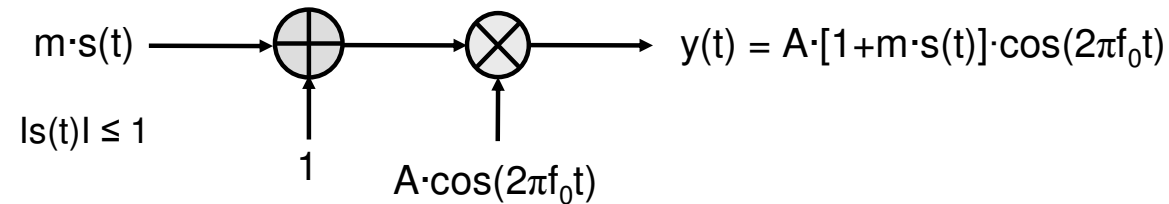


# Analoge Modulationsverfahren

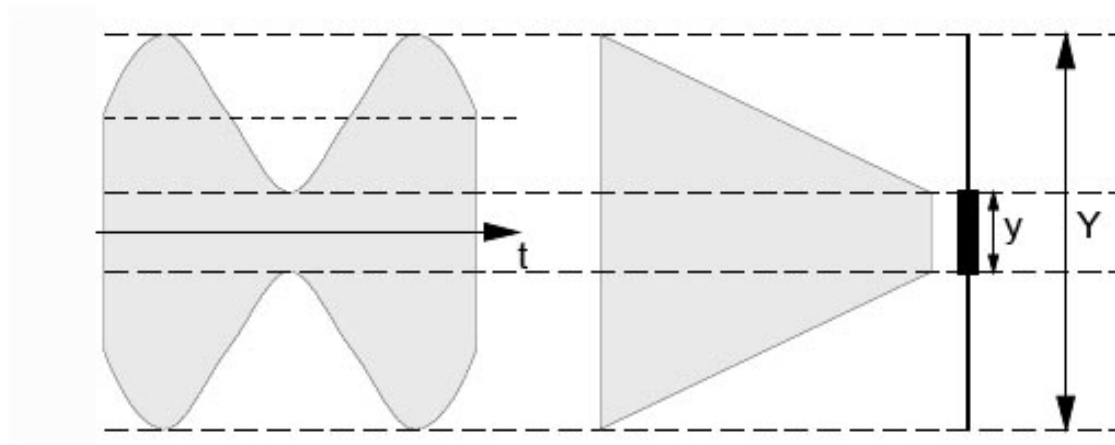
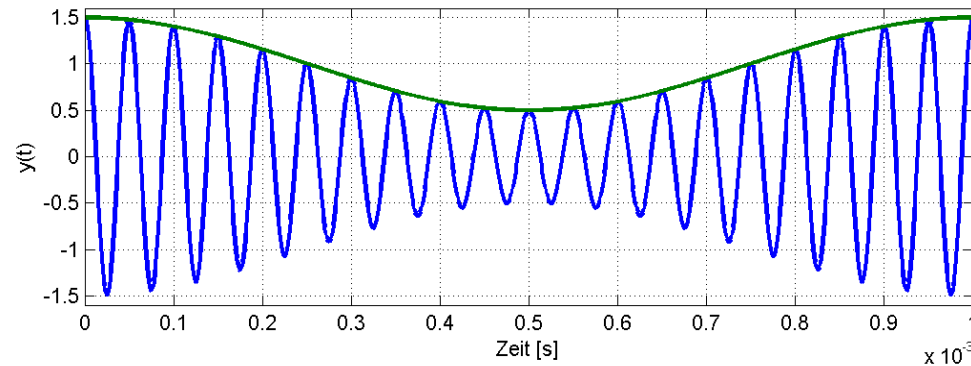


# Amplitudenmodulation AM



- Einfache Implementation
- Geringe Bandbreite

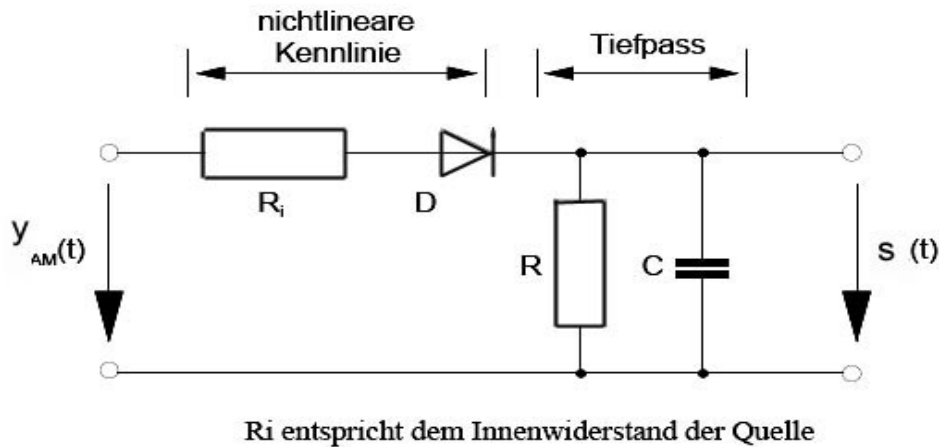
Beispiel:  $m=0.5$ ,  $s(t) = \cos(2\pi f_m t)$ ,  $f_m = 1$  kHz,  $A=1$ ,  $f_0 = 20$  kHz



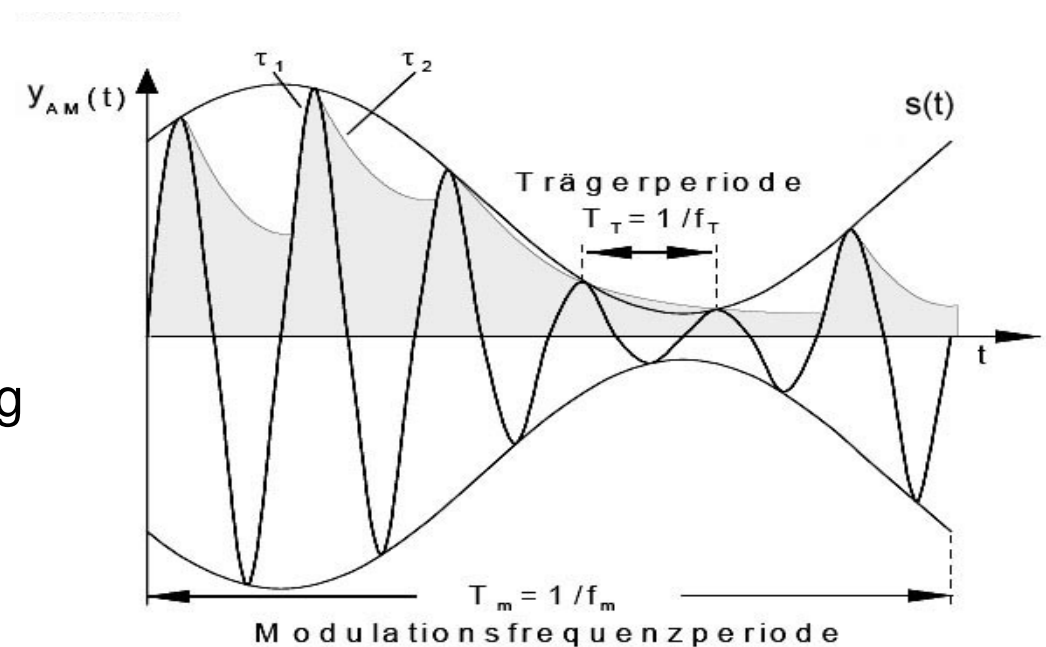
Modulationsindex  $m$ :

$$m = \frac{Y - y}{Y + y}$$

# AM Enveloppendetektor



Schaltung:  
Spitzenwert–Gleichrichter mit Entladung



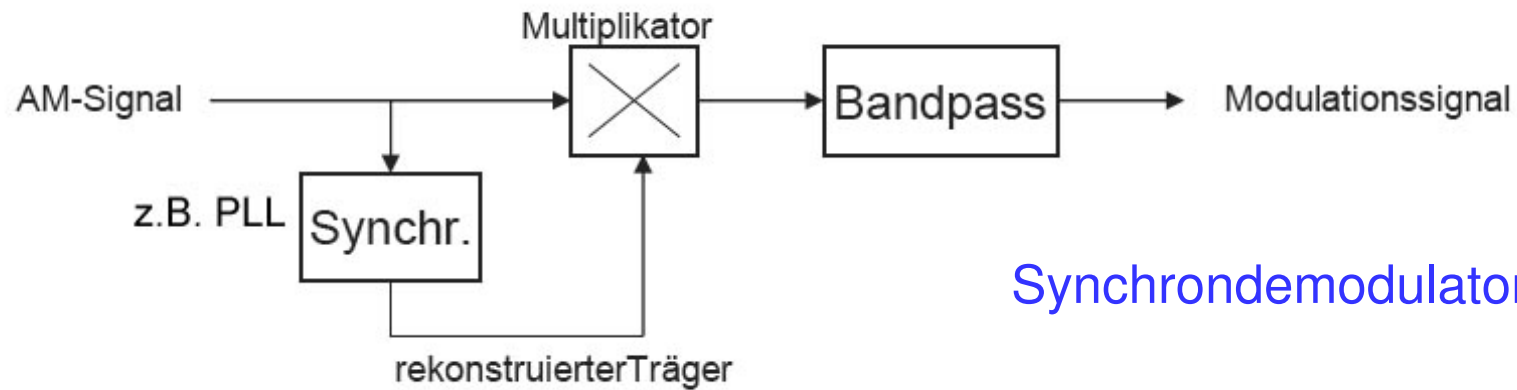
Dimensionierungsgleichungen:

$$\tau_1 = R_i \cdot C \quad \text{Aufladezeitkonstante}$$

$$\tau_2 = R \cdot C \quad \text{Entladezeitkonstante}$$

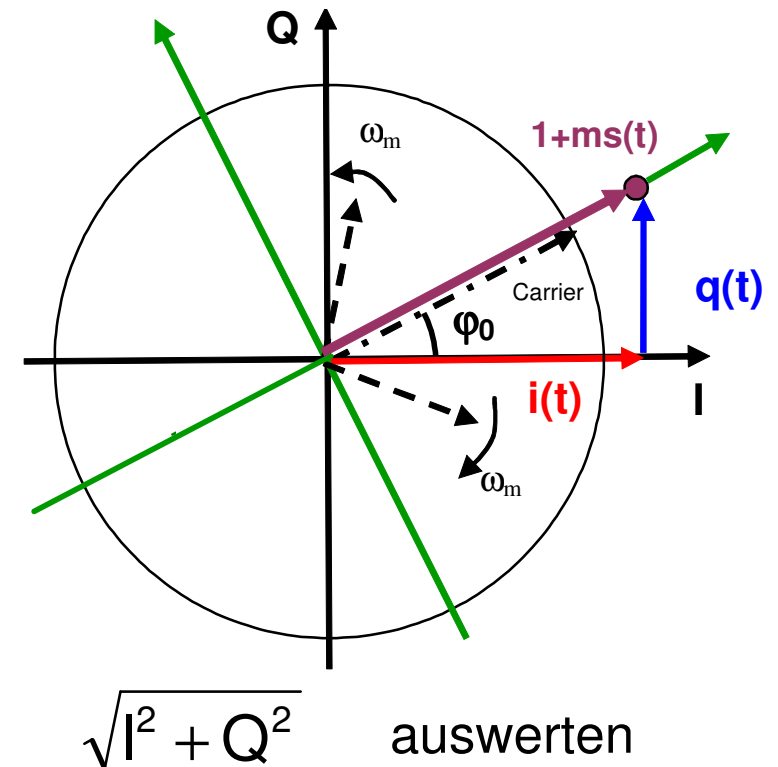
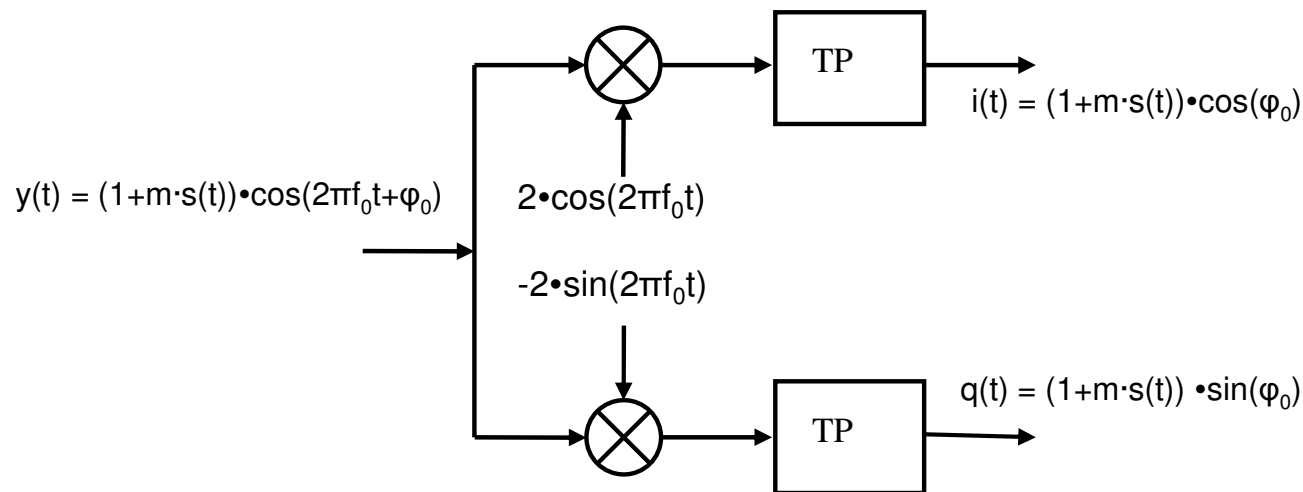
$$T_T \ll R \cdot C \ll T_m$$

