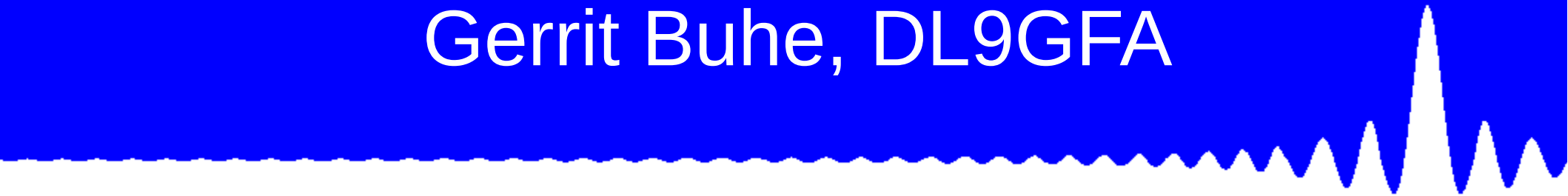


Herausforderungen digitaler Funkübertragung

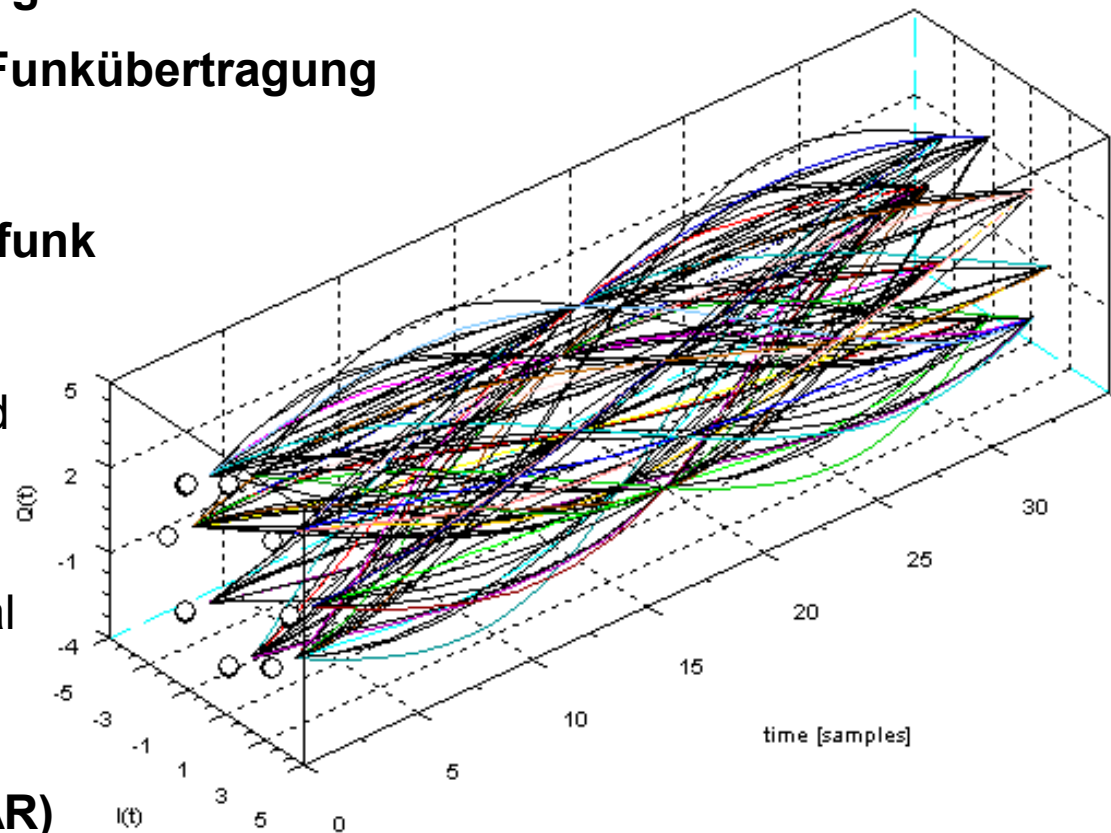
HAM-Radio 2012 in Friedrichshafen

Gerrit Buhe, DL9GFA



Inhalt

- **Einleitung – The World goes Digital!**
- **Ziele digitaler Funkübertragung**
- **Analoge gegenüber digitaler Funkübertragung**
- **Übersicht digitaler TX und RX**
- **Herausforderungen im Digitalfunk**
 - Audiodatenrate
 - Kanalbandbreite
 - Linearität und Wirkungsgrad
 - Ausbreitungsbedingungen
- **Lösungsansätze**
 - Audio ↔ Datenrate ↔ Kanal
 - Reichweite analog / digital
 - Ausbreitungsphänomene
- **Vergleich NFM und DV (D-STAR)**
- **UP4DAR – Universal Platform for Digital Amateur Radio**
- **Zusammenfassung**



Einleitung

- **The World goes Digital!**

- Perfekte Qualität – löst alle analogen Probleme
- Einfacher zu bedienen, weil alles automatisch geht
- Funktionalität kann per Software erweitert werden
- Dadurch geringere Kosten
- Ist logisch der nächste Entwicklungsschritt
- Es macht die Welt besser, richtig?

Erwartungshaltung,
nicht Realität!

- **Motivation des Vortrags**

- Aufnahme des HAM-Radio 2012-Themas „Amateurfunk digital“
