727V}$$

$$PEP = P_T(1 + m^2) = 75(1 + 0,6^2) = \mathbf{102W}$$

**Beispiel:**  $U_{AM,max} = 18V, U_{AM,min} = 2V, f_M = 1kHz, f_T = 20kHz, R = 50\Omega$

Gesucht: Modulationsgrad, Funktionsgleichung, Leistungen, Skizze im Frequenzbereich

$$Y = 2U_{AM,max} = 2 * 18 = 36V$$

$$y = 2U_{AM,min} = 2 * 2 = 4V$$

$$m = \frac{Y - y}{Y + y} = \frac{36 - 4}{36 + 4} = 0,8$$

$$\hat{U}_T = \frac{Y + y}{4} = \frac{36 + 4}{4} = 10V$$

$$\hat{U}_M = \frac{Y - y}{4} = \frac{36 - 4}{4} = 8V$$

$$P_T = \frac{\hat{U}_T^2}{2R} = \frac{10^2}{2 * 50} = 1W$$

$$P_{SB} = \frac{\hat{U}_M^2}{8R} = \frac{8^2}{8 * 50} = 0,16W$$

$$P_M = 2P_{SB} = 2 * 0,16 = 0,32W$$

$$P_{AM} = P_T \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) = 1 \left(1 + \frac{0,8^2}{2}\right) = 1,32W$$

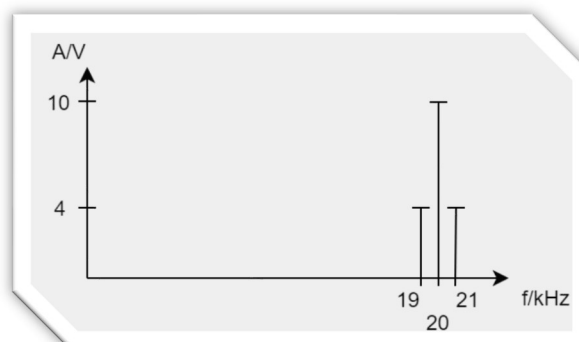
$$PEP = P_T(1 + m^2) = 1(1 + 0,8^2) = 1,64W$$

$$Y(t) = (1 + m * s(t))c(t) = (1 + m * \cos(2\pi f_M t))\hat{U}_T \cos(2\pi f_T t)$$

$$Y(t) = \hat{U}_T \cos(2\pi f_T t) + \hat{U}_T m * \cos(2\pi f_M t) \cos(2\pi f_T t)$$

$$Y(t) = \hat{U}_T \cos(2\pi f_T t) + \frac{\hat{U}_T m}{2} \{\cos[2\pi(f_T - f_M)t] + \cos[2\pi(f_T + f_M)t]\}$$

$$Y(t) = \mathbf{10V \cos(2\pi t * 20kHz) + 4V[\cos(2\pi t * 19kHz) + \cos(2\pi t * 21kHz)]}$$





# WINKELMODULATION

## Funktion:

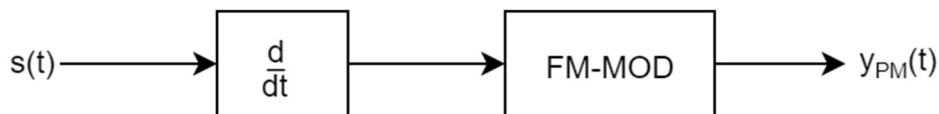
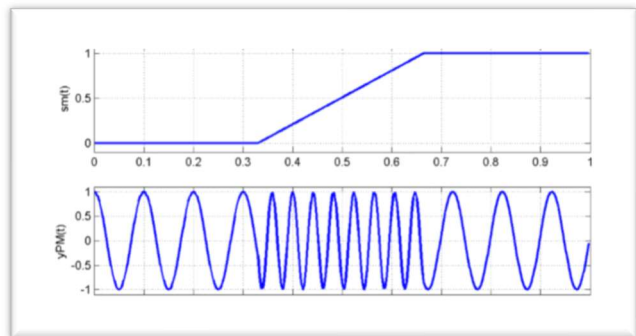
$a(t) = a_0$  Die Amplitude des Ausgangssignals ist abhängig von der Amplitude des  
 $\varphi(t) = f\{s(t)\}$  Eingangssignals  
 $y_{WM}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$