# AM Synchron- & I/Q-Demodulator



Synchrondemodulator

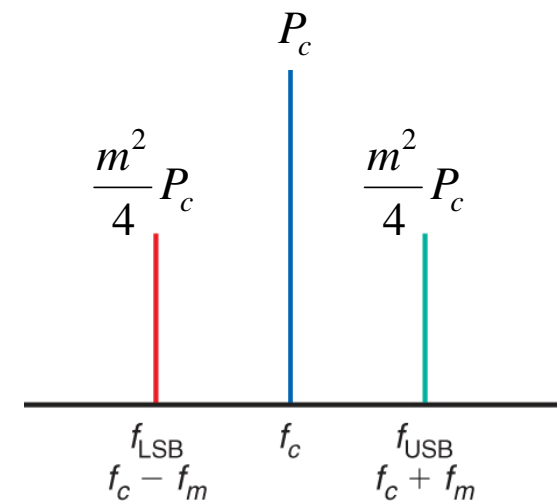
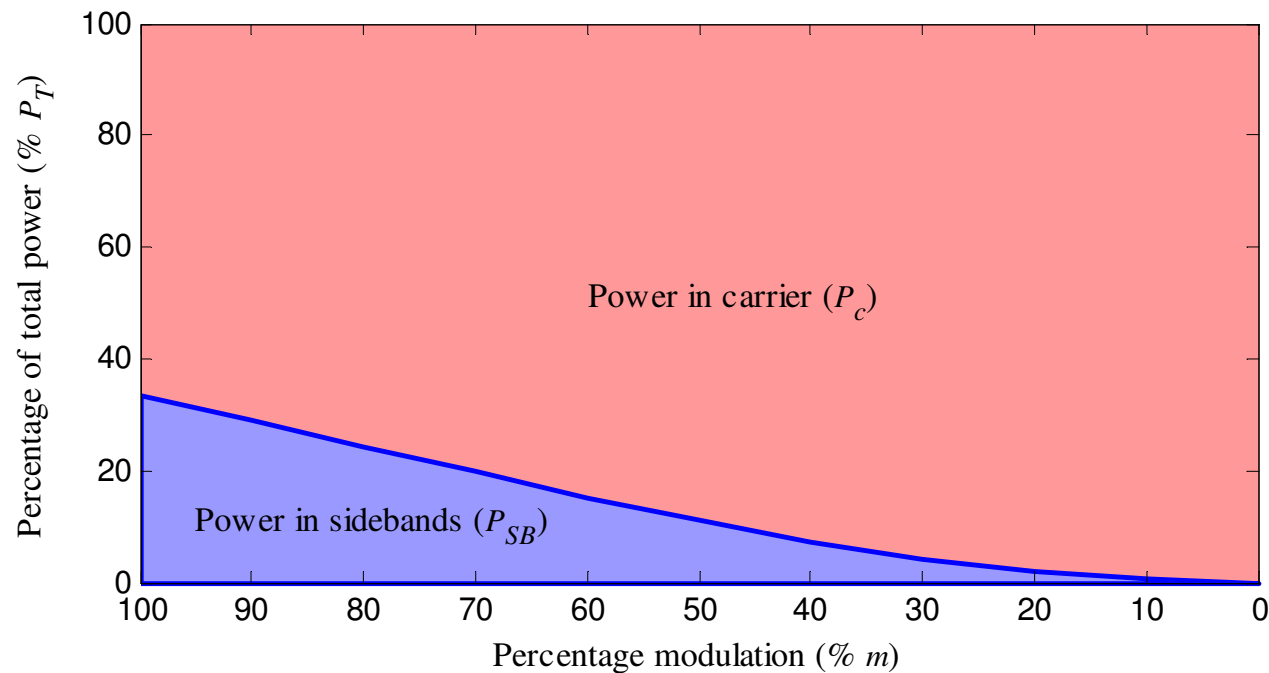
I/Q-Demodulator



# AM power efficiency

- Bei maximaler Modulation macht die Leistung in den Seitenbändern zusammen nur etwa 33% der abgestrahlten Leistung aus.

$f_m$  : Modulationsfrequenz



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

Bandbreite  $B = 2 \cdot f_m$

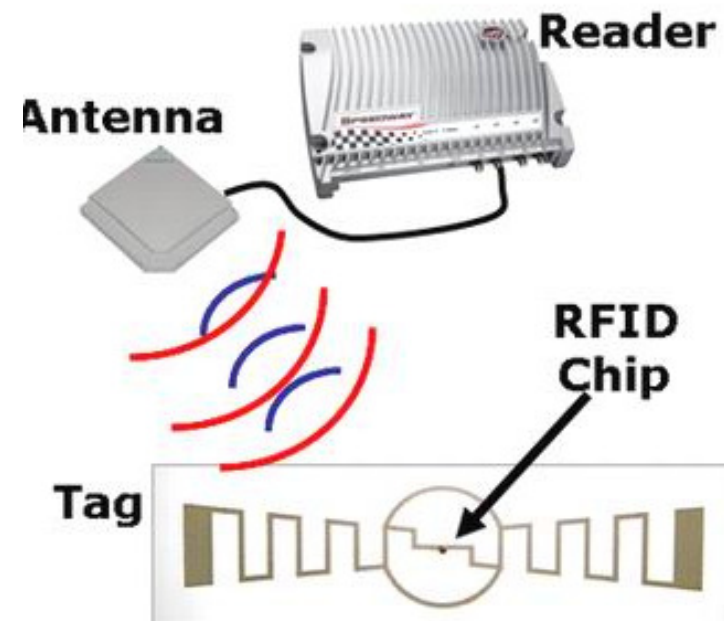
Effizienz < 33%



# Why it is still widely used?

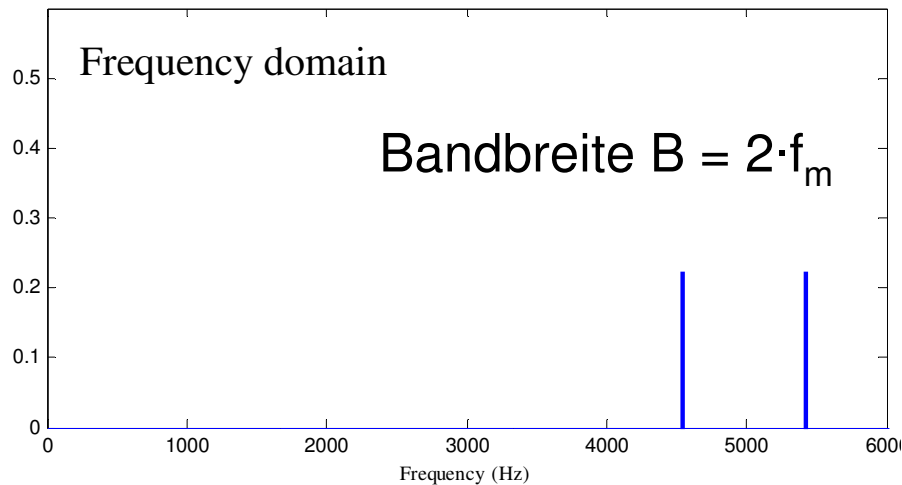
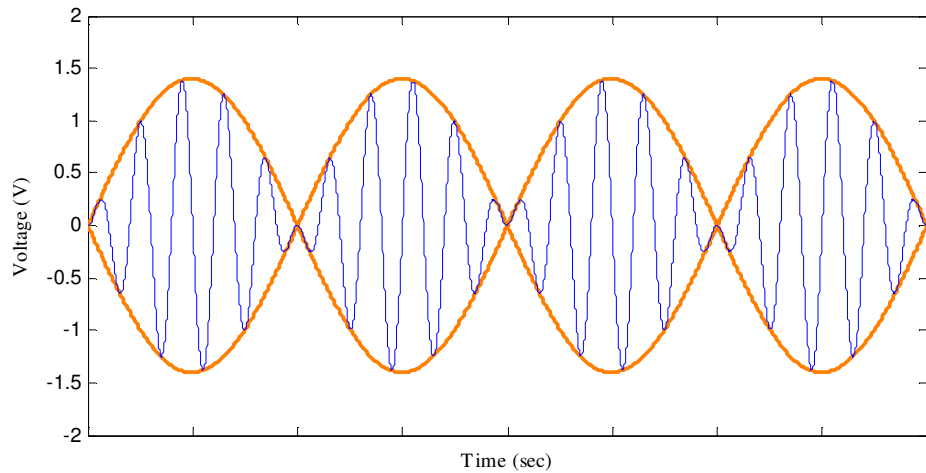
AM wird immer noch benutzt weil:

- es einfachste Technologie ist und kleinen Bedarf an Bandbreite hat
- es Träger für empfangsseitige Energiegewinnung liefert (RFID)
  - Military and Amateur Short Wave Radio
  - CB Radio 27 MHz
  - Air Traffic Control Radios (civil), Air and Sea Navigation
  - Garage door opens, keyless remotes
  - RFID LF, HF, UHF



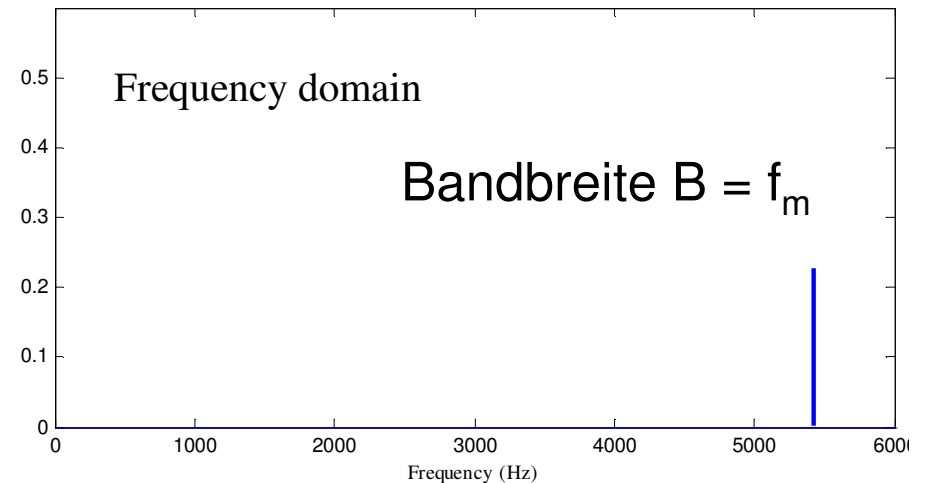
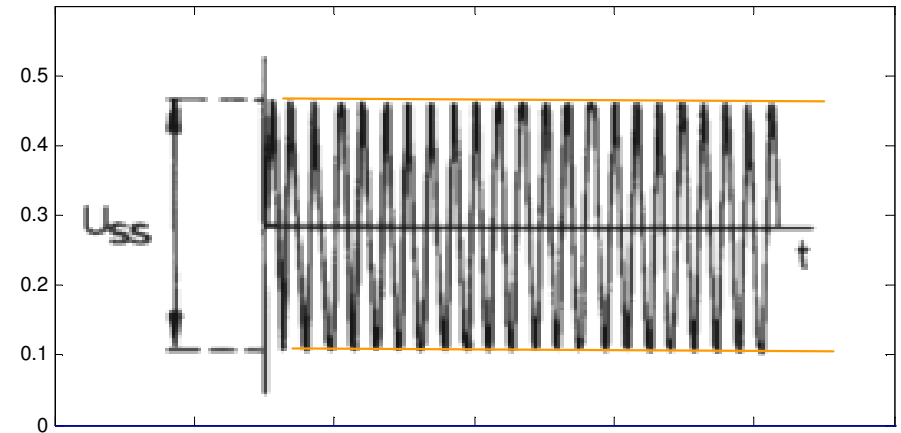
# DSB, SSB: time & frequency domain

## ■ Suppressed carrier AM signal (DSB)



Effizienz 50%

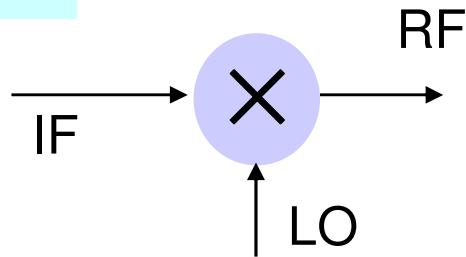
## ■ Single Side Band (SSB)



