

## Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

**BPSK**

**FM**

**PM**

**FSK**

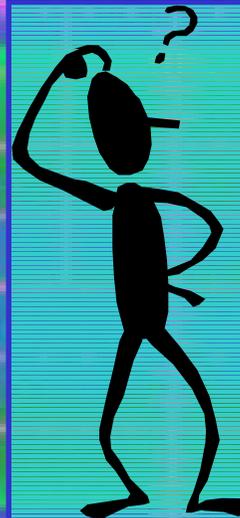
**ASK**

**AM**

**FDM**

**PSK**

**GMSK**

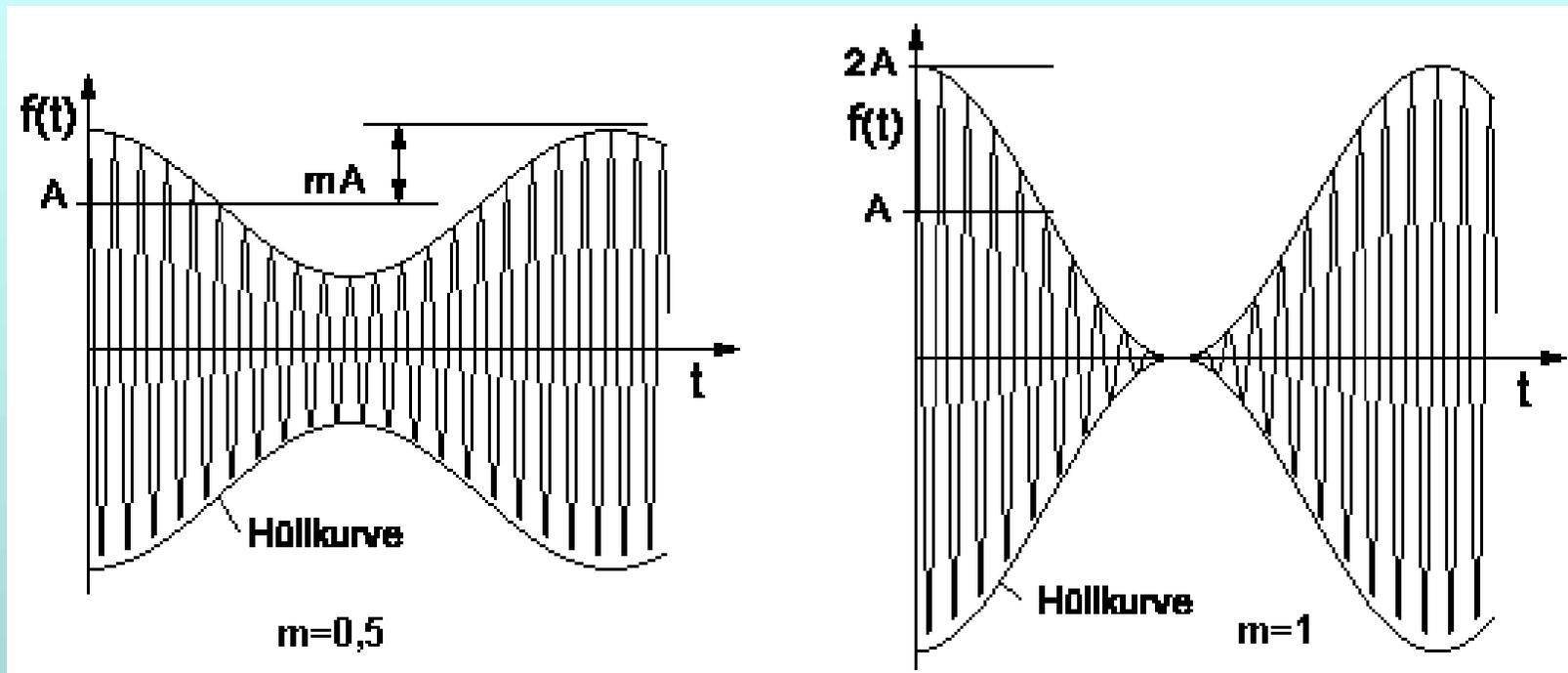


**64-QAM**

**OFDM**

**AFSK**

## Die Amplitudenmodulation - AM



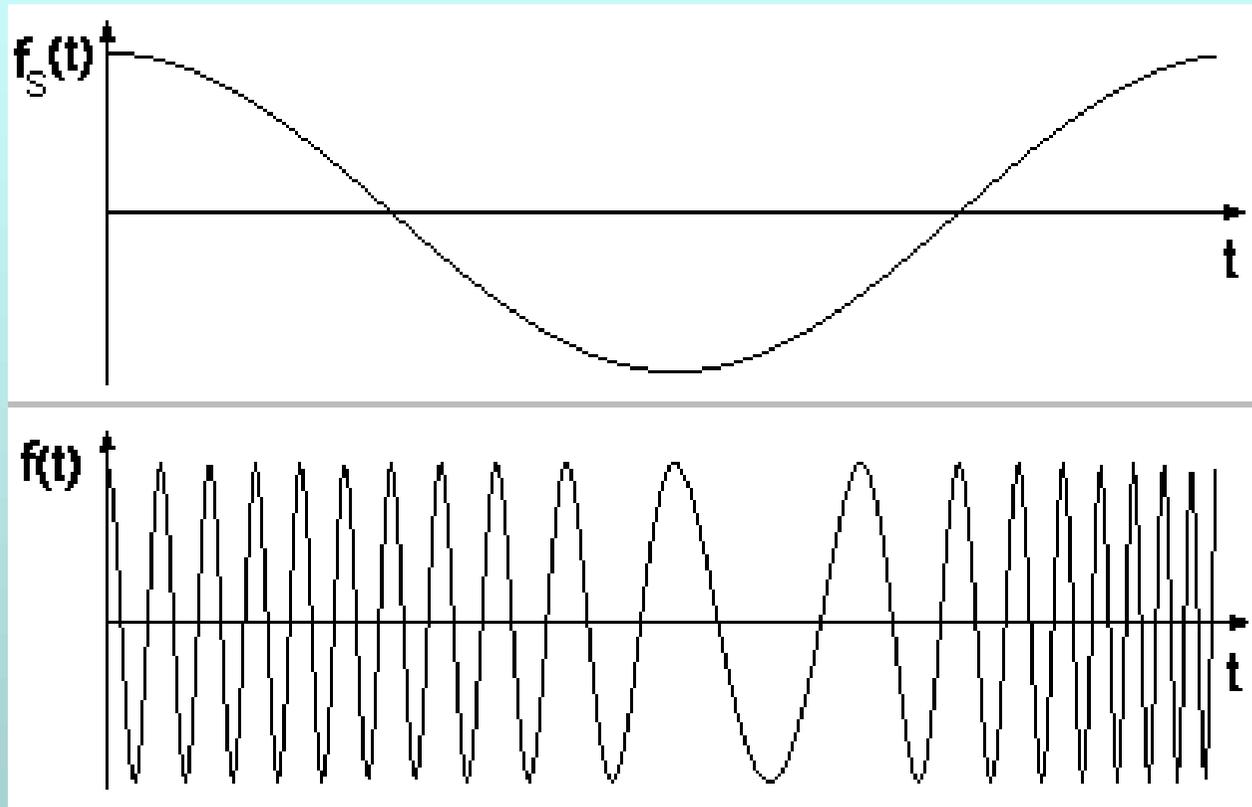
$$u_0(t) = A \times (1 + m \times \cos(\omega_M \times t)) \times \cos(\omega_T \times t)$$

$m$  = Modulationsgrad 0 ...  $m$  ... 1

$m$  = Amplitudenverhältnis:  $A(\text{NF}) / A(\text{HF})$

## Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

### Die Winkelmodulation: Frequenzmodulation FM und Phasenmodulation PM



$$\text{FM: } u_0(t) = A \times \cos(\omega_T \times t + M \times \sin(\omega_M \times t))$$

$\Delta\phi$ , M:

$$\text{PM: } u_0(t) = A \times \cos(\omega_T \times t + \Delta\phi \times \sin(\omega_M \times t))$$

Modulationsindex

# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

---

## Modulationsindex und Modulationsgrad bei FM

**Modulationsindex:**

$$M = \Delta\omega / \omega_M$$

Der Modulationsindex M ist das Verhältnis der Frequenzänderung des Ausgangssignals zur Modulationsfrequenz ("NF")

**Modulationsgrad:**

$$G = \Delta\omega / \omega_T$$

Im Gegensatz dazu ist der Modulationsgrad G das Verhältnis der Frequenzänderung des Ausgangssignals zur Trägerfrequenz ("HF"):

## Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

---

In der Praxis wird bei FM i.A. der Modulationsindex M verwendet.

Wenn  $\Delta\omega$  kleiner als 5kHz ist, spricht man von Schmalband-FM, darüber von Breitband-FM.