- Erläuterung der grundsätzlichen Zusammenhänge und Herangehensweise
- Versachlichung der technischen Diskussion Analog ↔ Digital
- Anregung, die neue experimentelle Spielweise zu nutzen

Ziele digitaler Funkübertragung

- **Erweiterte Funktionalität**
 - Erweiterung um Datentransfer
 - Routing (z.B. Call Sign Routing)
 - Abhörsicherheit, Verschlüsselung (außerhalb AFu)
- **Erhöhung der Flexibilität**
 - Verschiedene Verfahren mit derselben Technik (z.B. Anzahl verschiedener Mobilfunkstandards)
 - Zukunftssicherheit durch Software-updates
- **Verbesserung der Zuverlässigkeit**
 - Link-Adaption (z.B. Anpassung der Modulation/Datenrate an CNR/CIR, automatischer Frequenzwechsel, Leistungsregelung)
- **Optimale Nutzung der Frequenzressource**
 - Digitale Dividende (z.B. 4...6 Programme in einem TV-Frequenzkanal)
 - Dynamische Adaption der Übertragungsparameter
 - Cognitive Radio – reaktives, proaktives, kooperatives Ressourcenmanagement
- **Konvergenz von Kommunikation und Computertechnik**
 - Routen der Datenströme über vorhandene Infrastruktur (z.B. VoIP)
 - Speichern von Datenströmen (z.B. Medienproduktion, zeitversetztes Abspielen: Nachrichtenspeicher, Rundspruch)