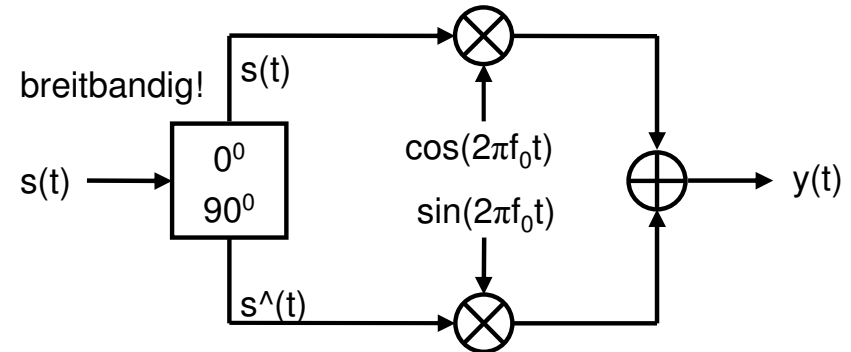
Effizienz 100%

# DSB, SSB

Modulation:



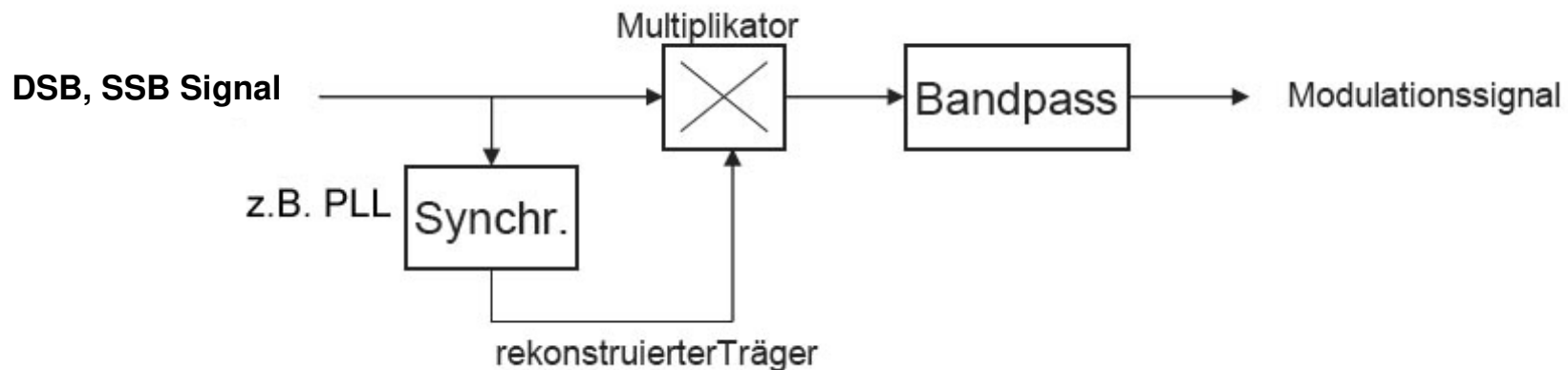
DSB Modulator = Mixer/Multiplizierer



SSB Modulator = Hilbert und I/Q-Mixer

Demodulation:

Genauer Lokalszillator im Empfänger oder Piloton



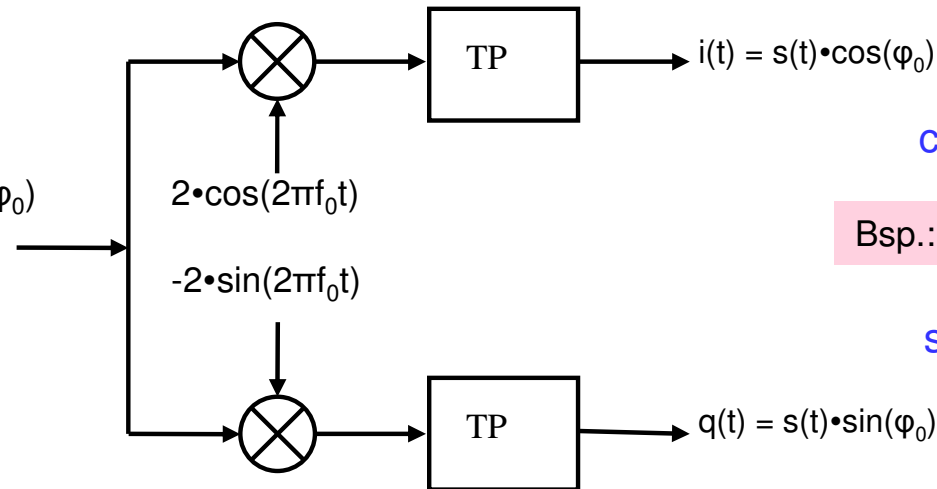
Trick: Ein schwacher Piloton wird im Sender bei der Trägerfrequenz wieder zugefügt zwecks Rückgewinnung im Empfänger



# DSB mit I/Q-Demodulator

## I/Q-Demodulator für DSB

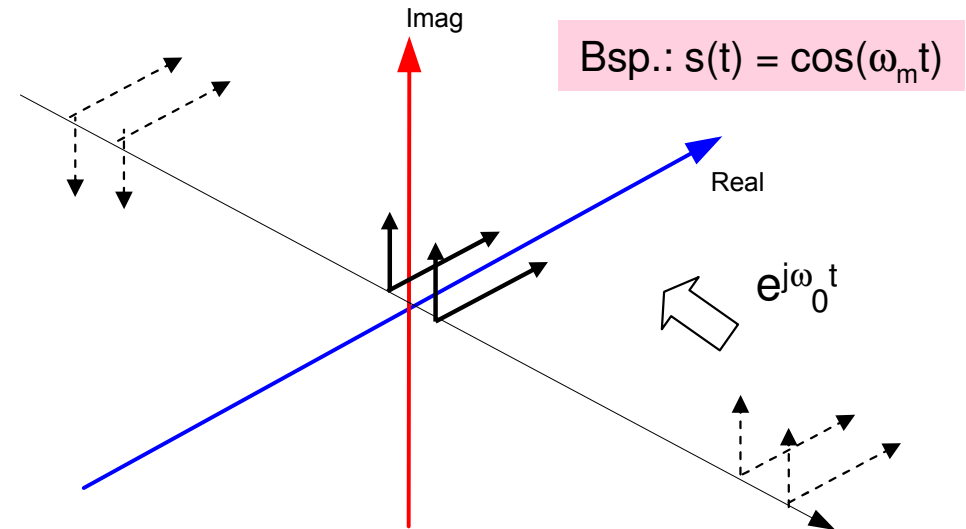
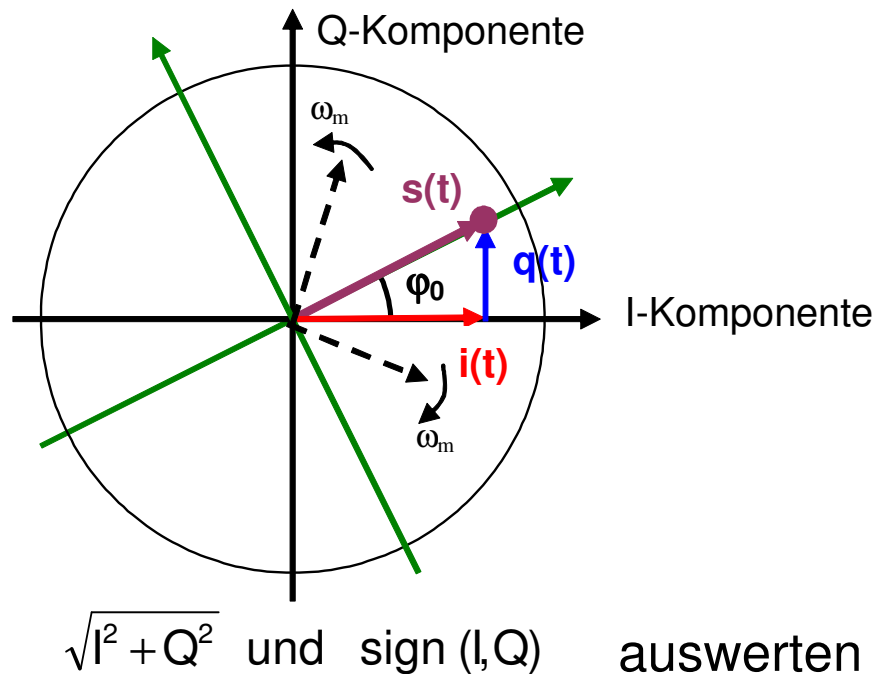
$$y(t) = s(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0)$$



$$\cos(\varphi_0) \cos(\omega_m t)$$

Bsp.: Praktikum KO-Bild

$$\sin(\varphi_0) \cos(\omega_m t)$$

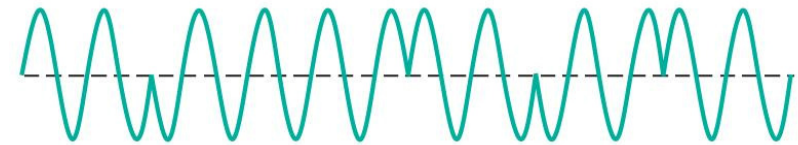


Note:  $I, Q \neq \text{Real, Imag} \rightarrow$  sind Fouriertransformationspaar

# Phasen-/Frequenzmodulation PM/FM

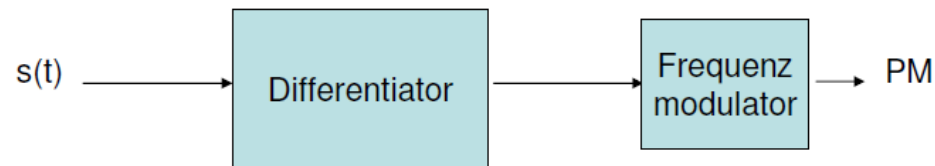
$$v = A_0 \sin(2\pi f_c t + \varphi(t))$$

- Phase des Carrier ändert in Übereinstimmung mit dem Modulationssignal



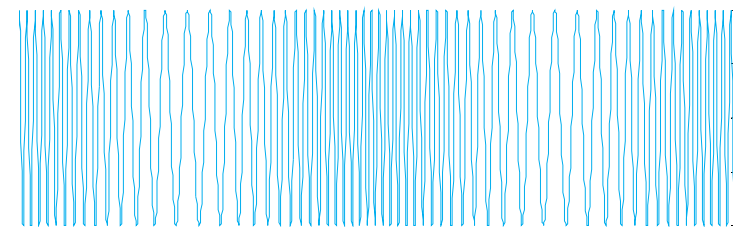
*phasen-moduliertes Signal*

- Erzeugung: DDS oder:



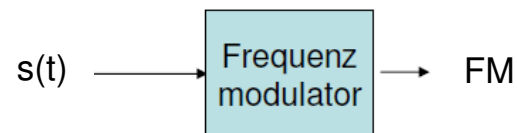
$$v = A_0 \sin(2\pi f_c t + \varphi)$$

- Momentane Frequenz des Carrier ändert in Übereinstimmung mit dem Modulationssignal



*frequenz-moduliertes Signal*

- Erzeugung PLL, DDS:



# PM Mathe

- **PM-Signal:**  $s(t)$  = Nachrichtensignal mit Spitzenwert  $S_{\text{peak}}$

$$\varphi(t) = k_{\text{PM}} \cdot s(t)$$

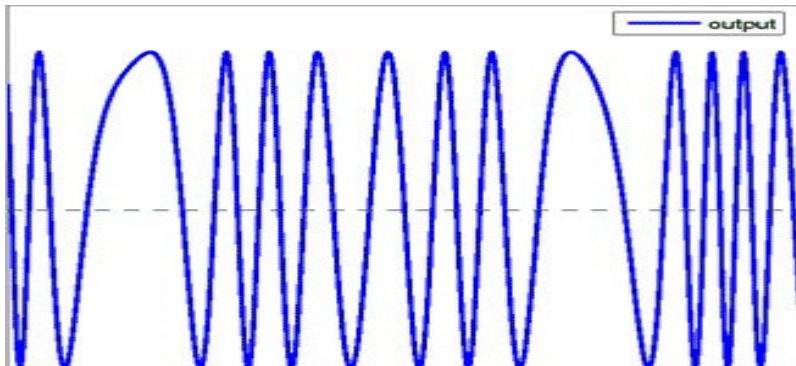
$$y_{\text{PM}}(t) = A_0 \cdot \cos[\omega_0 \cdot t + \varphi(t)] = A_0 \cdot \cos[\omega_0 \cdot t + k_{\text{PM}} \cdot s(t)]$$

Phasenhub:

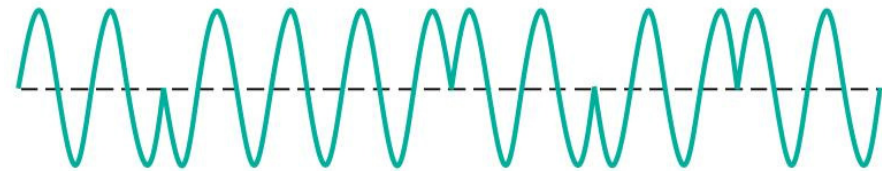
$$\Delta\varphi = k_{\text{PM}} \cdot S_{\text{peak}}$$

$$\Delta\varphi < \pi$$

Analog phase modulated signal:



Digital phase modulated signal:  
Binary Phase Shift Keying BPSK



# FM Mathe

■ **FM-Signal:**  $s(t)$  = Nachrichtensignal mit Spitzenwert  $S_{\text{peak}}$

Momentanfrequenz:

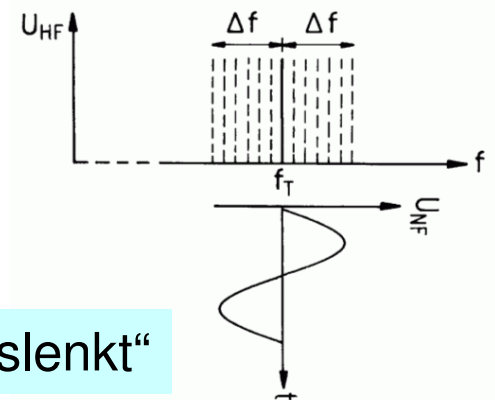
$$\omega_{\text{FM}}(t) = d\varphi(t) / dt = \omega_0 + k_{\text{FM}} \cdot s(t)$$

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

$$\Delta\omega = k_{\text{FM}} \cdot S_{\text{peak}}$$

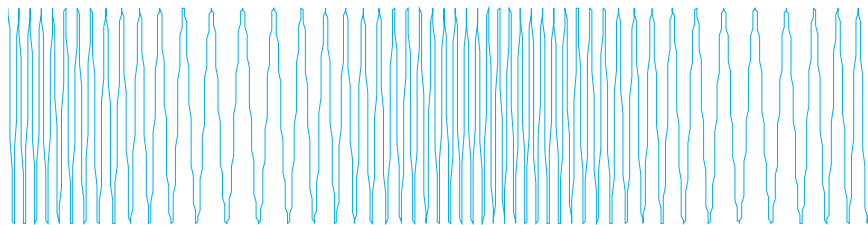
Frequenzhub\* / Max. Deviation:

$$\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{k_{\text{FM}} \cdot S_{\text{peak}}}{2\pi}$$

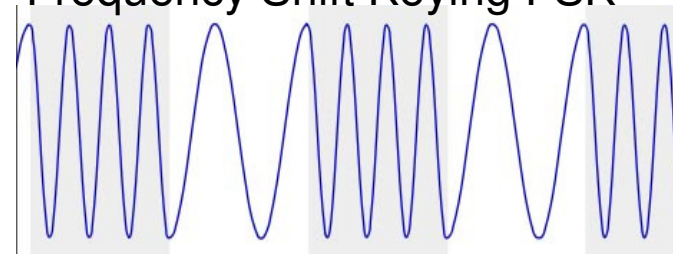


Bedeutung Hub: „Sagt wie weit der Spitzenwert die Frequenz auslenkt“

Analog frequency modulated signal



Digital frequency modulated signal  
Frequency Shift Keying FSK



# FM Spektrum

- Das cosinusförmig modulierte **FM-Signal** lautet:

$$y_{\text{FM}}(t) = A_0 \cdot \cos[\omega_0 \cdot t + (k_{\text{FM}}/\omega_m) \cdot S_{\text{peak}} \cdot \sin(\omega_m \cdot t)]$$

- Man definiert den **Modulationsindex**  $\beta_{\text{FM}}$  wie folgt:

$$\beta_{\text{FM}} = \frac{k_{\text{FM}}}{\omega_m} S_{\text{peak}} = \frac{\Delta\omega}{\omega_m}$$

$$\beta_{\text{FM}} = \frac{\Delta f}{f_m}$$

- $\beta_{\text{FM}}$  entspricht Verhältnis Frequenzhub  $\Delta f$  zu Modulationsfrequenz  $f_m$   
„Wie weit ausgelenkt“ „Wie oft ausgelenkt“

- Spektrum:

$$y_{\text{FM}}(t) = A_0 \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta_{\text{FM}}) \cdot \cos[(\omega_0 + n\omega_m)t]$$

$J_n$  Besselfkt. ☹

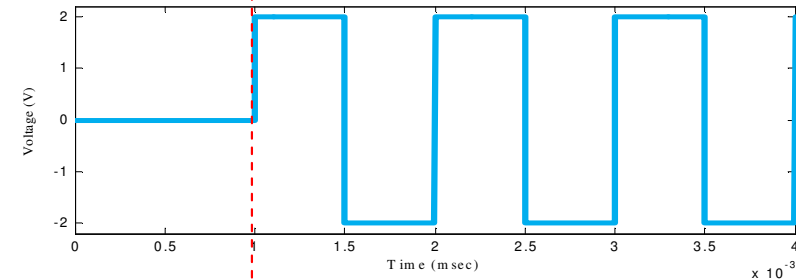
Spektrallinien beidseitig vom Träger im Abstand  $n\omega_m$

- Techn. **Bandbreite**:  $B \approx 2 \cdot (\beta_{\text{FM}} + 1) \cdot f_m = 2 \cdot (\Delta f + f_m)$  Carson Formel

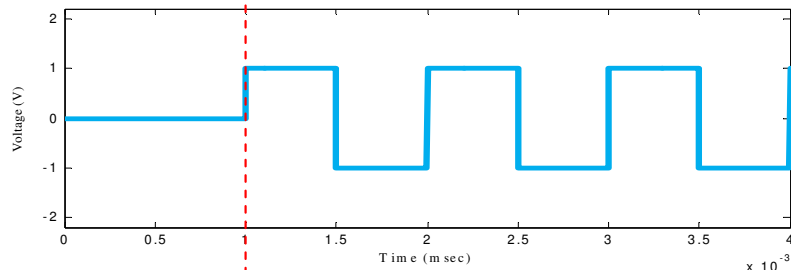
Note: Allg. Signale: für  $f_m$  die max. Frequenz des gefilterten Spektrums einsetzen

# $\Delta f$ und $f_m$ am Beispiel FSK

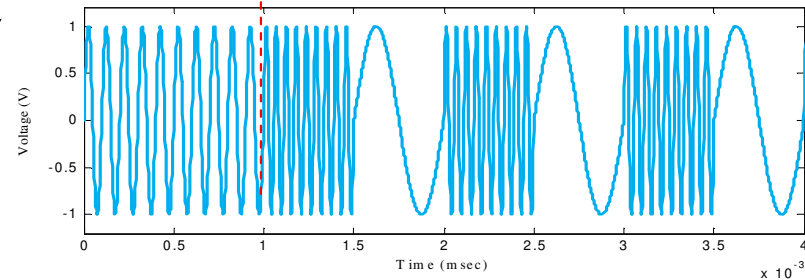
input signal ( $\pm 2$ -V, 1-kHz square wave)



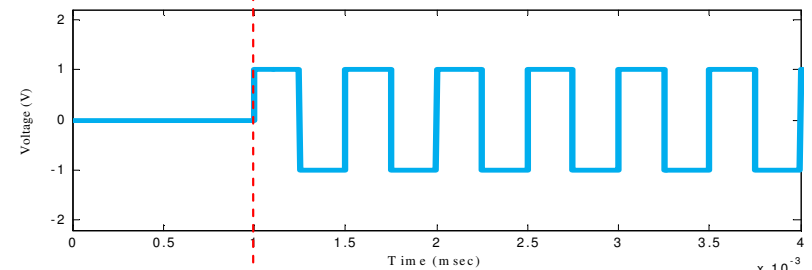
input signal ( $\pm 1$ -V, 1-kHz square wave)



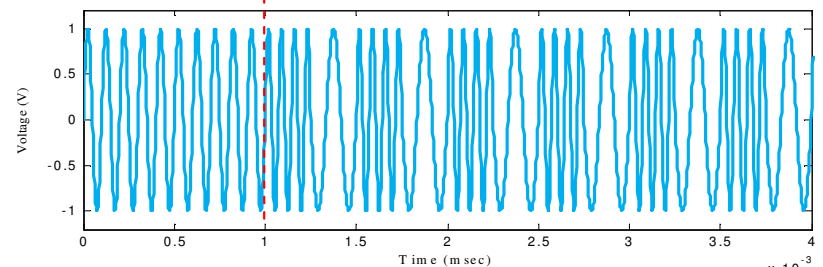
2-facher  
Hub



input signal ( $\pm 1$ -V, 2-kHz square wave)



2-fache  
 $f_m$





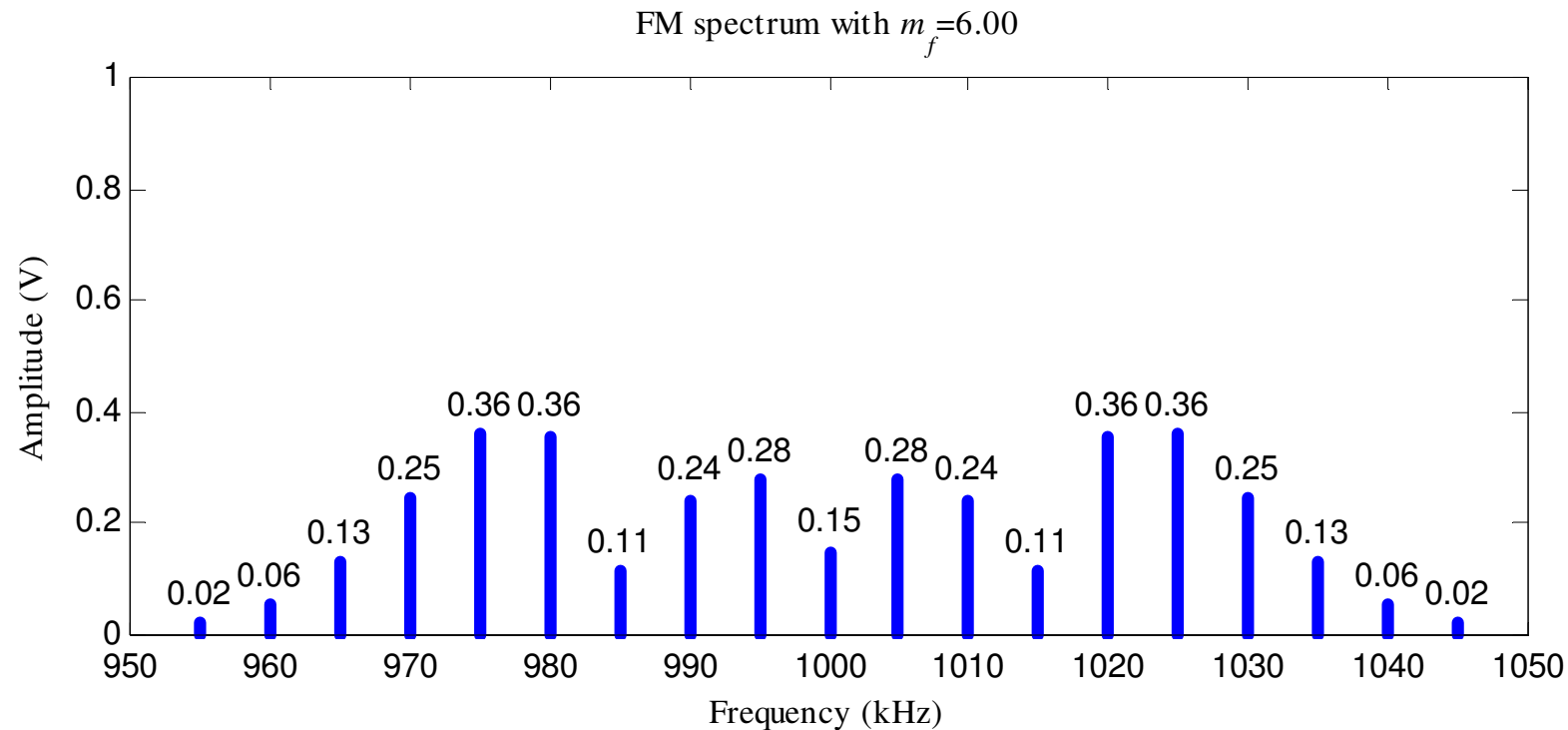
# Bessel Tabelle

Modulation Index	Carrier	Sidebands (Pairs)															
		1st	2d	3d	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	11th	12th	13th	14th	15th	16th
0.00	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.25	0.98	0.12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.5	0.94	0.24	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.0	0.77	0.44	0.11	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.5	0.51	0.56	0.23	0.06	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.0	0.22	0.58	0.35	0.13	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.5	−0.05	0.50	0.45	0.22	0.07	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3.0	−0.26	0.34	0.49	0.31	0.13	0.04	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4.0	−0.40	−0.07	0.36	0.43	0.28	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5.0	−0.18	−0.33	0.05	0.36	0.39	0.26	0.13	0.05	0.02	—	—	—	—	—	—	—	—
→ 6.0	0.15	−0.28	−0.24	0.11	0.36	0.36	0.25	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—	—
7.0	0.30	0.00	−0.30	−0.17	0.16	0.35	0.34	0.23	0.13	0.06	0.02	—	—	—	—	—	—
8.0	0.17	0.23	−0.11	−0.29	−0.10	0.19	0.34	0.32	0.22	0.13	0.06	0.03	—	—	—	—	—
9.0	−0.09	0.24	0.14	−0.18	−0.27	−0.06	0.20	0.33	0.30	0.21	0.12	0.06	0.03	0.01	—	—	—
10.0	−0.25	0.04	0.25	0.06	−0.22	−0.23	−0.01	0.22	0.31	0.29	0.20	0.12	0.06	0.03	0.01	—	—
12.0	−0.05	−0.22	−0.08	0.20	0.18	−0.07	−0.24	−0.17	0.05	0.23	0.30	0.27	0.20	0.12	0.07	0.03	0.01
15.0	−0.01	0.21	0.04	0.19	−0.12	0.13	0.21	0.03	−0.17	−0.22	−0.09	0.10	0.24	0.28	0.25	0.18	0.12

Terme bis  $\leq 2\%$

# Beispiel

Welche Bandbreite besitzt ein FM-Signal mit einem Hub (deviation) von 30 kHz und maximale modulierende Signalfrequenz von 5 kHz :



BW = 90 kHz (Bessel functions)

BW = 70 kHz (Carson's rule)

# UKW FM-Radio

Deviation= 75 kHz  
Max Mod. Freq: 15 kHz

BW = 180 kHz (Carson's rule)

Weltweit wird UKW-Rundfunk im VHF-Band II zwischen 87,5 MHz und 108,0 MHz betrieben mit FM analog.  
Senderabstand ursprünglich 300 kHz, heute 100 kHz mit geogr. Planung.