## Phasenmodulation:

$$\varphi(t) = k_{PM} * s(t) \quad [k_{PM}] = 1 \frac{\text{rad}}{\text{V}}$$

$$y_{PM}(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + k_{PM} * s(t))$$

$\Delta\varphi = k_{PM} * \hat{S}$ , max. Phasenänderung  
 → **Phasenhub**



Frequenz abhängig von der Änderung!

## Frequenzmodulation:

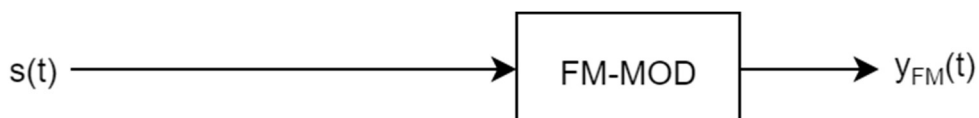
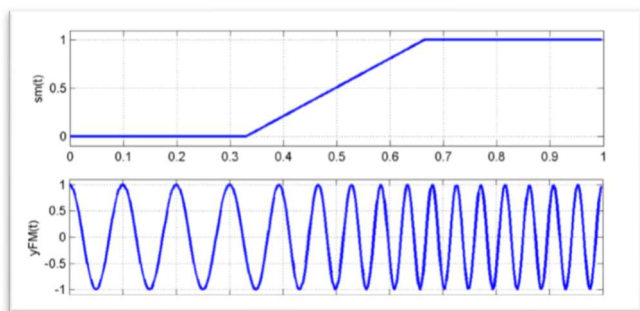
$$\omega_{FM}(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_0 + k_{FM} * s(t)$$

$$y_{FM}(t) = A_0 \cos(\theta(t))$$

$$\theta(t) = \int \frac{d\theta(t)}{dt} dt$$

$$y_{FM}(t) = A_0 \cos\left(\omega_0 t + k_{FM} \int_0^t s(\tau) d\tau\right)$$

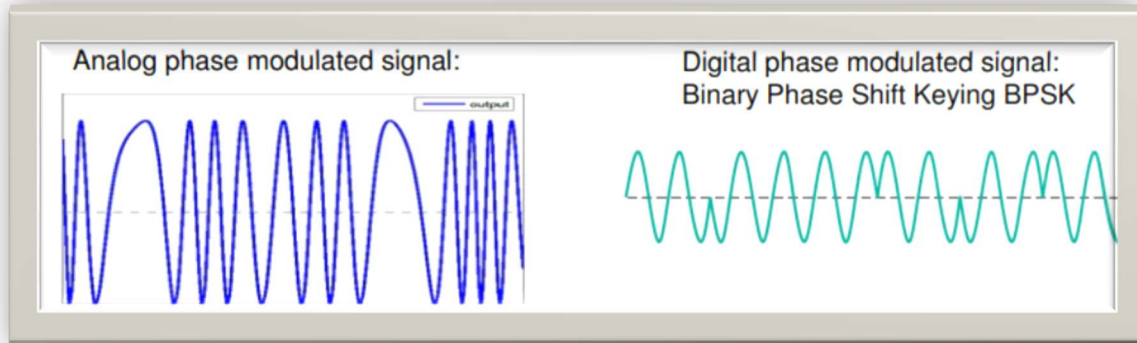
$\Delta f = \frac{k_{FM} * \hat{S}}{2\pi}$ , max. Frequenzänderung  
 → **Frequenzhub**



Frequenz abhängig vom Momentanwert!