Analoge Funkübertragung

- **Analoge Modulationsverfahren**

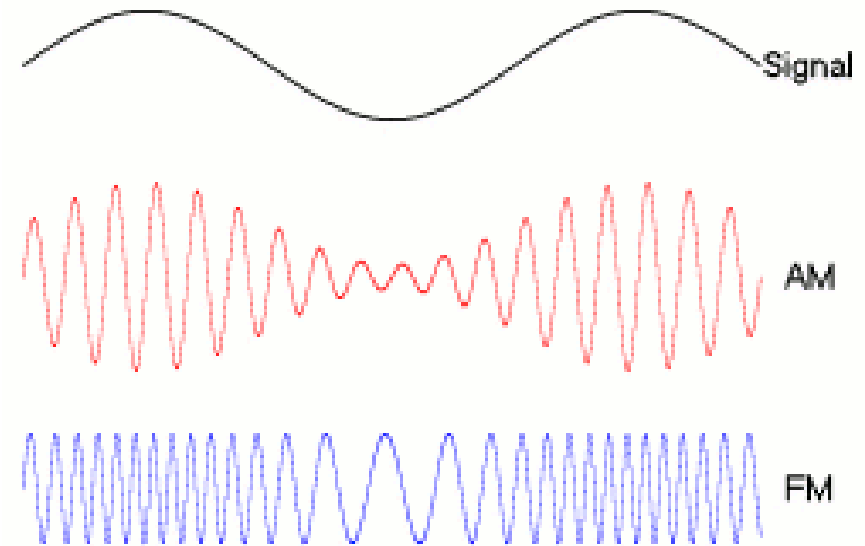
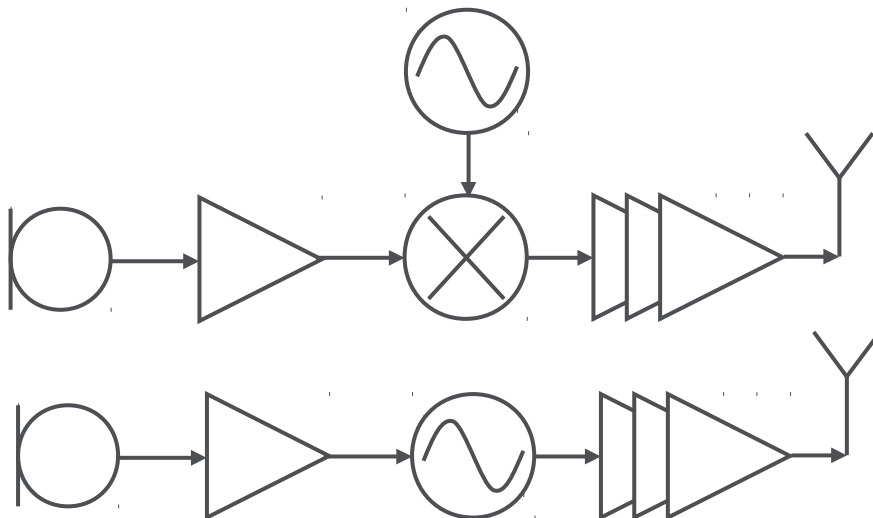
- Analoges Quellsignal (i.d.R Sprache, Musik) moduliert HF-Träger mehr oder weniger direkt und kontinuierlich

- **FM/PM**

- Ausschließlich die aktuelle Frequenz/Phase des Trägers wird verändert
→ konstante Einhüllende, daher keine Linearität erforderlich

- **AM/SSB**

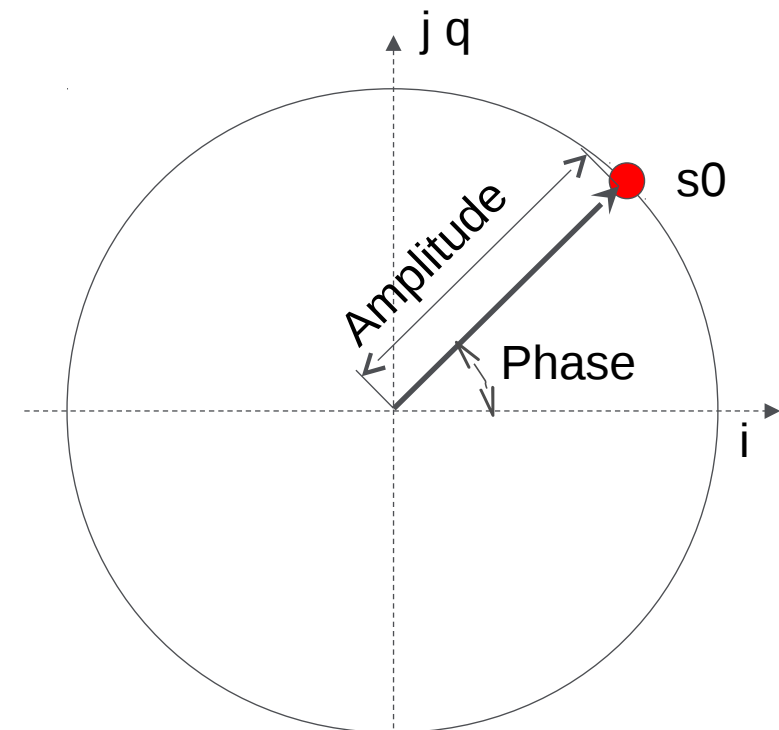
- Die Einhüllende wird kontinuierlich mit Modulation variiert, bei SSB unsymmetrisch
→ lineare Verarbeitung nötig