Zukunft DAB+ oder DRM+ im UKW Bereich?

- Kompromisslose Qualität
- Lokalradio: Kosten Sendeanlagen.
- Nutzbandbreite von 100 kHz zur Beibehaltung des jetzigen UKW-Rasters
- MPEG4 Codierung und COFDM Modulation

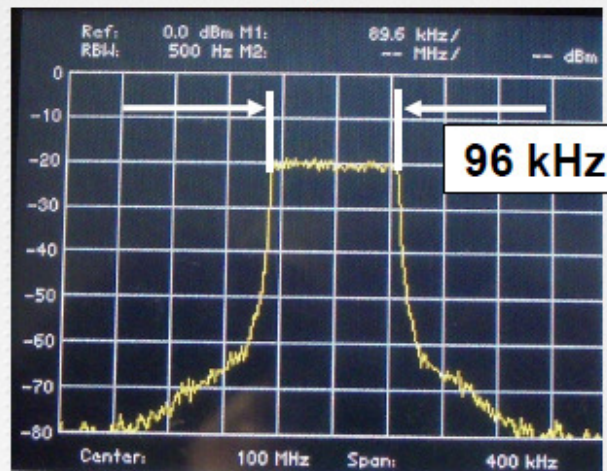


# UKW Digital Radio



## D. Transmission Signal

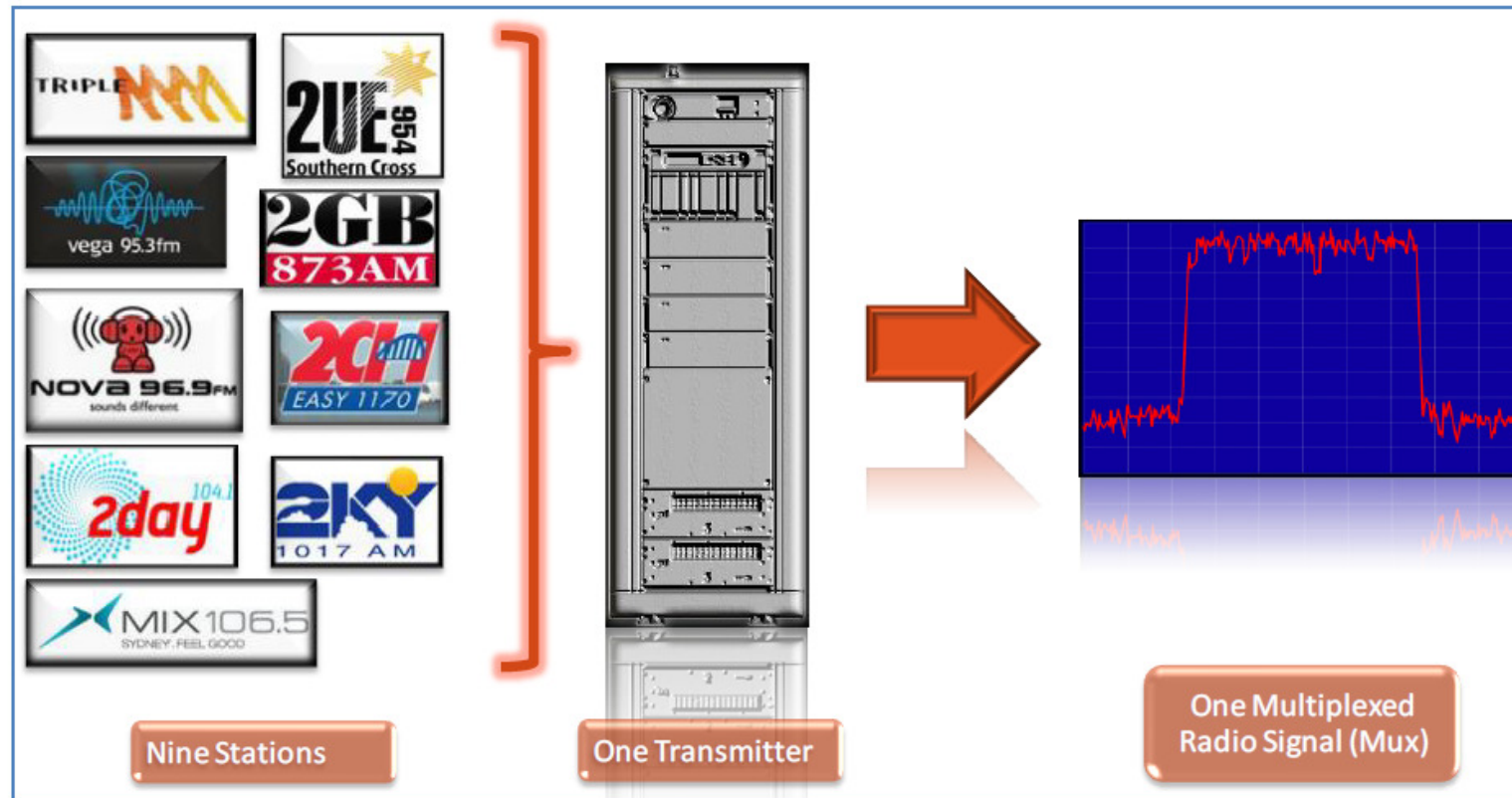
- RF channel bandwidth of 96 kHz, nominal 100 kHz
  - The narrow bandwidth of **DRM+** allows the insertion in small frequency gaps
- Frequency range up to 174 MHz including
  - Curr. analogue TV Band I (47MHz to 68MHz)
  - OIRT FM band (65.8MHz to 74MHz)
  - Japanese FM band (76MHz to 90MHz)
  - FM Band II (87.5MHz to 107.9MHz)



<http://www.drm.org>

# VHF III Digital Radio

- VHF III Band 174 – 230 MHz
- 1.5 MHz Raster mit 6...16 Rundfunksender multiplexed
- DAB: MPEG1(160 kBit/s), DAB+: MPEG 4 Coder (80 kbit/s)



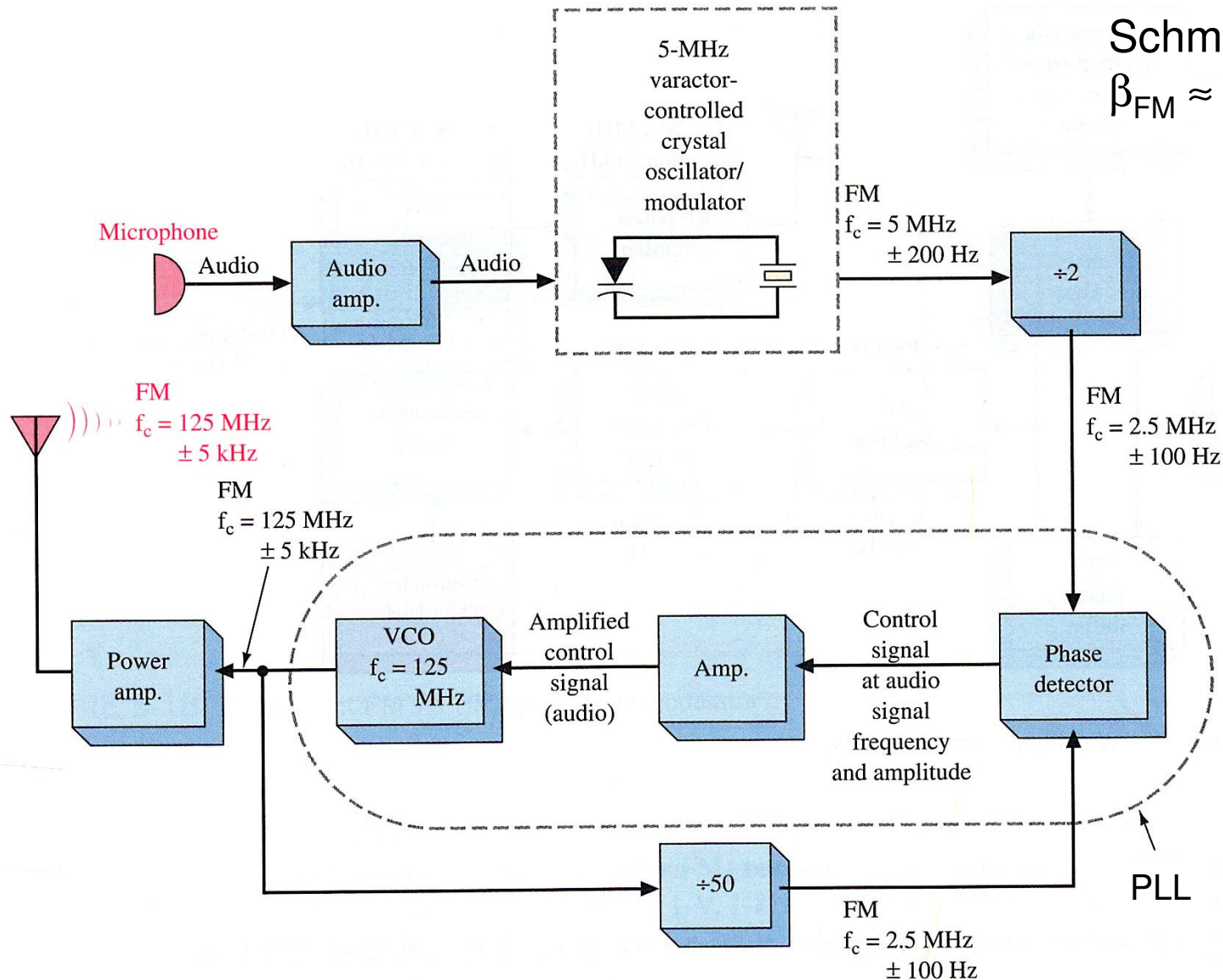
<http://www.worlddab.org>

Note: DAB+ inkompatibel zu DAB !



# FM Modulator Schmalband

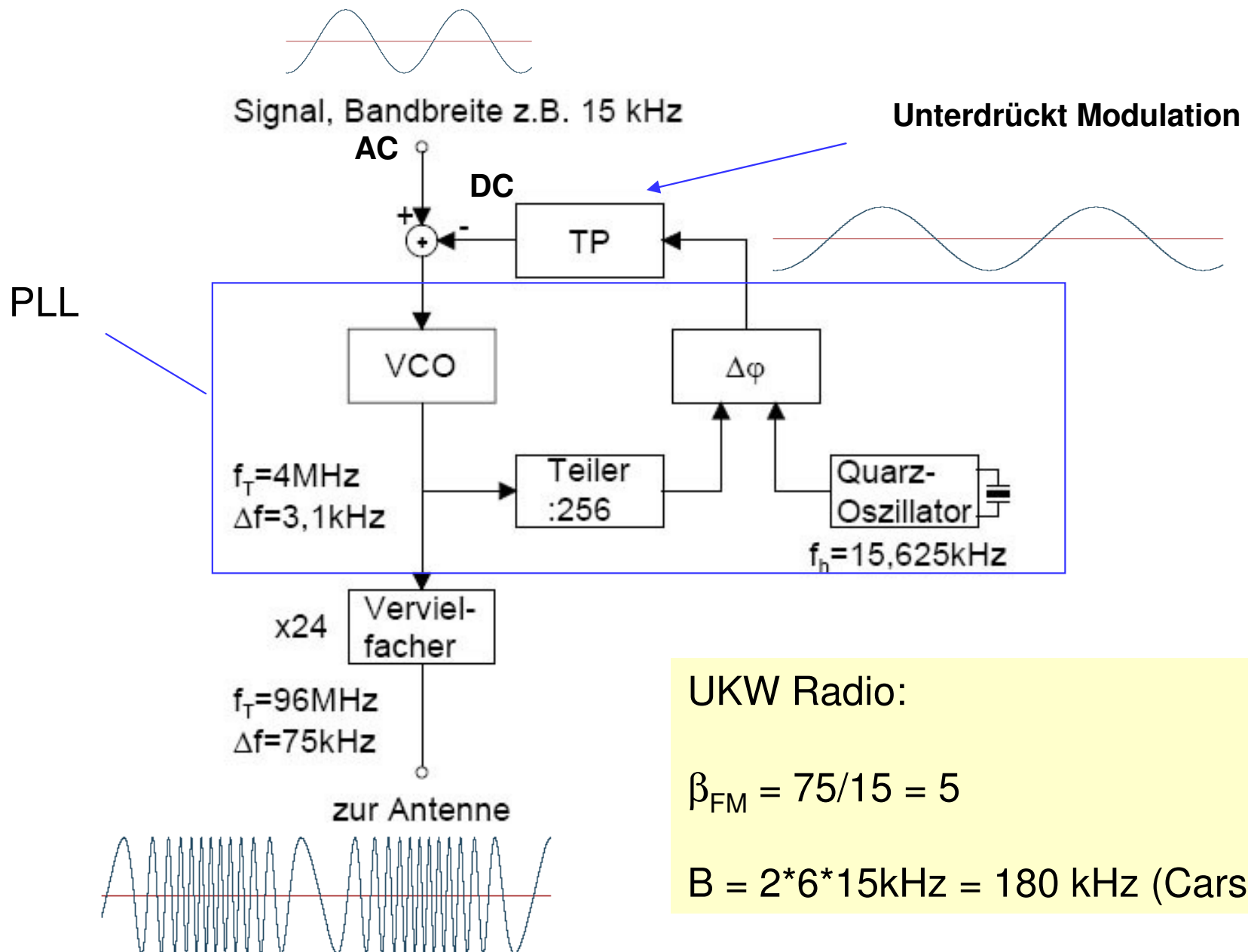
Schmalband heisst:  
 $\beta_{FM} \approx 1$  (ähnlich AM)