## Analog vs. Digital moduliert:

### Phase



Analog: Stetig

Digital: Sprunghafte Phasenänderungen → Modulationssignal nicht stetig (BPSK)

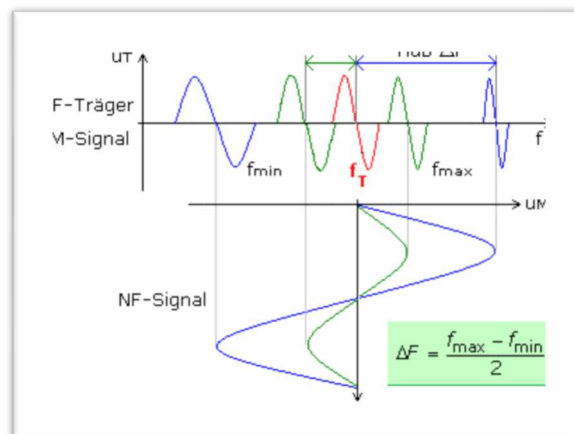
### Frequenz



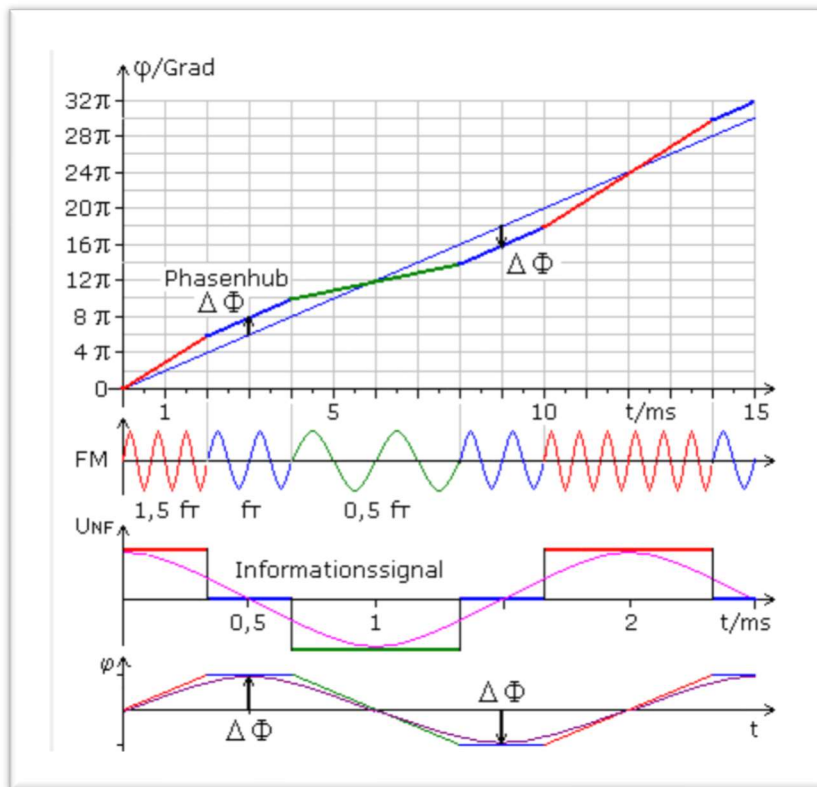
Analog: Stetig

Digital: Sprunghafte Frequenzänderung → Modulationssignal nicht stetig (BFSK)

## Frequenzhub: Maximale Frequenzabweichung



**Phasenhub bei FM:** Wie schnell ändert sich die Phase, abhängig von der Spannung  $U_{NF}$



### **Kenngrößen:**

$$\Delta f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2}, \text{ Frequenzhub}$$

$$m = \frac{\Delta f}{f_T}, \text{ Modulationsgrad, hier unwichtig, da er nicht angibt wie stark moduliert wird}$$

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_M}, \text{ Modulationsindex, gibt an wie stark moduliert wird}$$