Das entspricht  $M < 1 \dots 2$  für Schmalband-FM, und  $M > 3$  für Breitband-FM.

### Ein interessantes Thema: Bandbreite bei FM

**Im Gegensatz zu einer sauber modulierten AM oder SSB hat FM keine exakt definierbare Bandbreite !**

Abhängig vom Modulationsgrad ergibt sich eine Verteilung der Seitenbänder nach der "Besselfunktion".  
Je nach M können Seitenbänder mit einer höheren Ordnungsnummer größer sein als die mit der niedrigeren Ordnungsnummer und dabei noch die Phasenlage wechseln !

**Ein ideal und linear modulierte FM-Signal hat  
THEORETISCH  
eine unendliche Bandbreite**

## Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

Die Bandbreite des FM-Signals ist als derjenige Frequenzbereich definiert, in dem 99% der übertragenen Leistung liegen.

Näherungsweise ergibt sich mit  $f_M$  = (maximale) Modulationsfrequenz (NF) für

$$M \ll 1: B_{\text{HF}} = 2 \times (M+2) \times f_M$$

$$M \cong 1: B_{\text{HF}} = 2 \times (M+1) \times f_M \text{ (gilt mit zunehmendem Fehler auch für } M > 1)$$

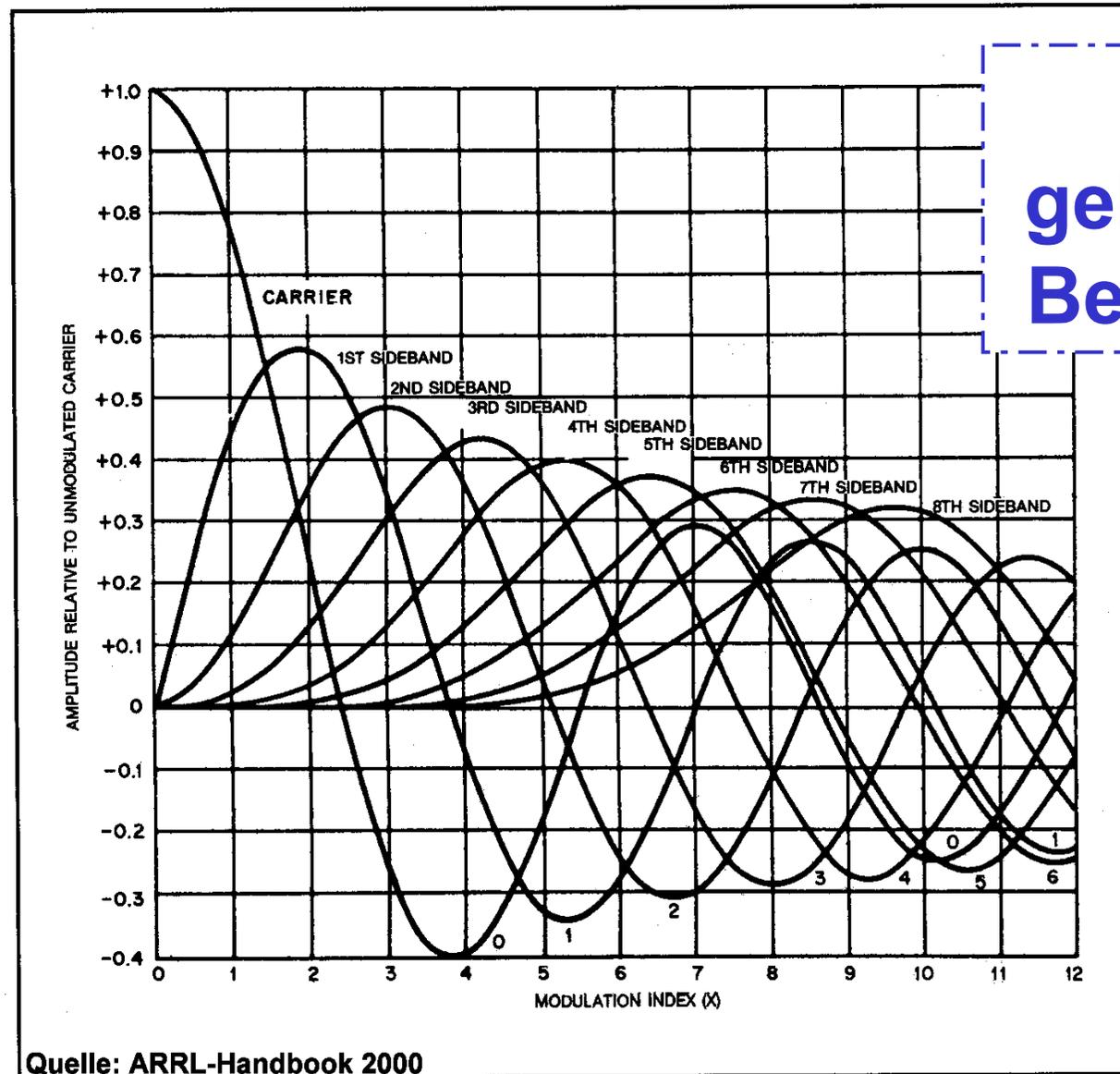
Beispiel:  $f_M = 3\text{kHz}$  (Sprache), eingestellter Hub = 5kHz.

Ergebnis:  $M = 5/3 = 1,67$ ;  $B_{\text{HF}} = 2 \times (1,67+1) \times 3\text{kHz} = 16\text{kHz}$ ;  
(tatsächlich etwas mehr)

Ergibt sich auch aus der bekannten Formel:

$$B_{\text{HF}} = 2 \times (\text{Hub} + \text{Modulationsfrequenz})$$

# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk



Quelle: ARRL-Handbook 2000

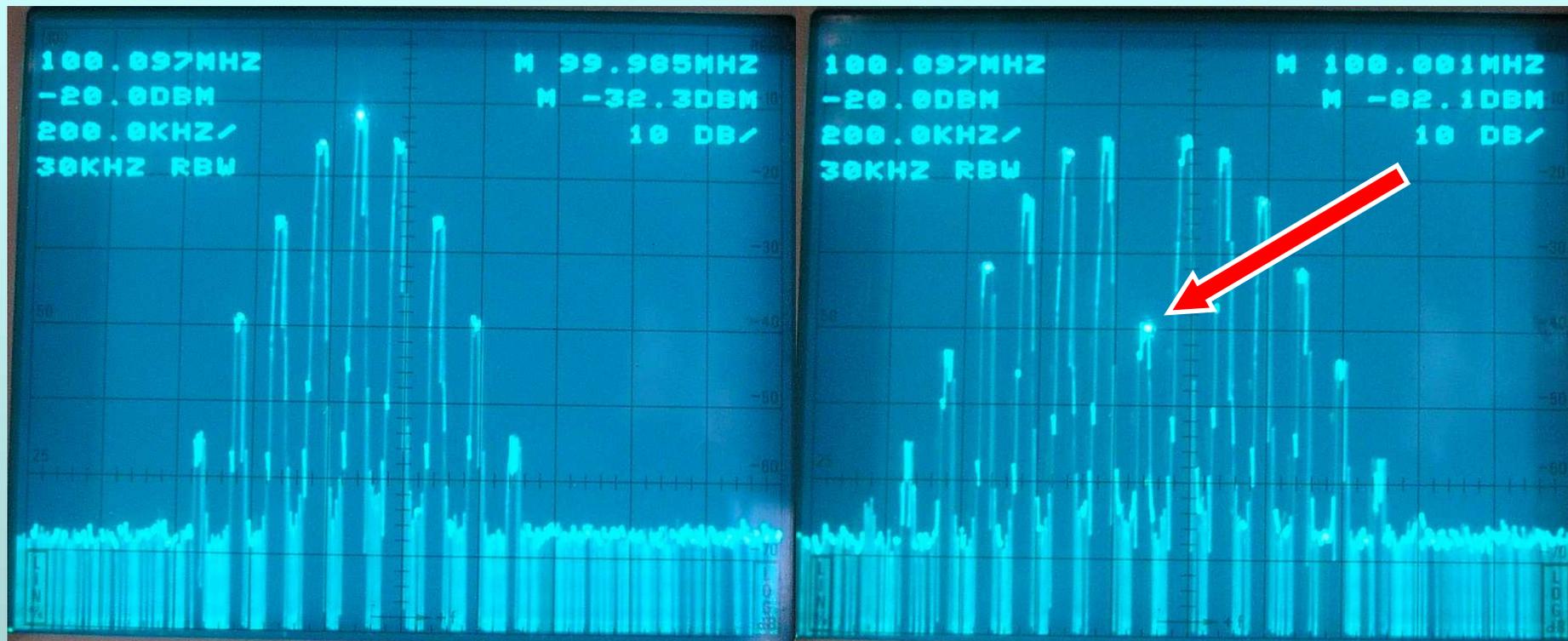
## Die geheimnisvolle Besselfunktion



Jetzt zaubern  
wir ....

# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

## Beispiel für die erste Nullstelle im Bessel-Diagramm



$$f_M = 100\text{kHz} \quad \text{Hub} = 100\text{kHz} \quad f_M = 100\text{kHz} \quad \text{Hub} = 230\text{kHz}$$
$$M = 1 \longleftarrow M = \Delta\omega / \omega_M \longrightarrow M = 2,3$$

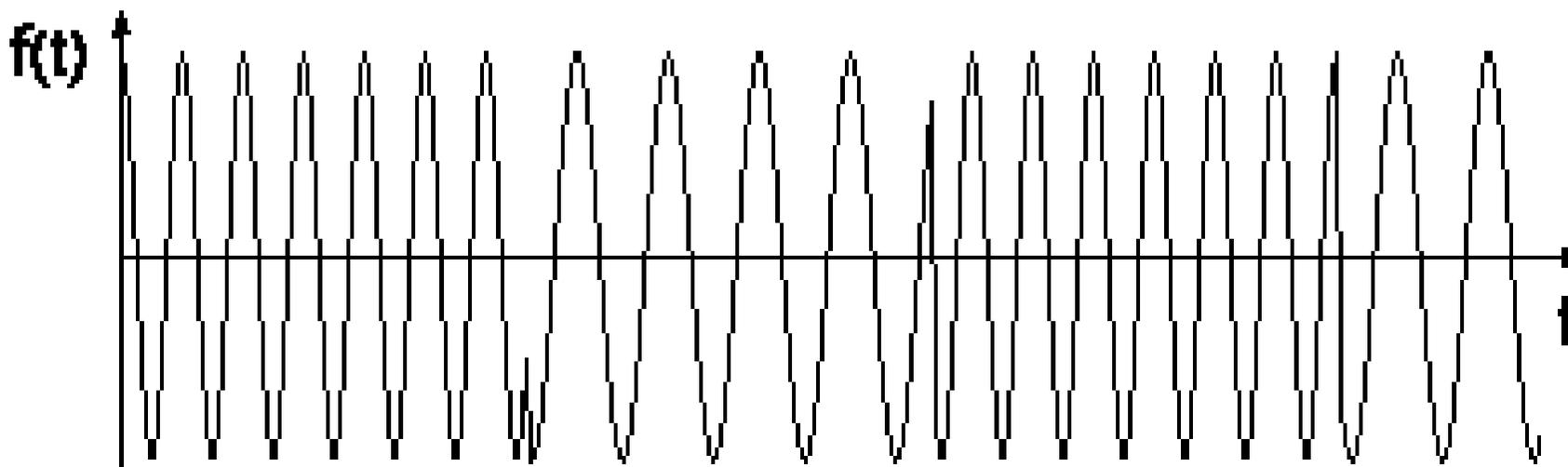
Träger „verschwindet“

# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

## Die Frequenzumtastung - FSK

Frequency-Shift-Keying

FSK = Sonderfall der FM; Ausgangsfrequenz kann nur zwei Frequenzen annehmen. Im Takt des modulierenden Signals wird dabei die Frequenz der HF umgetastet.

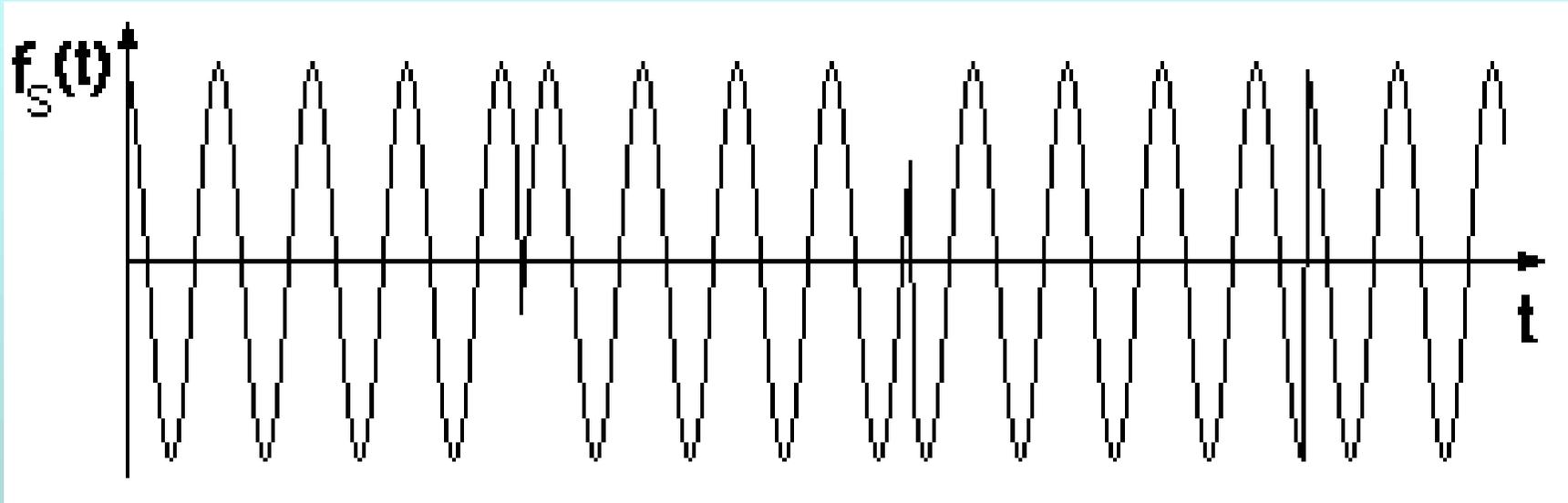


FSK kann entweder über einen FM-Modulator erzeugt werden ("direkte" FSK), oder über einen modulierten Ton-Hilfsträger wie z.B. bei RTTY auf Kurzwelle mit einem SSB-Sender (**A**udio **F**requency **S**hift **K**eying AFSK).

# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

## Die Phasenumtastung - PSK

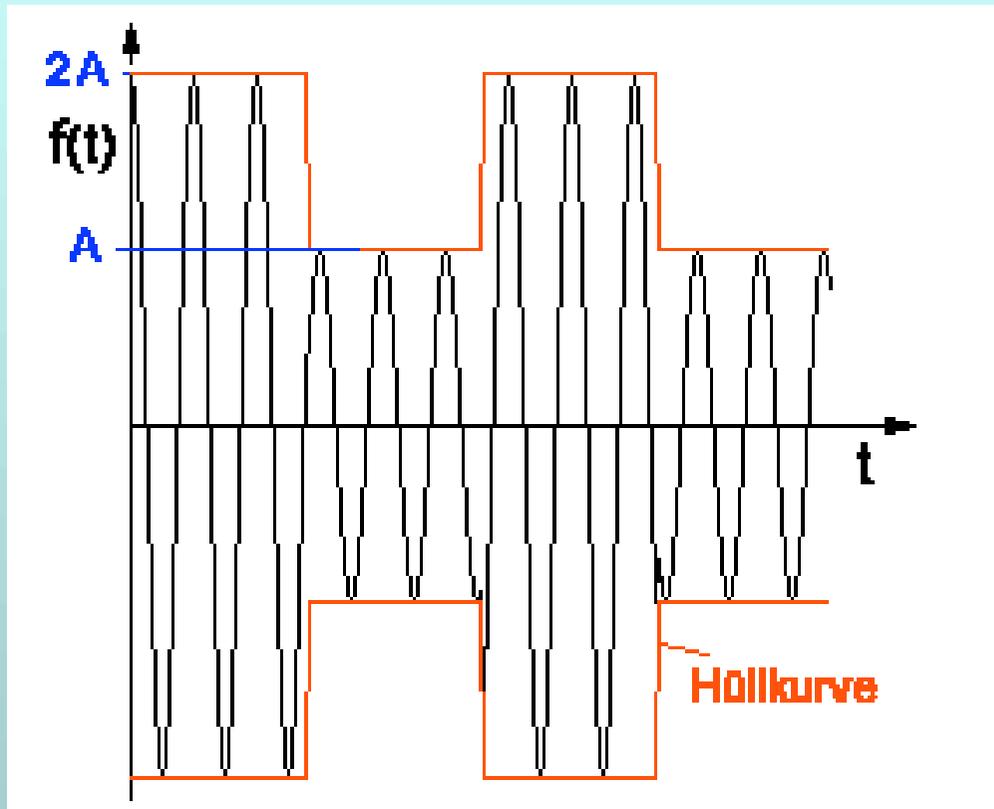
Phase-Shift-Keying



**Im Gegensatz zur FSK bleibt bei der PSK die Frequenz unverändert!**

## Amplitudenumtastung - ASK

Amplitude-Shift-Keying

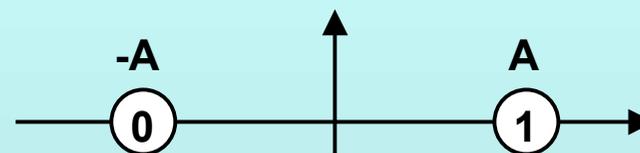
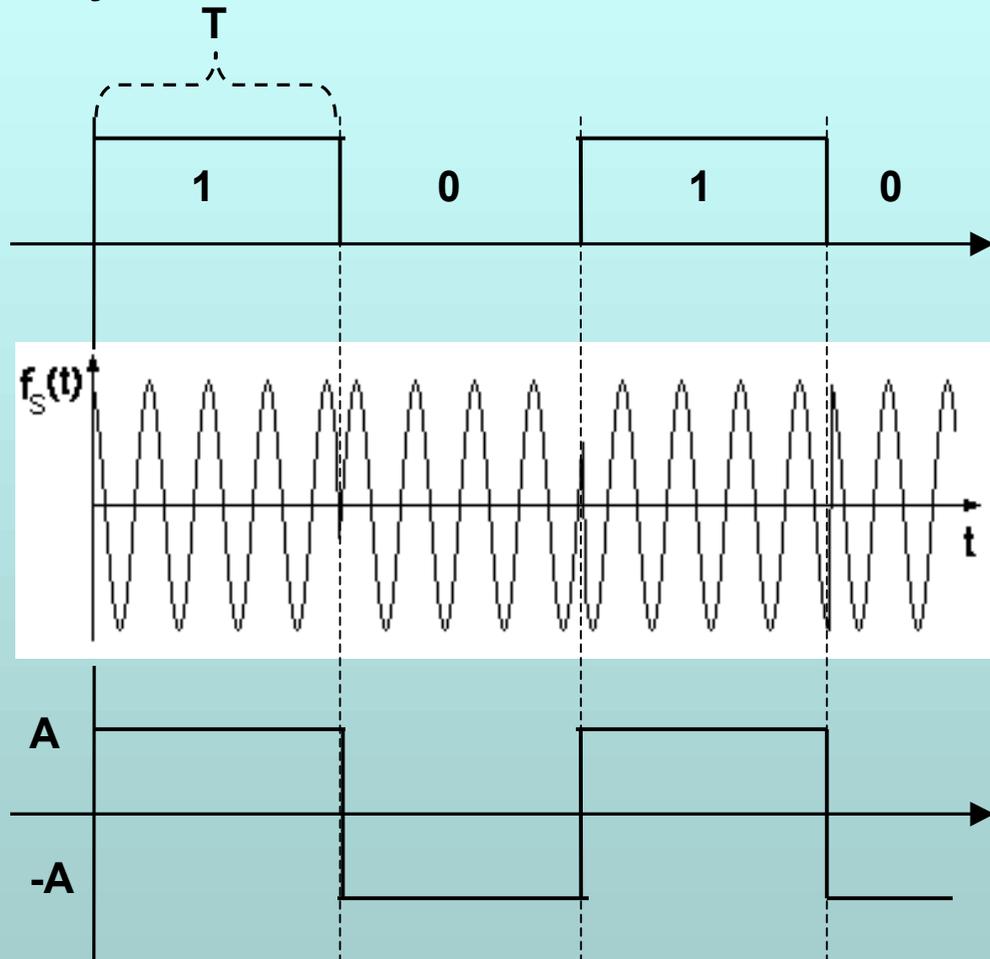


# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

## 2-ASK & 2-PSK (BPSK)

Bi-Phase-Shift-Keying

Symboldauer:

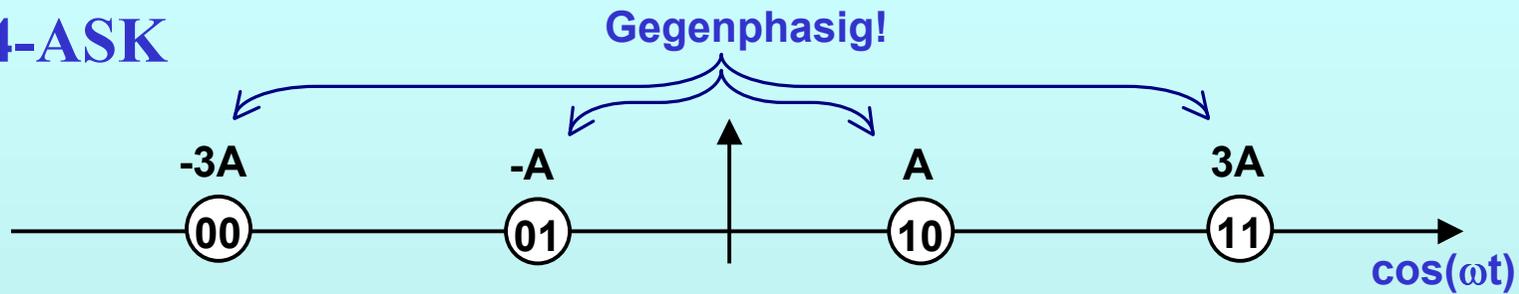


1 Bit / Symboldauer

Phasendrehung um 180 Grad  
=  
Vorzeichenumkehr der Amplitude

# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

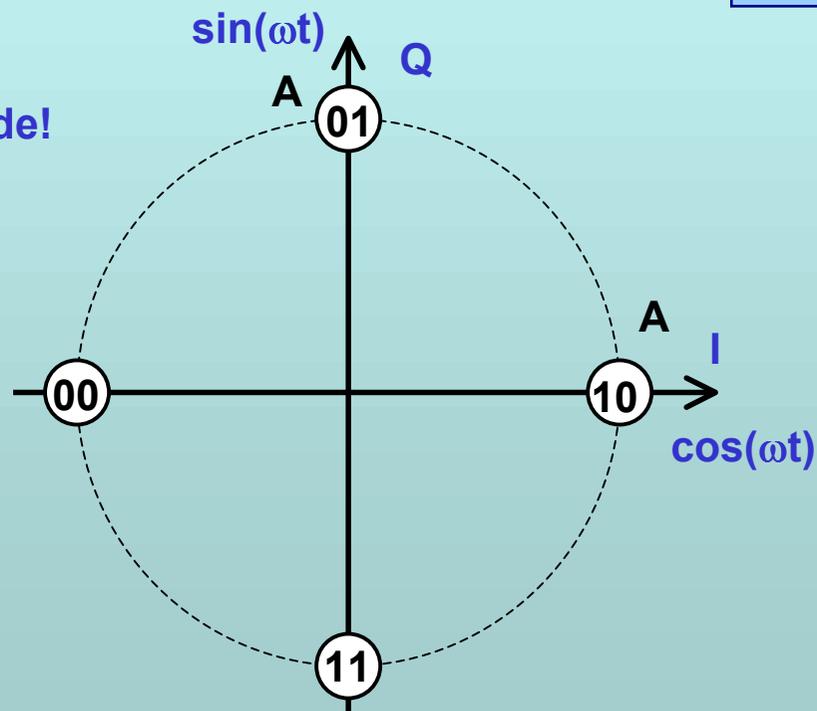
## 4-ASK



2 Bit / Symboldauer

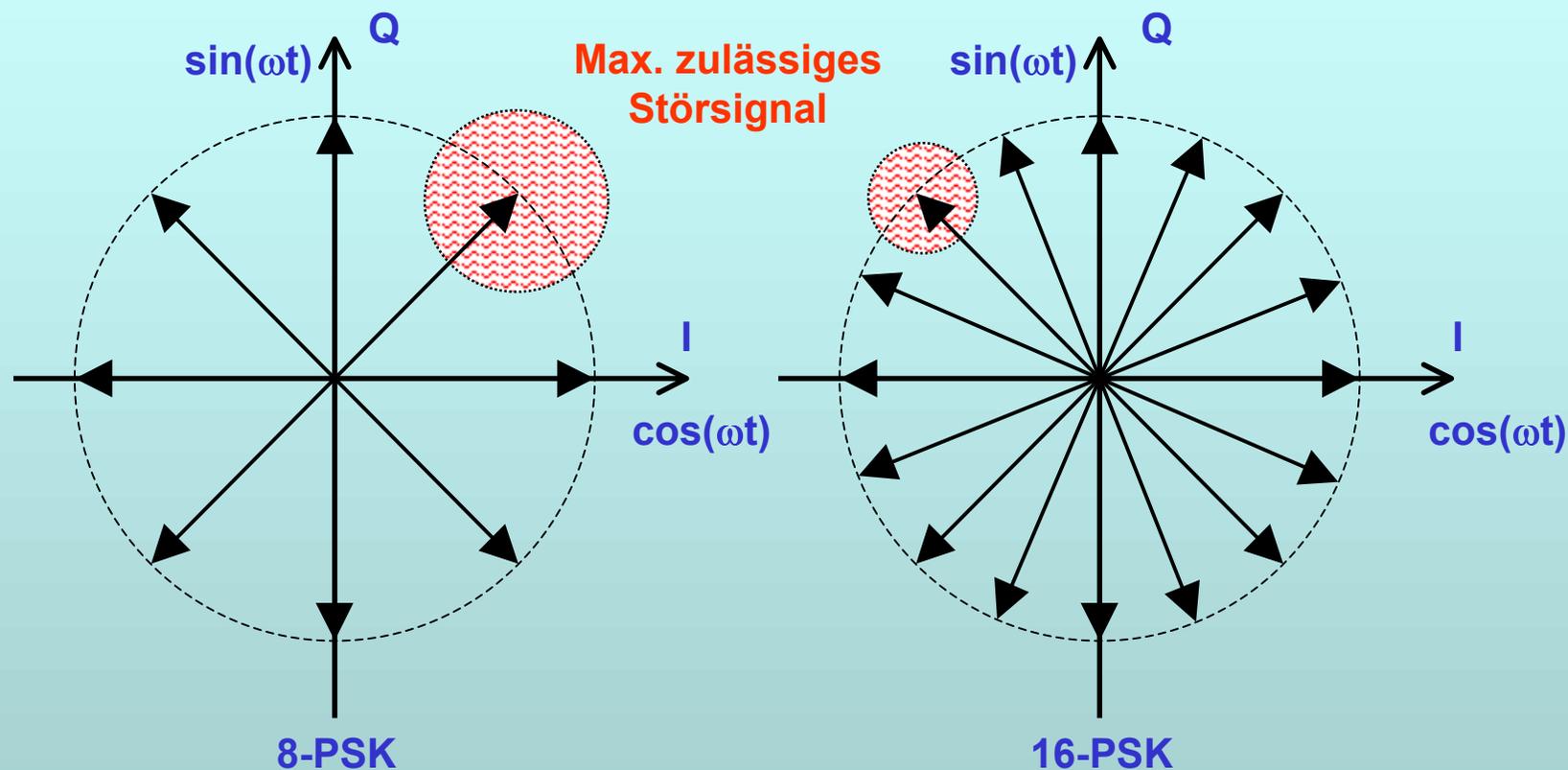
## 4-PSK

Konstante Amplitude!



## Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

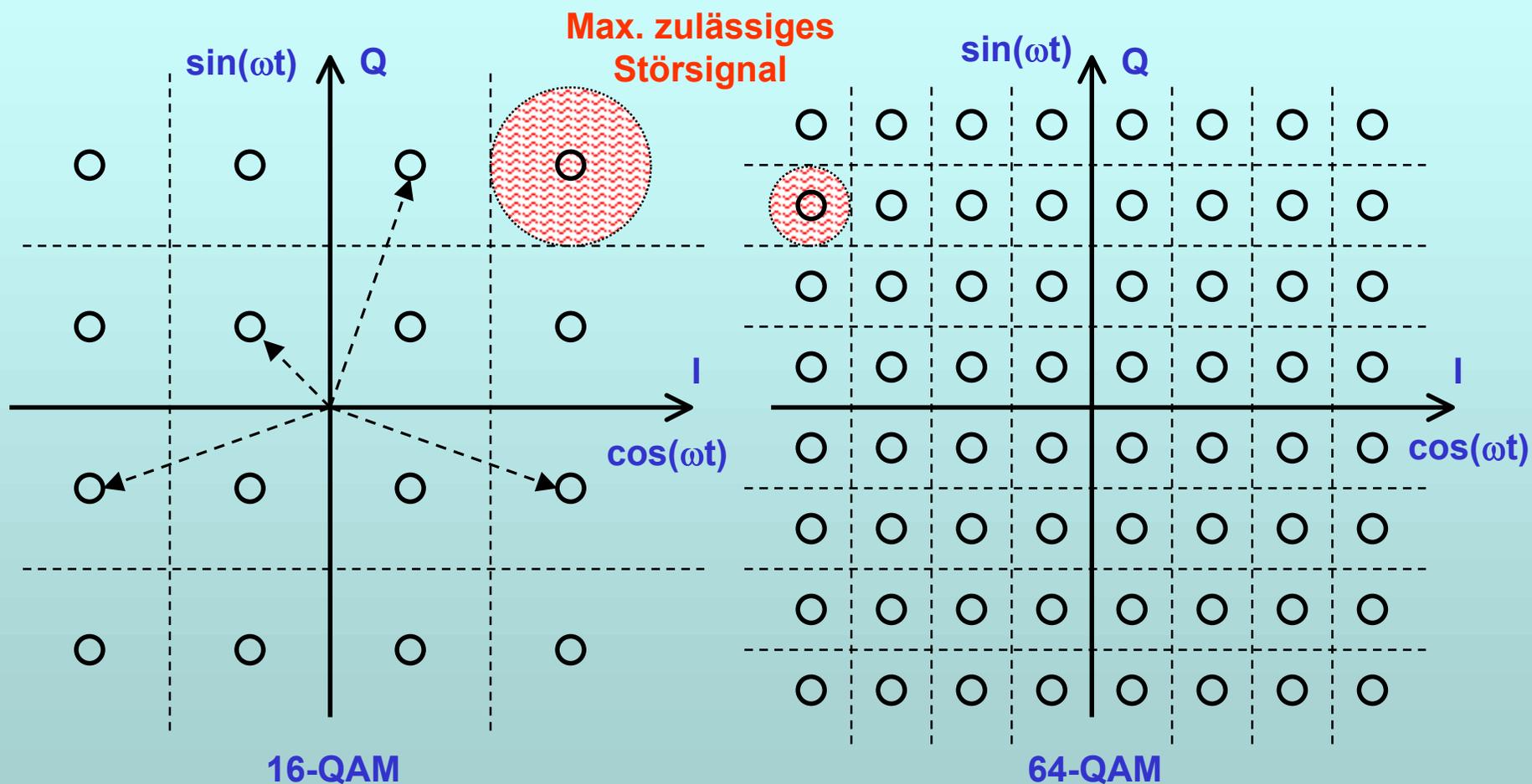
### Die „höherwertige“ Phasenumtastung z.B.: 8-PSK, 16-PSK



**NUR** Modulation der Phase: Mit steigender Anzahl von Zuständen wird der Empfang schwieriger („Signal-Störabstand“)

## Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

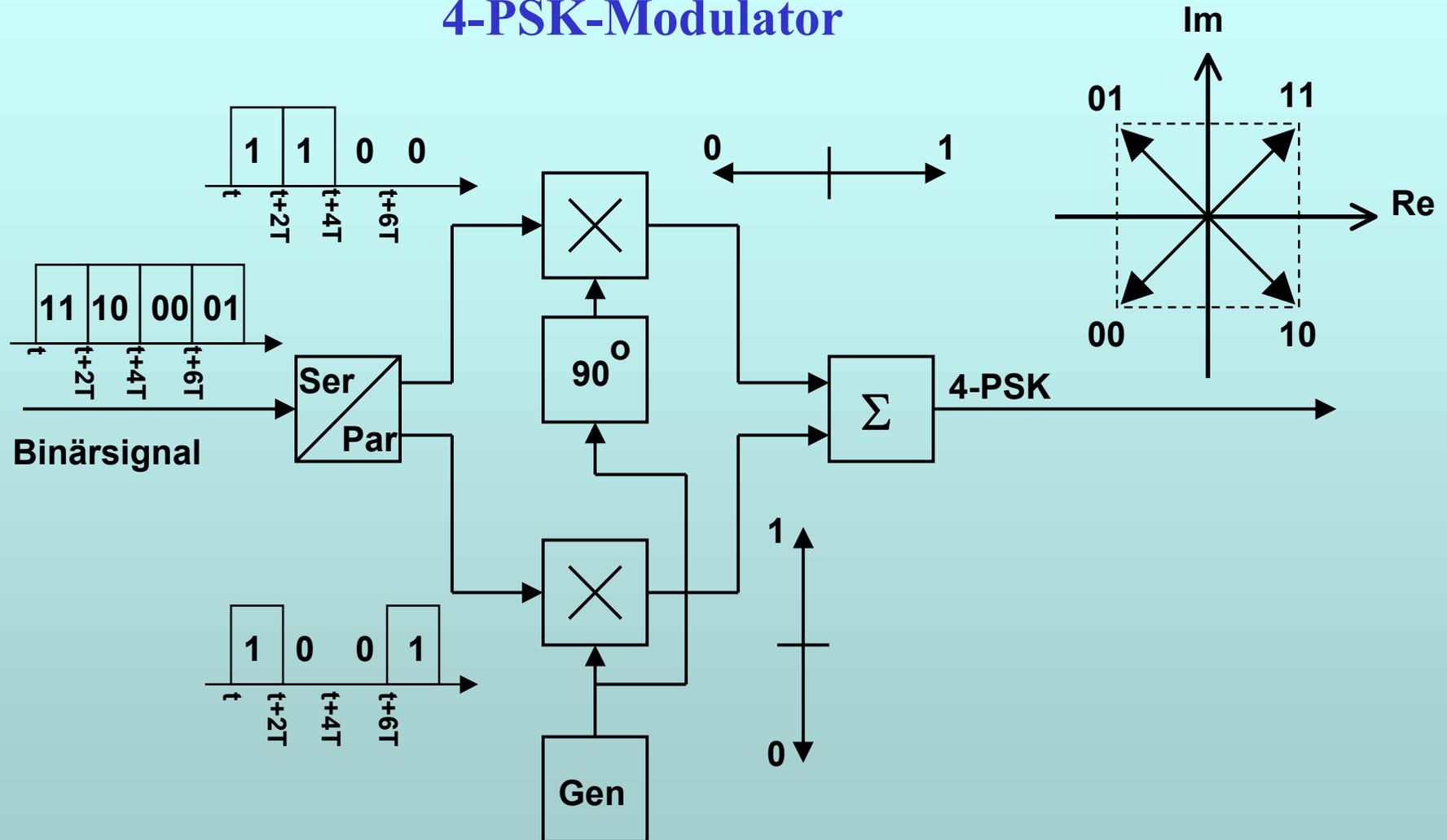
### Die Quadraturamplitudenmodulation z.B.: 16-QAM, 64-QAM