Digitale Funkübertragung

- **Digitale Modulationsverfahren**

- Um so viel Information wie möglich auf den HF-Träger aufzuprägen, wird die Amplitude und Phase gleichzeitig und unabhängig voneinander modifiziert
- Visualisierung erfolgt als Zeiger / Vektor

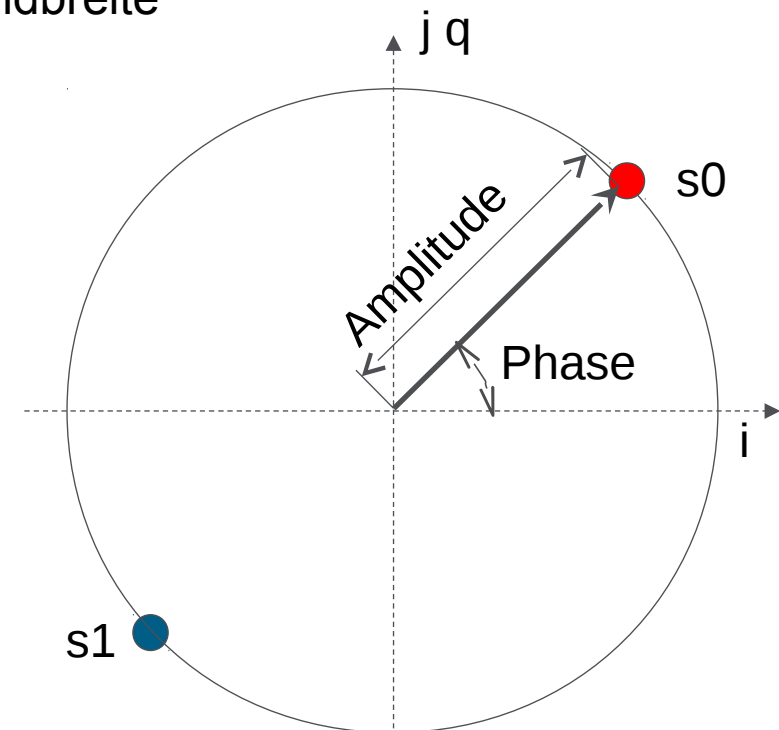


Digitale Funkübertragung

- **Digitale Modulationsverfahren**

- Um so viel Information wie möglich auf den HF-Träger aufzuprägen, wird die Amplitude und Phase gleichzeitig und unabhängig voneinander modifiziert
- Visualisierung erfolgt als Zeiger / Vektor
- Geschwindigkeit des Wechsels zwischen Zuständen und Pulsformung bestimmt die benötigte Kanalbandbreite

Bitstrom: ...0100110101...