PLL = Phase Locked Loop (vgl. ASV Kap. Frequenzsynthese)

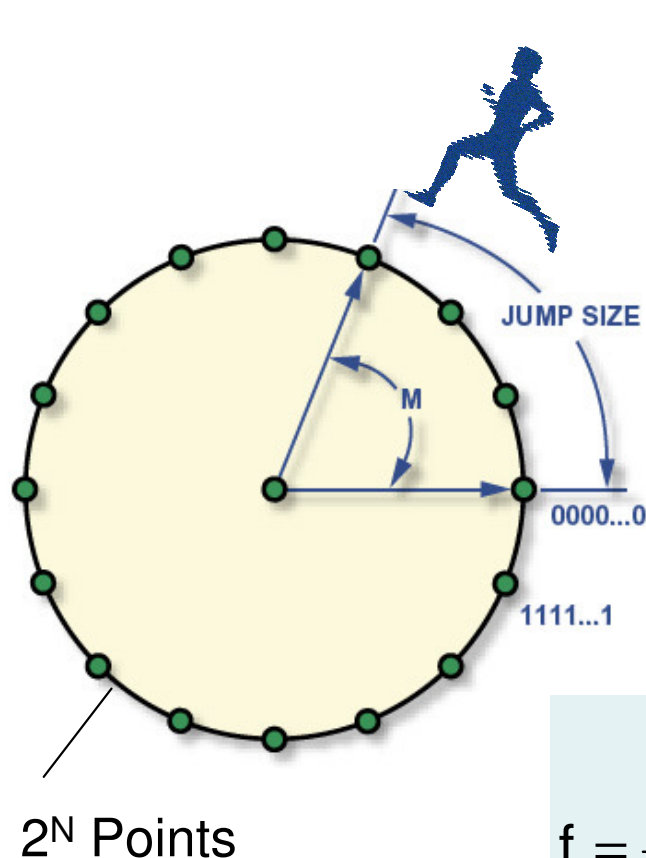


# FM Modulator UKW

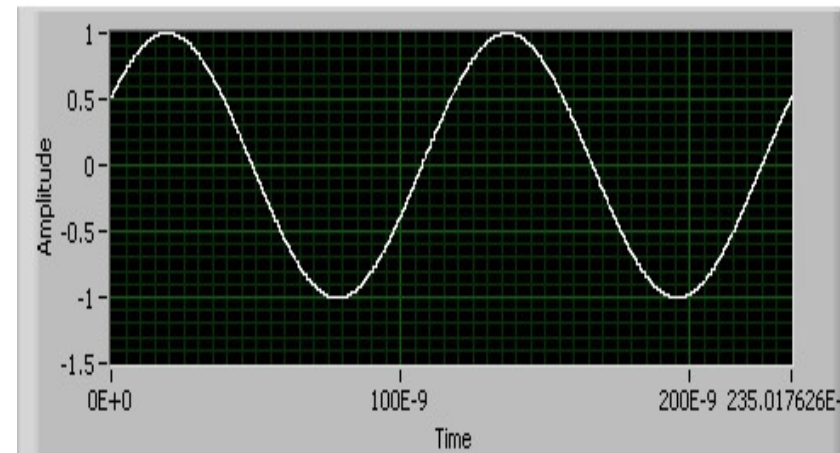


# Modern PM/FM Modulator

## Direct Digital Synthesis DDS



y-Value



Time

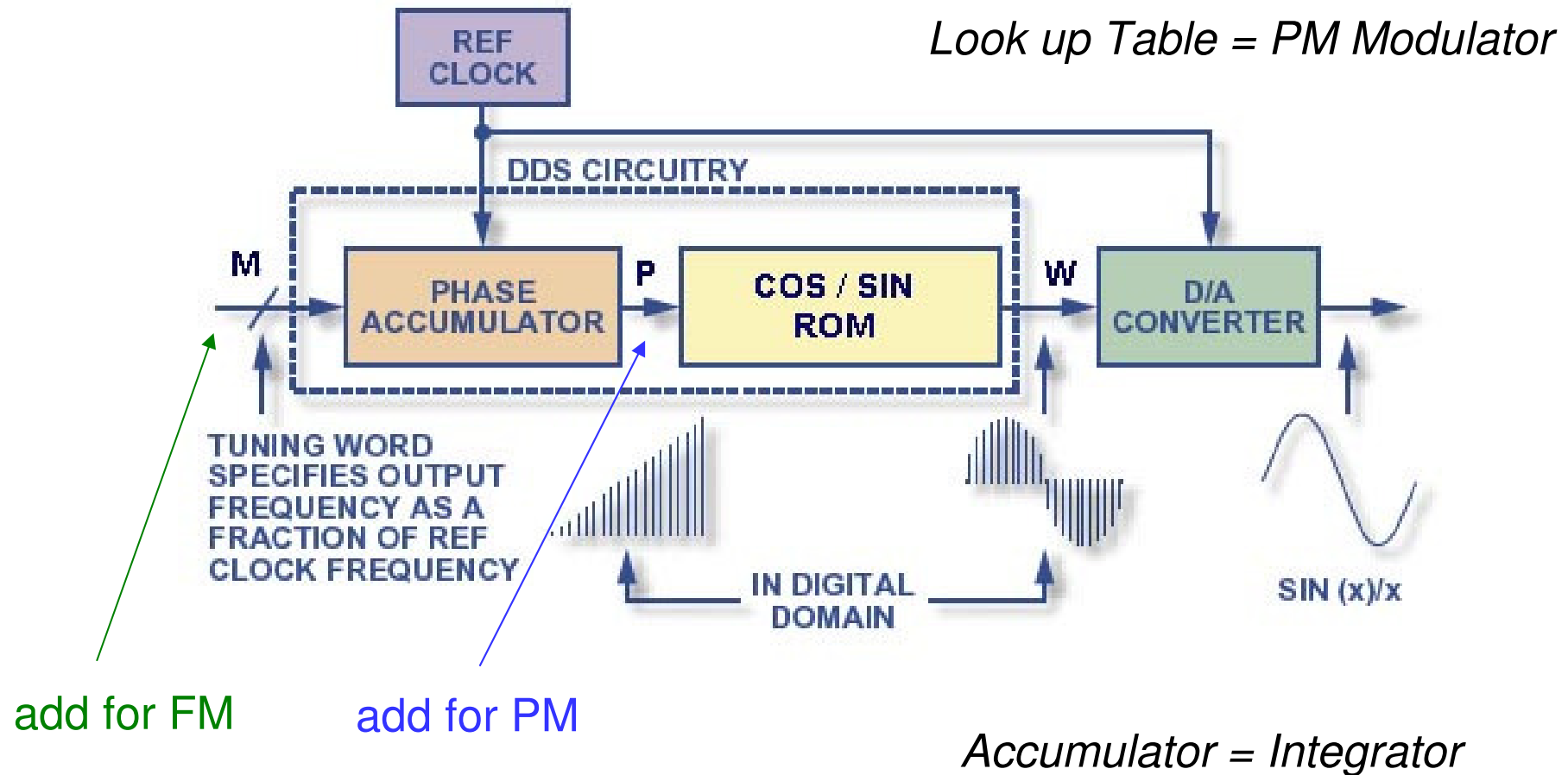
$$f = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\frac{M}{2^N}}{\frac{1}{f_{clk}}} = \frac{f_{clk}}{2^N} \cdot M$$

- Realisierbar mit DSP, FPGA
- Standard IC
- Bis Frequenzen von einigen 100 MHz

M = Frequency Tuning Word

(vgl. ASV Kap. Frequenzsynthese)

# Modern PM/FM Modulator



Variante DSP, Software Defined Radio

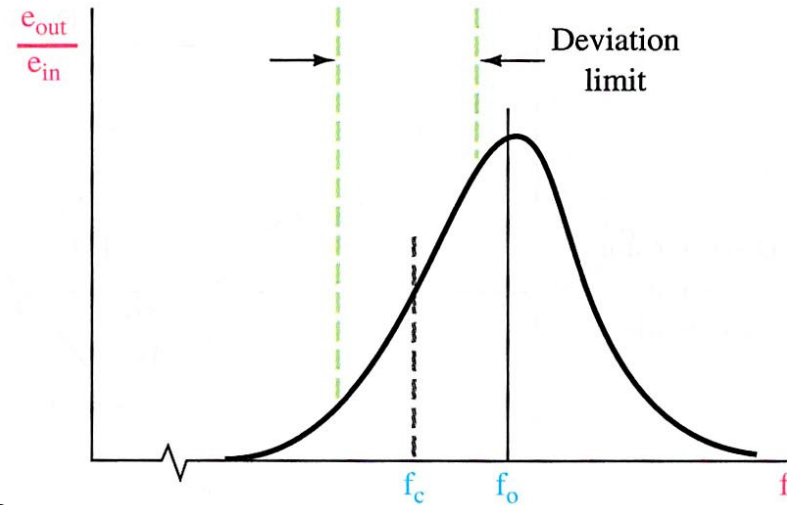
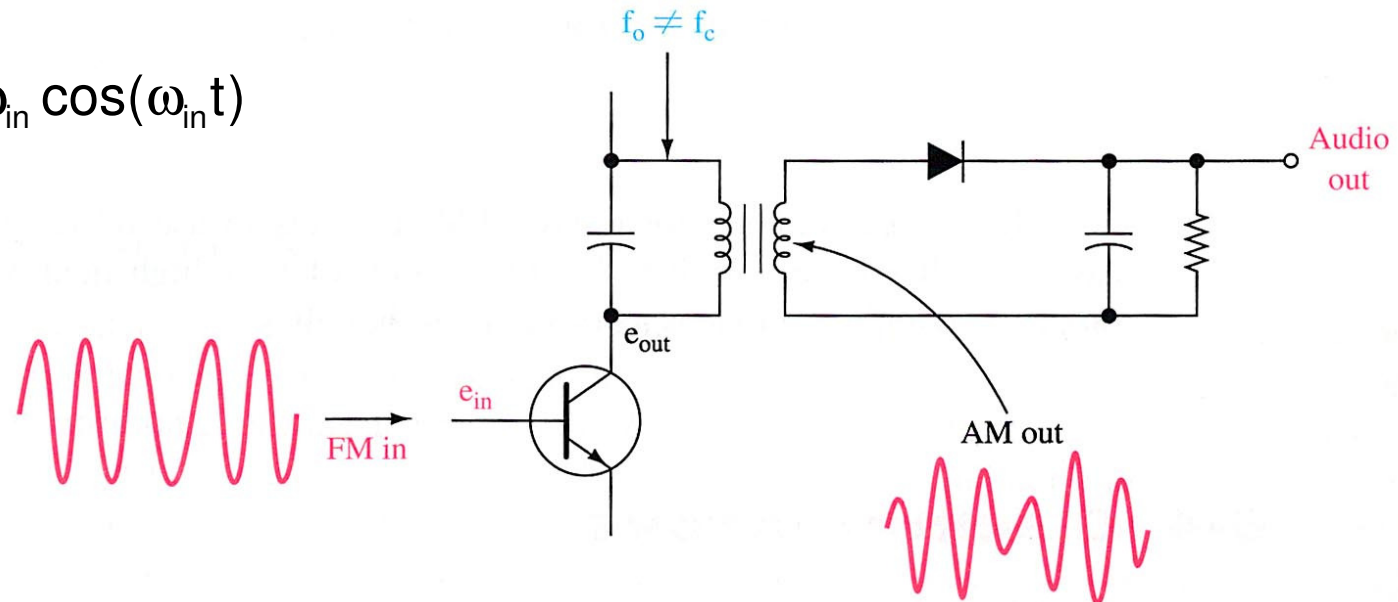
# FM Demodulator