Modulation von Phase **UND** Amplitude: Bessere Ausnutzung des Modulationsraumes

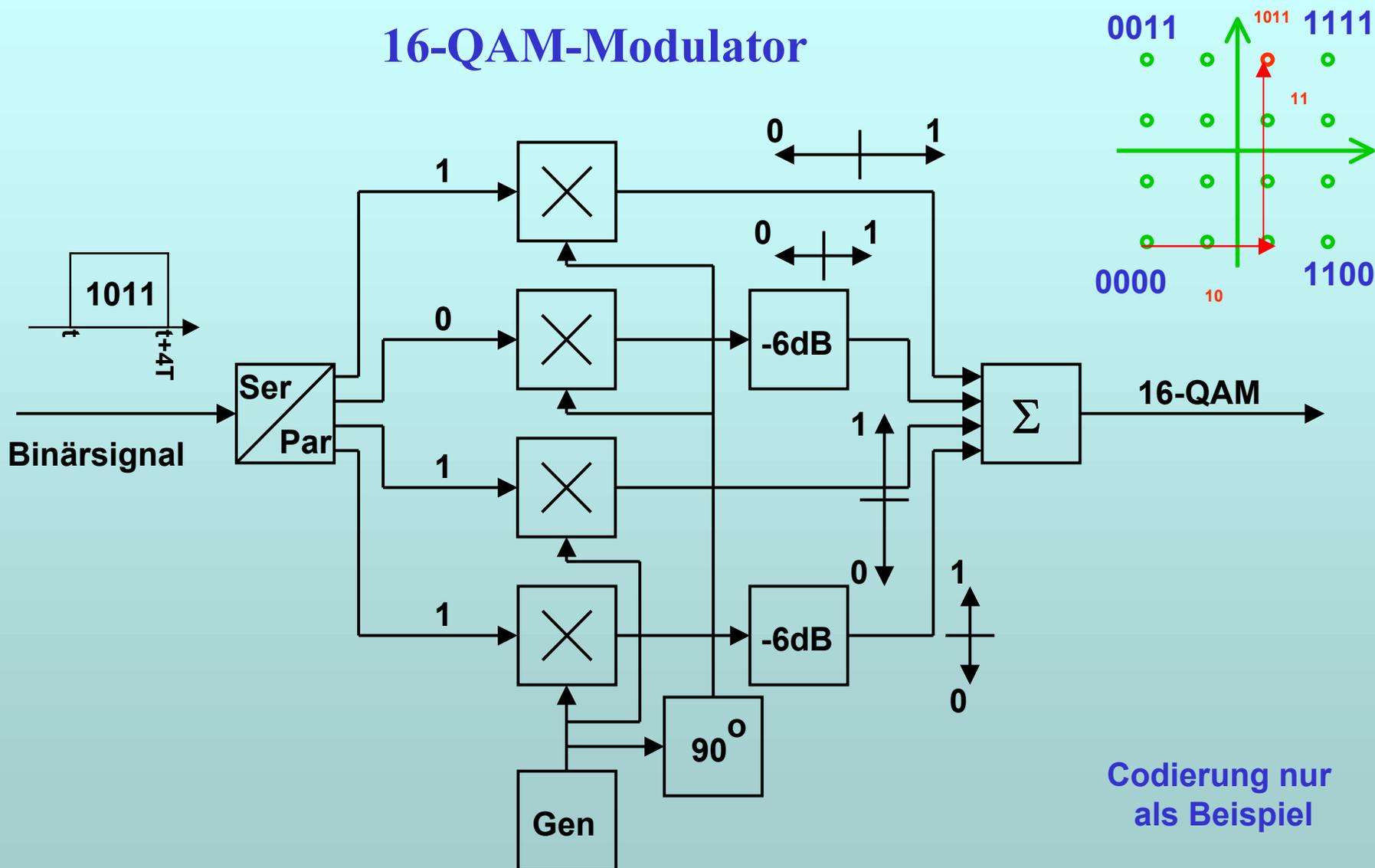
# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