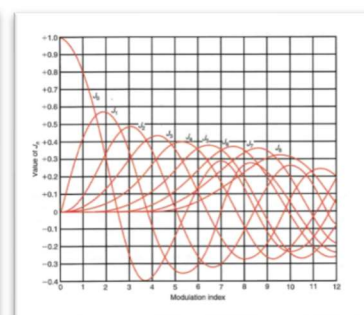
$$B_{10\%} = 2(\Delta f + f_M), \text{ nur 90\% der Leistung werden berücksichtigt} \rightarrow \text{Carson}$$

$$B_{5\%} = 2(\Delta f + 2f_M)$$

$$U_{FM}(t) = \hat{U}_T \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\eta) \cos[(\omega_0 + n\omega_m)t], \text{ Signal wird in Addition von Cosinus umgeformt}$$

$$J_{-n}(\eta) = (-1)^n J_n(\eta)$$

$n$	$\beta = 0.1$	$\beta = 0.2$	$\beta = 0.5$	$\beta = 1$	$\beta = 2$	$\beta = 5$	$\beta = 8$	$\beta = 10$	$n$
0	0.998	0.990	0.938	0.765	0.224	-0.178	0.172	-0.246	0
1	0.050	0.100	0.242	0.440	0.577	-0.328	0.235	0.043	1
2	0.001	0.005	0.031	0.115	0.353	0.047	-0.113	0.255	2
3				0.020	0.129	0.365	-0.291	0.058	3
4				0.002	0.034	0.391	-0.105	-0.220	4
5					0.007	0.261	0.186	-0.234	5
6					0.001	0.131	0.338	-0.014	6
7						0.053	0.321	0.217	7
8						0.018	0.223	0.318	8
9						0.006	0.126	0.292	9
10						0.001	0.061	0.207	10
11							0.026	0.123	11
12							0.010	0.063	12
13							0.003	0.029	13
14							0.001	0.012	14
15								0.004	15
16								0.001	16



### Kenngrößen:

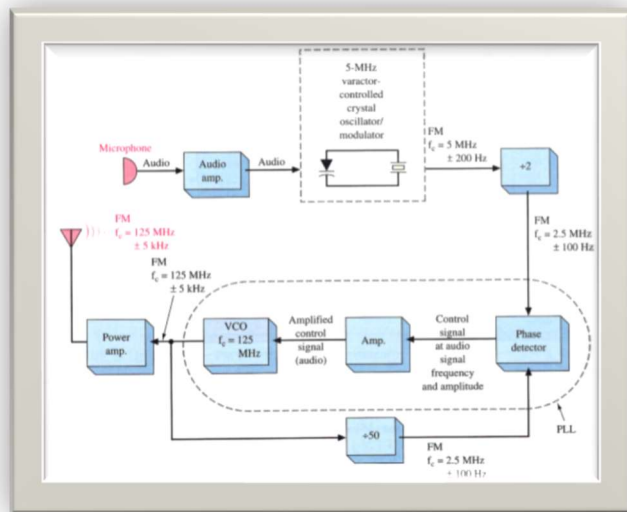
$$\text{Klirrfaktor } k = \frac{\text{Leistung Oberwellen}}{\text{Leistung Grundwelle}}$$

$$\Delta\varphi \sim \Delta f, \text{ max. Phasenhub prop. zum Phasenhub}$$

$$\Delta\varphi \sim \frac{1}{f_M}, \text{ max. Phasenhub umgekehrt prop. zur Signalfrequenz}$$

### FM-Modulator:

Audiosignal kontrolliert die Kapazität und beeinflusst somit die Frequenz des Quarzoszillators. PLL detektiert das Audiosignal und steuert die Frequenz des VCO im Bereich von  $125\text{MHz} \pm 5\text{kHz}$ .



**Beispiel:** Ein FM-Signal hat einen Modulationsindex von  $\eta = 3$ . Die Trägerfrequenz beträgt  $f_T = 500\text{kHz}$ , der Effektivwert der unmodulierten Trägerspannung  $10\text{V}$ , das sinusförmige Modulationssignal hat eine Frequenz von  $250\text{Hz}$ . Ermitteln Sie die Amplitude der Seitenschwingung bei  $f = 500,75\text{kHz}$ .

$$n = \frac{f - f_T}{f_M} = \frac{500,75 - 500}{0,25} = 3 \rightarrow J_3$$

$$J_3 = 0,3$$

$$\hat{U}_{T3} = J_3 * \hat{U}_T = 0,3 * 10 * \sqrt{2} = 4,24\text{V}$$