Flanken Detektor  
(Foster-Sealy)

Typ: FM  $\rightarrow$  AM

Bei  $f_c$  wirkt Parallelschwingkreis  
wie ein Differenzierer:

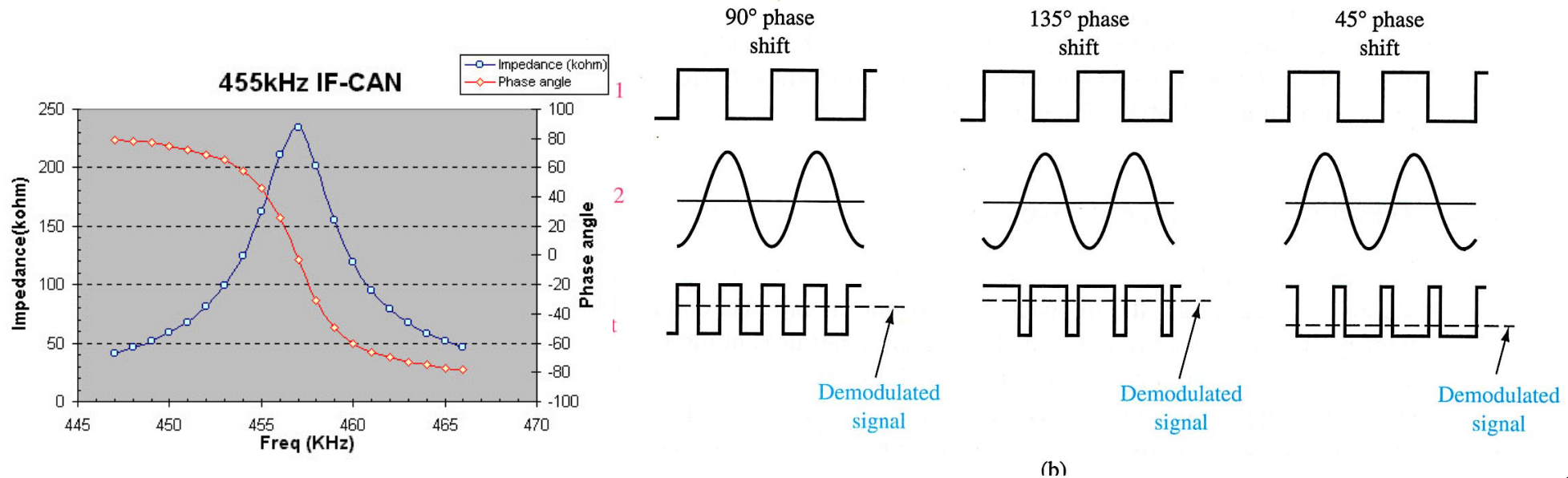
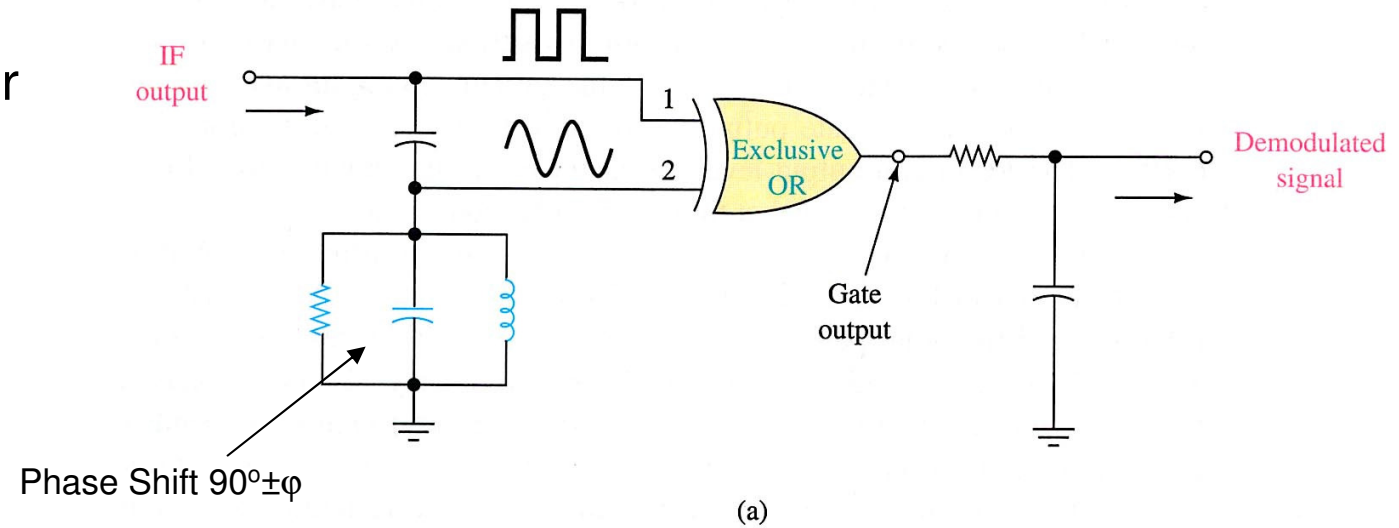
$$\frac{d\sin(\omega_{in} \cdot t)}{dt} = \omega_{in} \cos(\omega_{in} t)$$



# FM Demodulator

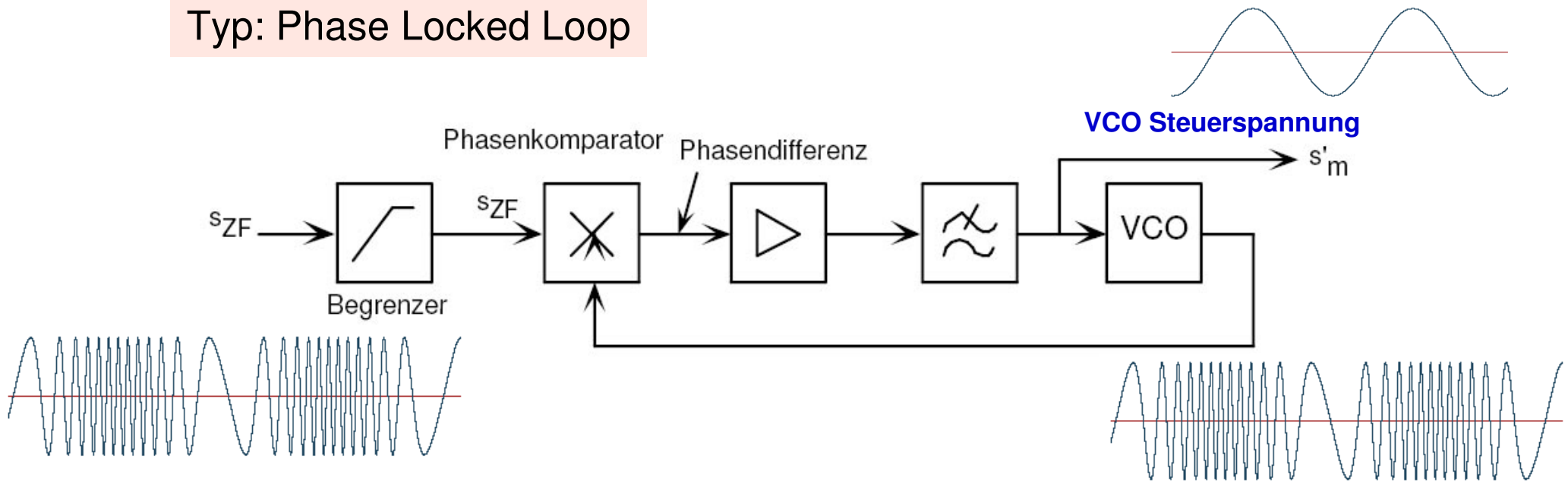
Quadraturdetektor

Typ: Phase Shift  
(digital)

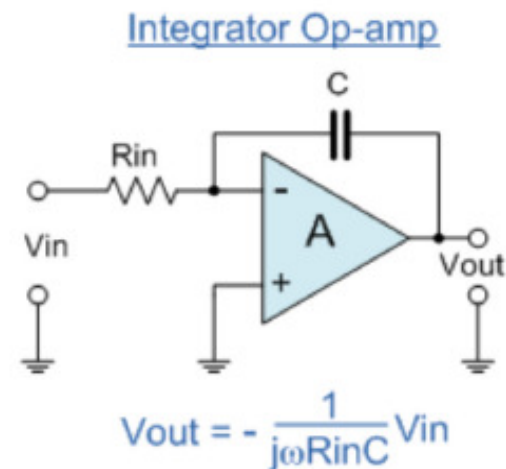


# FM Demodulator

Typ: Phase Locked Loop



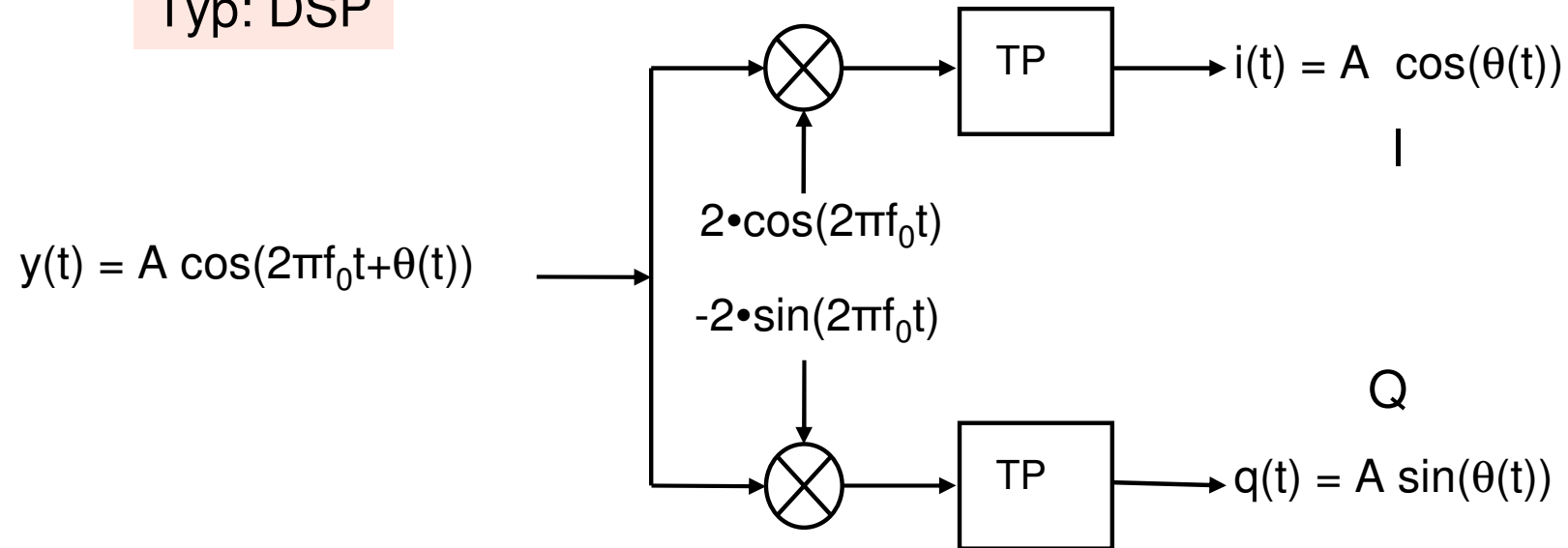
Für PM Demod: Integrator nachschalte





# FM Demodulator

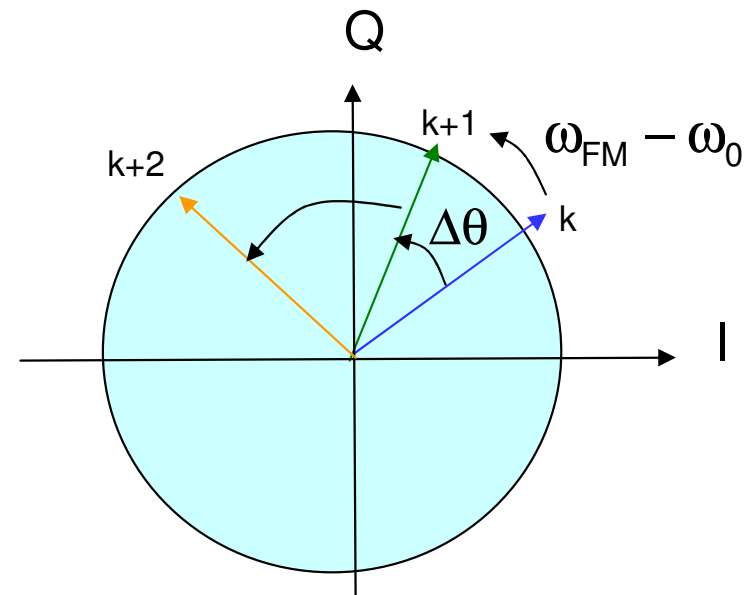
Typ: DSP



und wie könnte es damit gehen ?