## 4-PSK-Modulator



# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

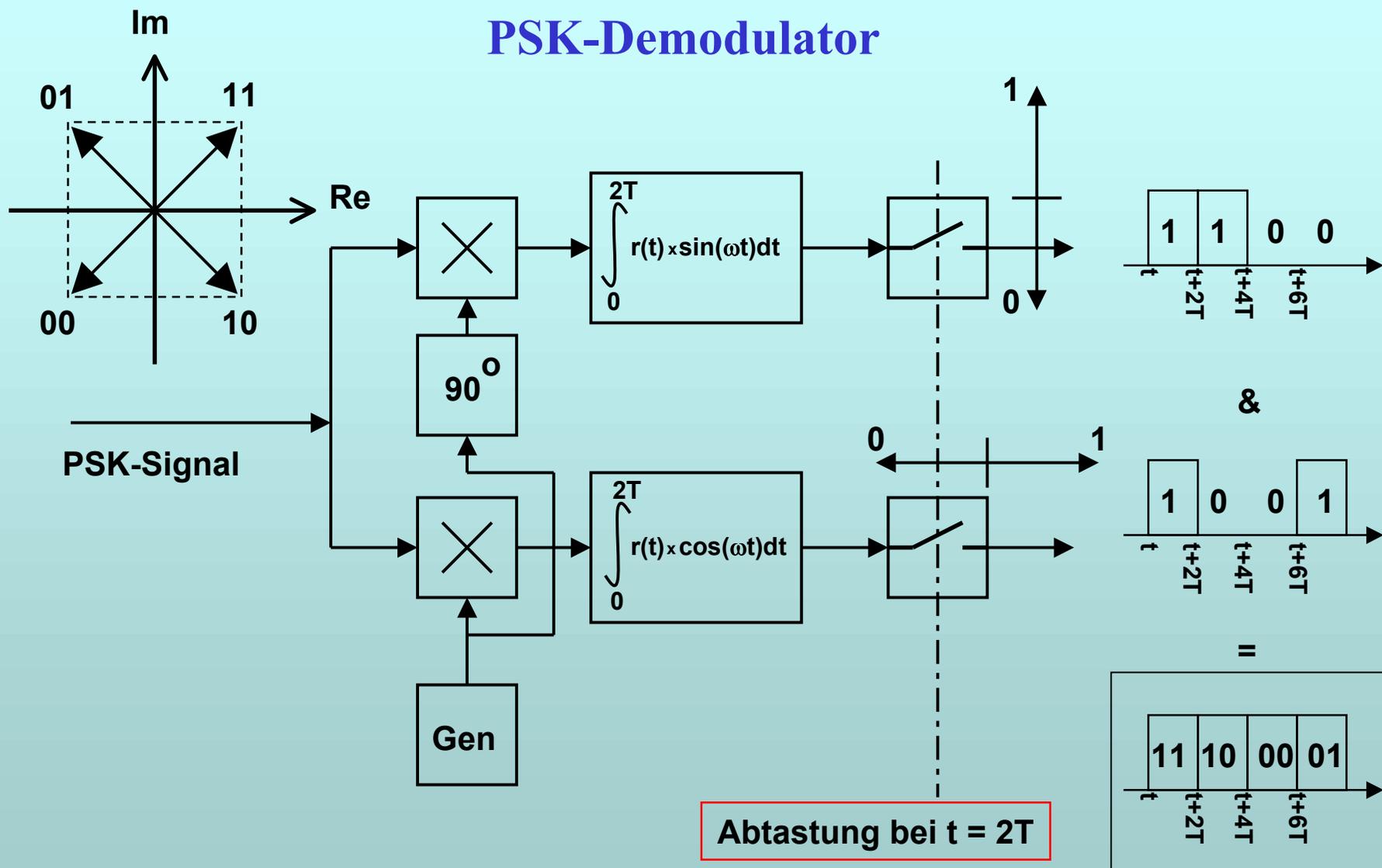
## 16-QAM-Modulator



Codierung nur als Beispiel

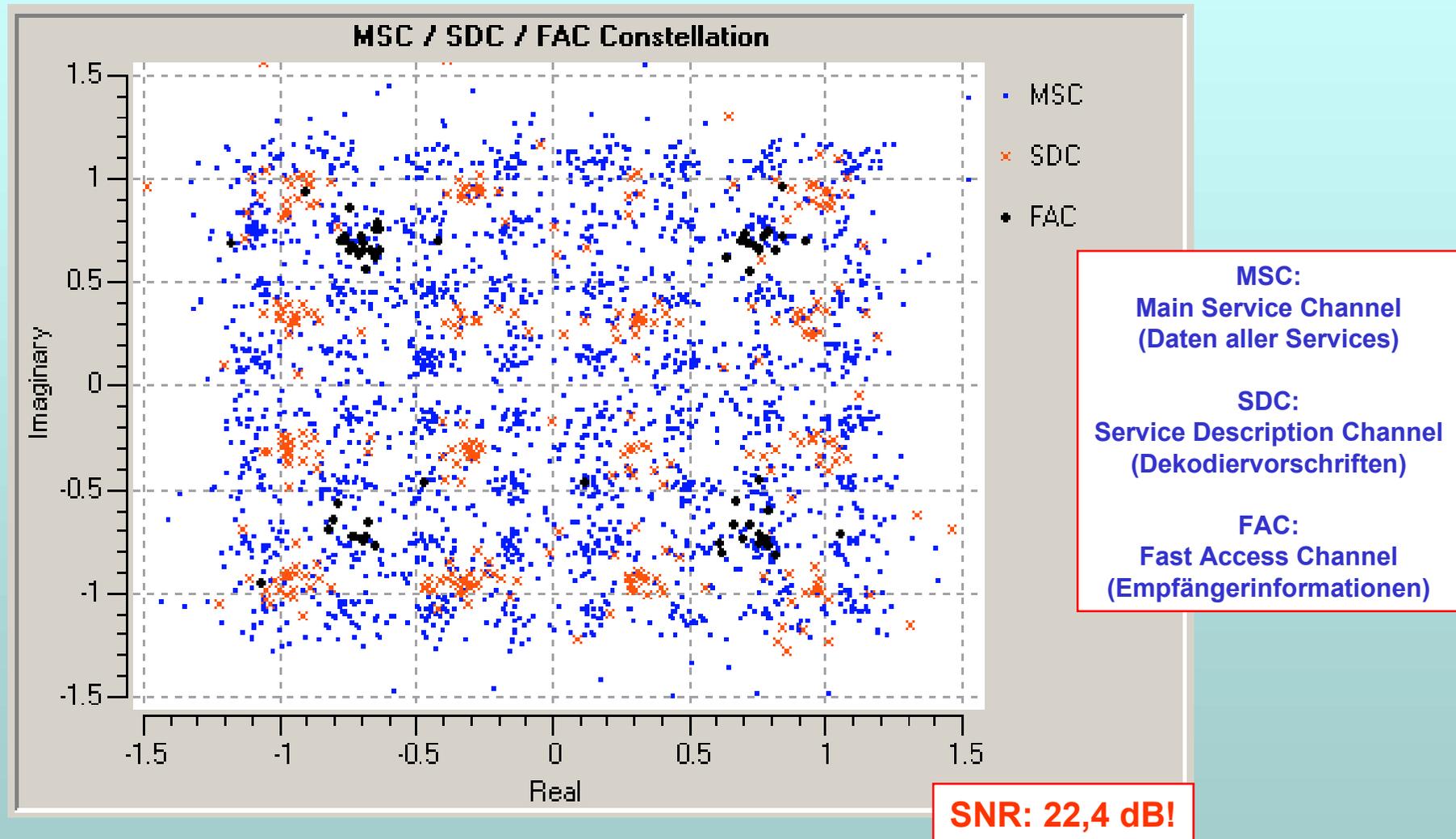
# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

## PSK-Demodulator



# Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

## Beispiel für 64-QAM: DREAM (Digital Radio Mondiale)



### FDM (Frequency Division Multiplex)

Mehrere Signale werden auf mehrere Subträger verteilt

Nachteil: Notwendiger Sicherheitsabstand  
zwischen den Subträgern und deren Seitenbändern

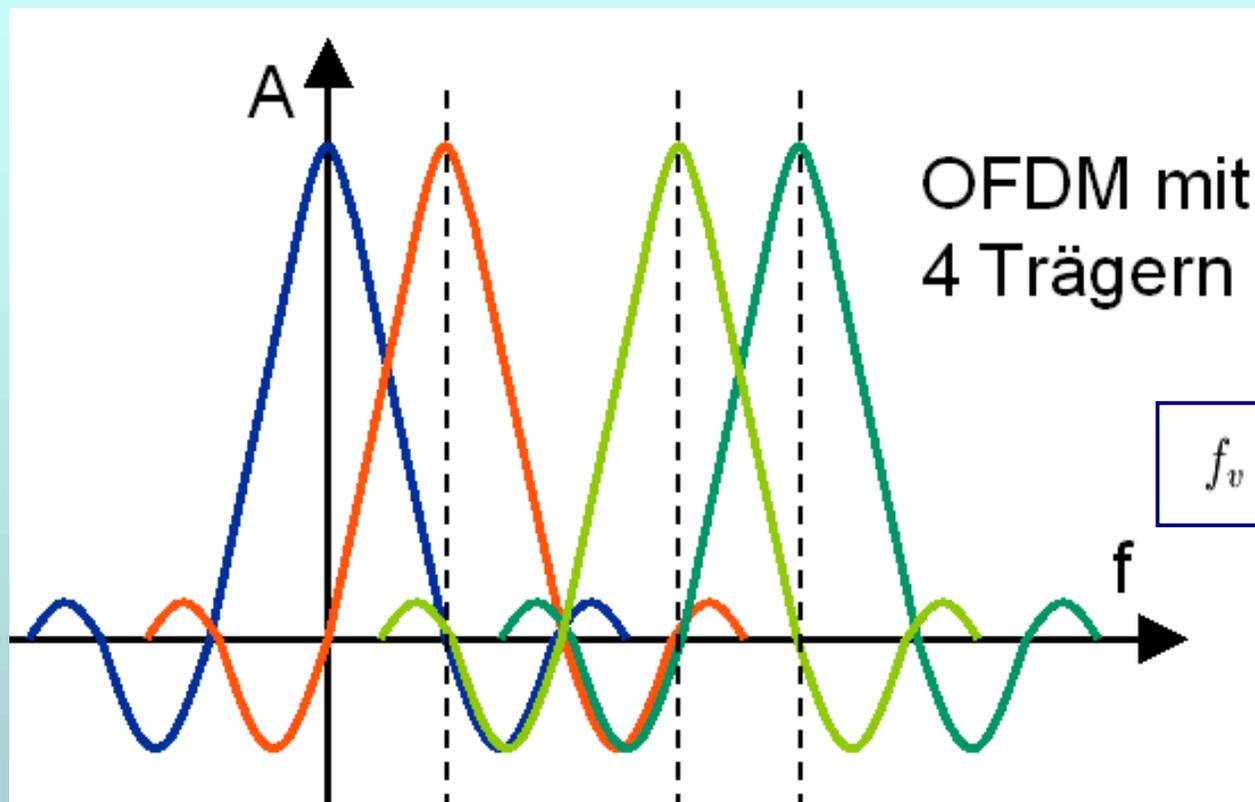
---

### OFDM (Orthogonal FDM)

- Viele Teildatenströme werden auf Subträger QAM-moduliert
- Subträgersignale sind orthogonal zueinander
- Damit minimale gegenseitige Beeinflussung
- Schmalbandige Störungen stören nur gering

## Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

### OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex)



**Orthogonalität:**

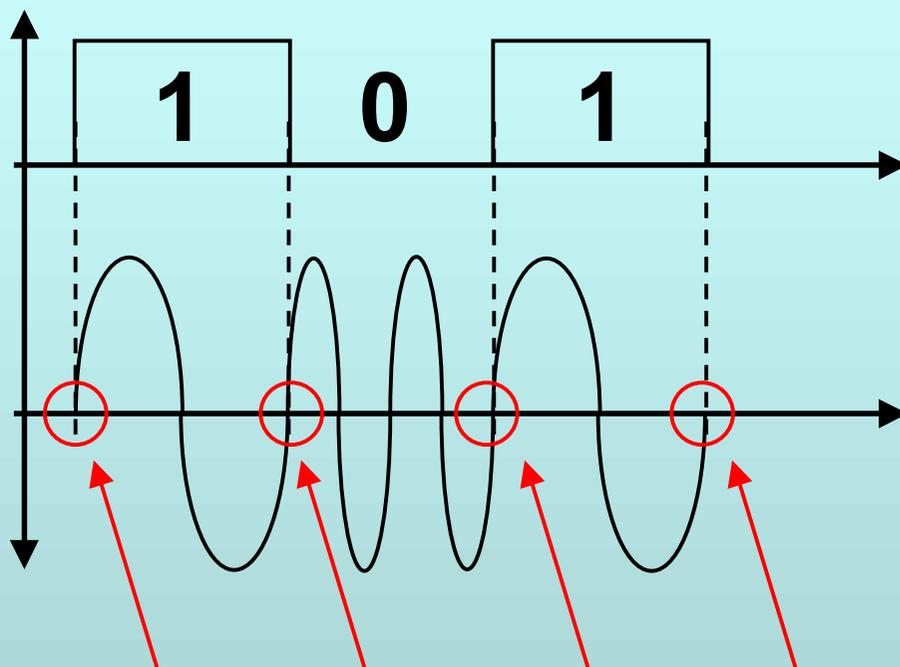
$$f_v = \frac{v}{T}, f_w = \frac{w}{T}, w, v \in \mathbb{N}$$

( T:Symboldauer )

Die Träger werden in die Nullstellen der benachbarten Träger und deren Modulation gelegt.

## Analoge und digitale Modulationsarten im Amateurfunk

### MSK - Minimum Shift Keying



Die Frequenzdifferenz  
zwischen  
logisch „1“ und „0“ ist  
exakt die Hälfte der  
Datenrate

1. Phasenumtastung im Nulldurchgang
2. Modulationsindex  $m = 0,5$

Wir erinnern uns: Der Modulationsindex  $M$  ist das Verhältnis der Frequenzänderung des Ausgangssignals zur Modulationsfrequenz ("NF")

### **GMSK - Gaussian (filtered) Minimum Shift Keying**

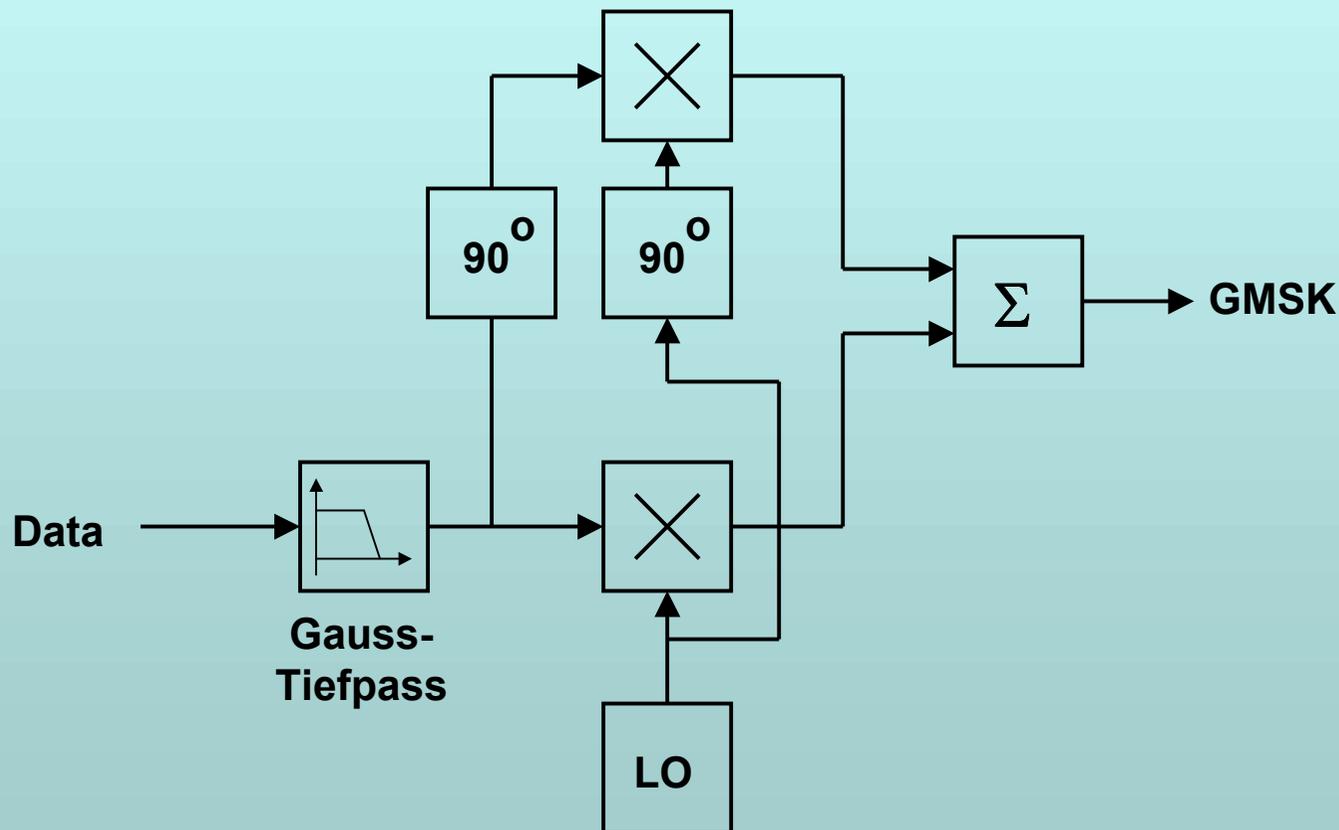
Zur Bandbreitenbegrenzung wird das Modulationssignal zusätzlich in einem Gauß-Tiefpaßfilter begrenzt.

#### Vorteile der GMSK:

1. Geringere Bandbreite als normale PSK
2. Nichtlineare Verstärkung möglich > Wirkungsgrad hoch
3. Keine AM-Anteile, unempfindlich gegenüber Störungen
4. Geeignet für portable Anwendungen

## GMSK-Modulator:

1. VCO: Nachteil: Hohe Anforderung an die Stabilität
2. Besser: IQ-Modulator



## Analoge Sendearten im Amateurfunk

**Telefonie: AM/SSB, FM/PM**

**Telegraphie: CW (oder war das schon die erste digitale Übertragung in ASK??)**

**FAX: Faksimile in AM oder FM**

**Fernsehen:**

- **ATV: Amateur Television, mehrere(!) MHz Bandbreite**
- **SATV: Schmalband-ATV, 2MHz Bandbreite**
- **SSTV: Slow Scan, 3kHz Bandbreite (SSB-Bandbreite)**

## Digitale Sendarten im Amateurfunk

High Speed CW: HSCW in ASK

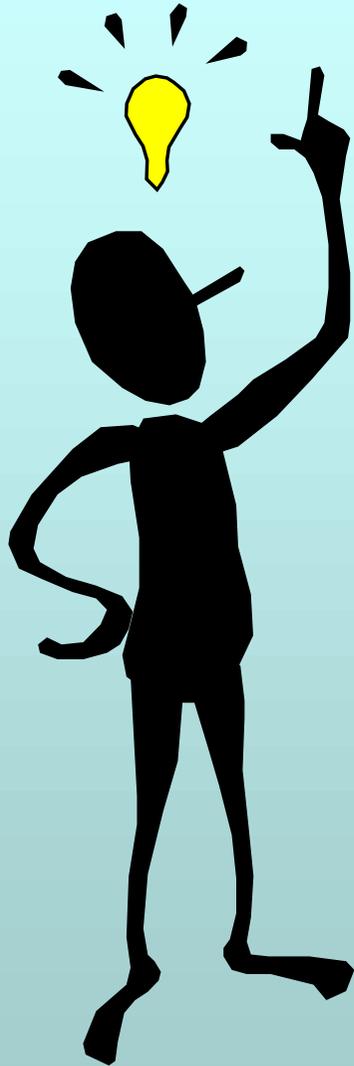
Funkfern schreiben: + RTTY in (A)FSK  
+ SITOR (Simplex Teleprinting over Radio) in (A)FSK  
+ AMTOR (Amateur Teleprinting over Radio) in (A)FSK  
+ PACTOR (Packet Teleprinting over Radio) in (A)FSK  
+ PSK31 in BPSK (BiPhaseShiftKeying)

Packet Radio: Packet Teleprinting over Radio, (A)FSK

Digitalfernsehen: DATV in GMSK oder OFDM

Telefonie & Daten: D-STAR (Digital Smart technologies for Amateur Radio) in 0,5GMSK

Datenübertragung: + G-TOR (Golay=Fehlerkorr.) in (A)FSK  
+ CLOVER in 8-PSK oder 16-PSK  
+ APRS in AFSK



# Alles Klar?

[www.dl7maj.de](http://www.dl7maj.de)