$$\theta = \arctg\left[\frac{Q}{I}\right]$$

$$\omega_{\text{FM}} - \omega_0 = k_{\text{FM}} s(t) = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\Delta\theta}{T_s} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{T_s}$$

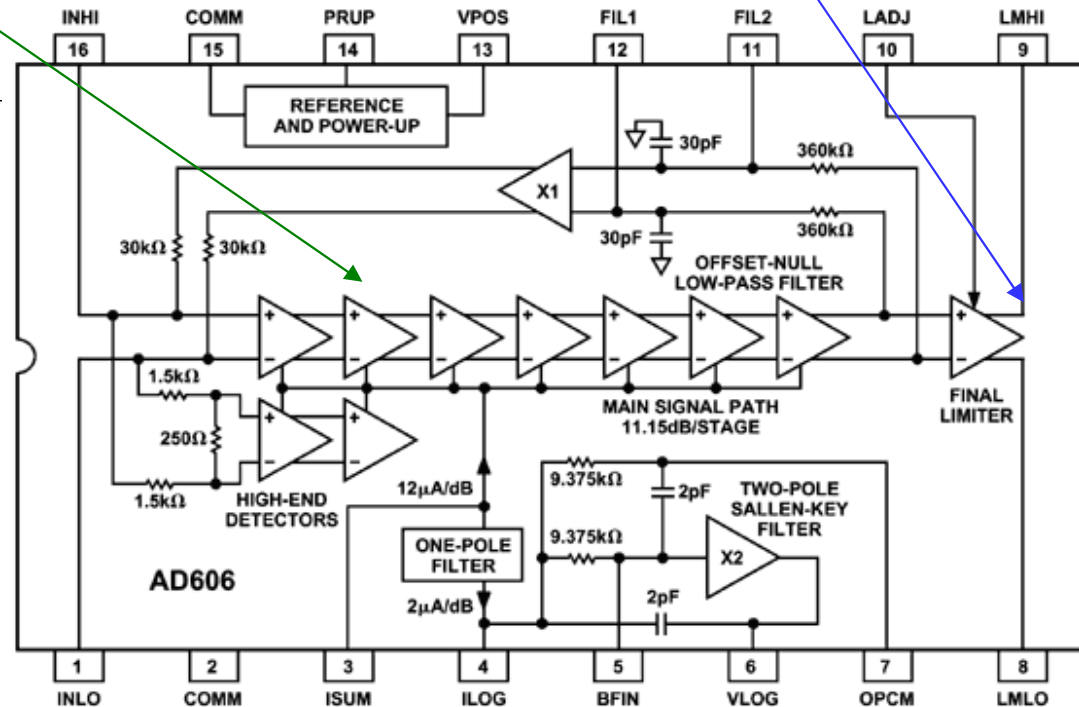
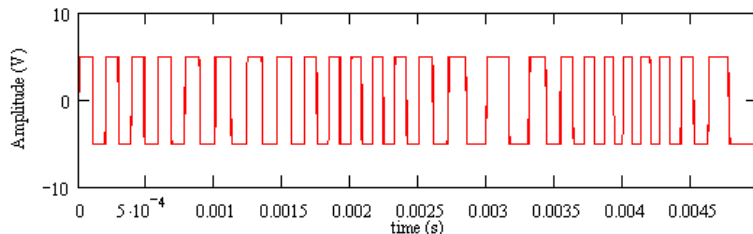
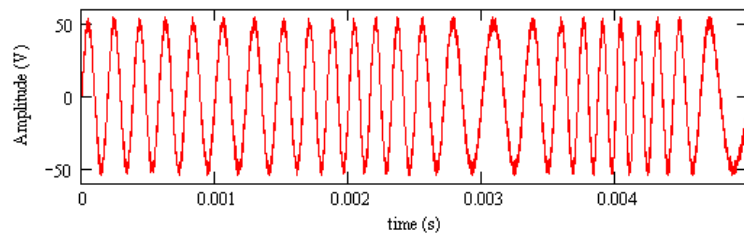


# PM / FM Verstärker / Limiter

Verstärker: Sättigung ist erlaubt **solange keine Phasenverzerrung** eintritt → Limiter  
Vorteil: Keine AGC nötig, Class C Verstärker sparen Strom

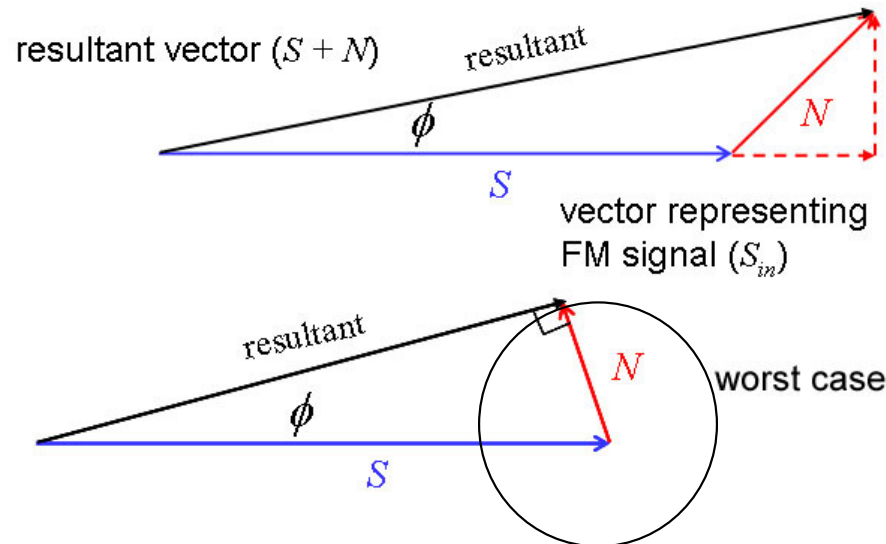
Logarithmic Amplifier Performance  
-75 dBm to +5 dBm Dynamic Range  
 $\leq 1.5 \text{ nV/Hz}^{1/2}$  Input Noise  
Usable to >50 MHz

Limiter Performance  
 $\pm 1 \text{ dB}$  Output Flatness over 80 dB Range  
 $\pm 3^\circ$  Phase Stability at 10.7 MHz over  
80 dB Range



# IF Limiter

Note: S, N sind hier Spannungen !



Limiter eliminiert N in Richtung S

Worst Case für Phasenfehler

Phasenfehler

$$\phi_{\text{noise}} = \arcsin \left[ \frac{N}{S} \right]$$

FM: relativer Frequenzfehler

$$\delta_{\text{noise}} = \phi_{\text{noise}} \cdot f_m \quad \text{maximal bei max. } f_m$$

Worst Case S/N Verbesserung  
durch FM Spreizung

$$\frac{S_{\text{out}}}{N_{\text{out}}} = \frac{\Delta f}{\delta_{\text{noise}}} = \frac{\Delta f}{f_m} \frac{1}{\arcsin \left[ \frac{N}{S} \right]} = \beta_{\text{FM}} \frac{1}{\arcsin \left[ \frac{N}{S} \right]}$$

Für geringes Rauschen gilt:  
S/N wird um Faktor Modulationsindex  $\beta_{\text{FM}}$  verbessert

# Beispiel UKW Radio

Gegeben: S, N (hier Spannungen)

S/N am Empfänger Eingang: S/N = 10

max. Modulationsfrequenz:  $f_m = 15$  kHz,

Hub (max. deviation):  $\Delta f = 75$  kHz.

$$\phi_{\text{noise}} = \arcsin\left[\frac{N}{S}\right]$$

max. Phasenfehler

$$\delta_{\text{noise}} = \phi_{\text{noise}} \cdot f_m$$

rel. Frequenzfehler für  $f_m$

$$\frac{S_{\text{out}}}{N_{\text{out}}} = \frac{\Delta f}{\delta_{\text{noise}}} = \frac{\Delta f}{f_m} \frac{1}{\arcsin\left[\frac{N}{S}\right]} = \beta_{\text{FM}} \frac{1}{\arcsin\left[\frac{N}{S}\right]}$$

**Lösung:**  $\beta_{\text{FM}} = 5$

$$\phi_{\text{noise}} = \arcsin(1/10) = 0.100 \text{ rad} \quad (5.74^\circ)$$

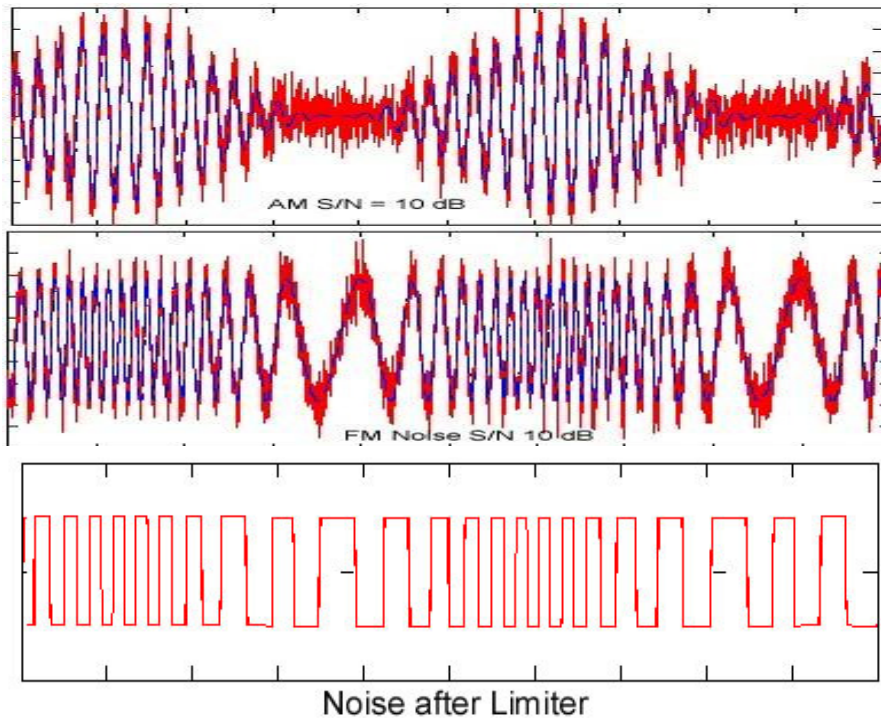
$$\delta_{\text{noise}} = 1500 \text{ Hz}$$

$$S_{\text{out}}/N_{\text{out}} = 50$$

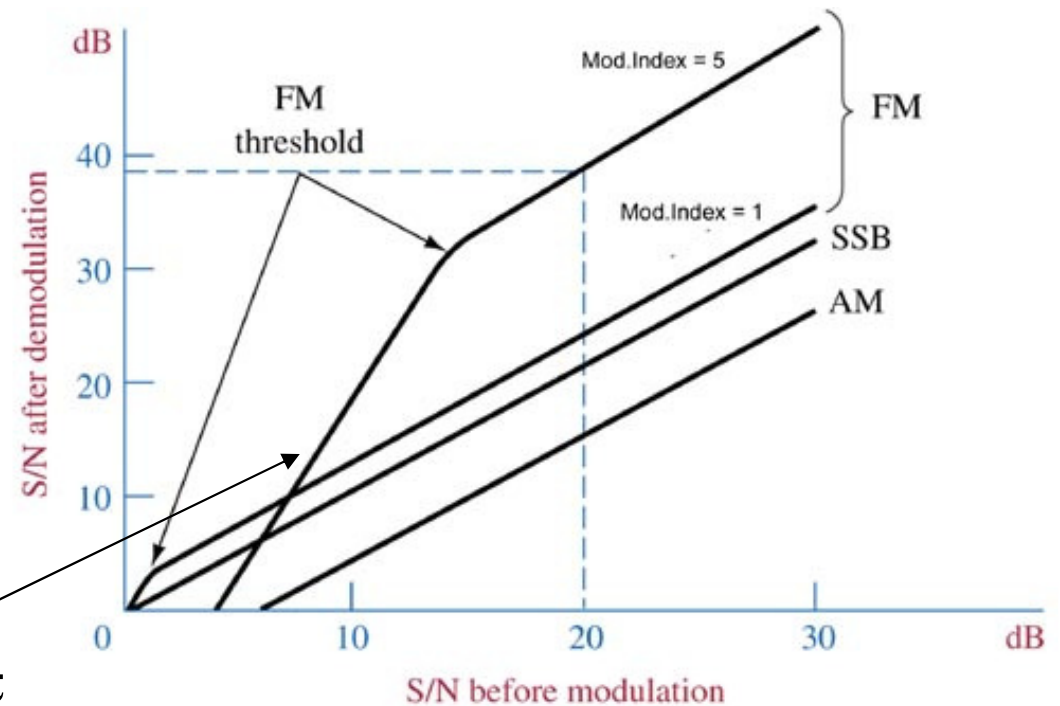
$$\text{Verbesserung in dB: } 20 \log(50/10) = 14 \text{ dB}$$



# FM Rauschunterdrückung



Infolge Phasensprünge  $> 2\pi$



Der Limiter führt auch zum so genannten Capture Effect:  
Bei zwei Signalen wird das schwächere unterdrückt (wie Noise)