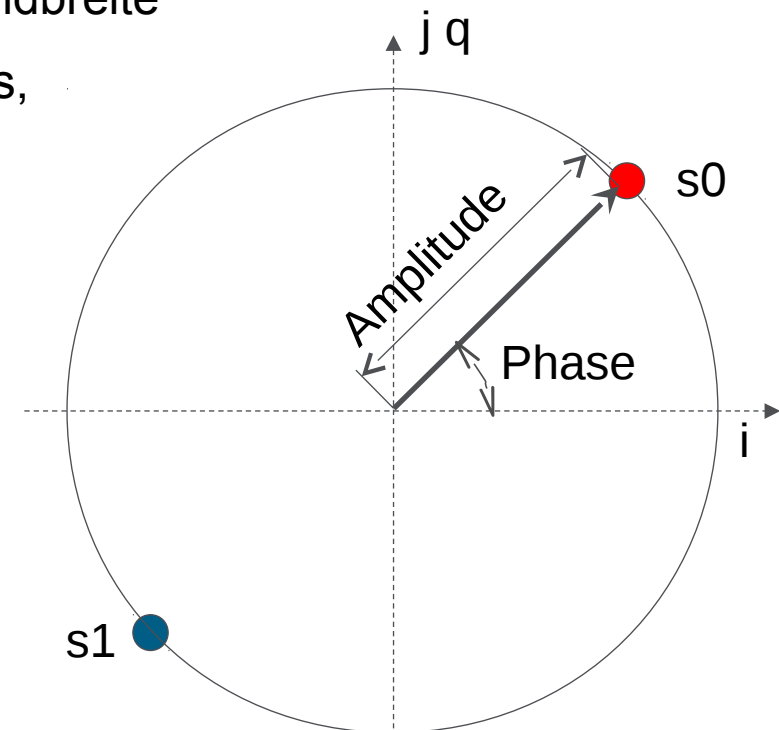
Digitale Funkübertragung

- **Digitale Modulationsverfahren**

- Um so viel Information wie möglich auf den HF-Träger aufzuprägen, wird die Amplitude und Phase gleichzeitig und unabhängig voneinander modifiziert
- Visualisierung erfolgt als Zeiger / Vektor
- Geschwindigkeit des Wechsels zwischen Zuständen und Pulsformung bestimmt die benötigte Kanalbandbreite
- Direkter Weg im Bsp. kürzer als auf dem Kreis, dann aber AM-Anteil

Bitstrom: ...0100110101...

$$f_{Symbol} = \frac{BW}{1 + R_{off}} = \frac{6.25\text{kHz}}{1.3} \approx \underline{\underline{4.8\text{kS/s}}}$$



Digitale Funkübertragung

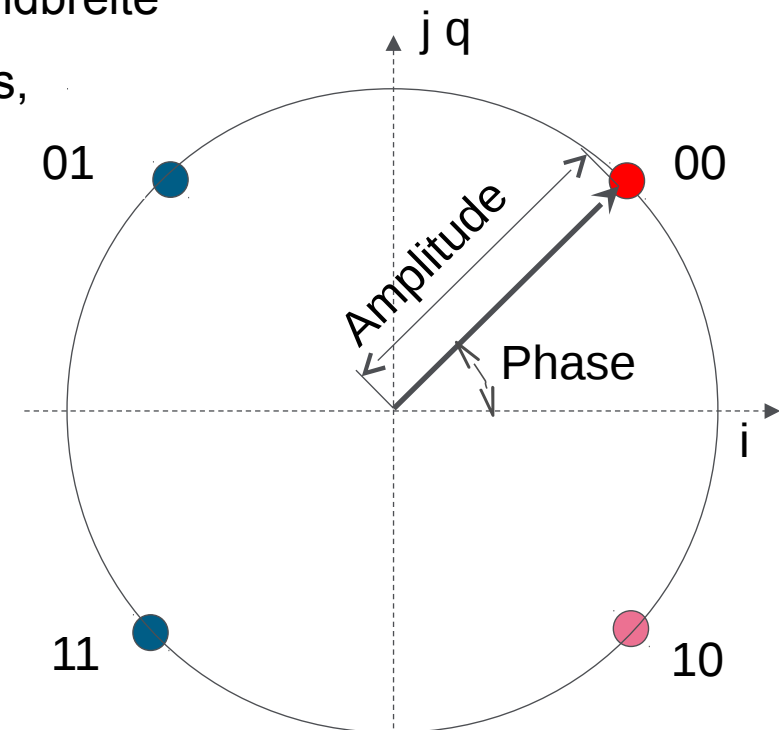
- **Digitale Modulationsverfahren**

- Um so viel Information wie möglich auf den HF-Träger aufzuprägen, wird die Amplitude und Phase gleichzeitig und unabhängig voneinander modifiziert
- Visualisierung erfolgt als Zeiger / Vektor
- Geschwindigkeit des Wechsels zwischen Zuständen und Pulsformung bestimmt die benötigte Kanalbandbreite
- Direkter Weg im Bsp. kürzer als auf dem Kreis, dann aber AM-Anteil

Bitstrom: ...0100110101...

$$f_{Symbol} = \frac{BW}{1 + R_{off}} = \frac{6.25\text{kHz}}{1.3} \approx \underline{\underline{4.8\text{kS/s}}}$$

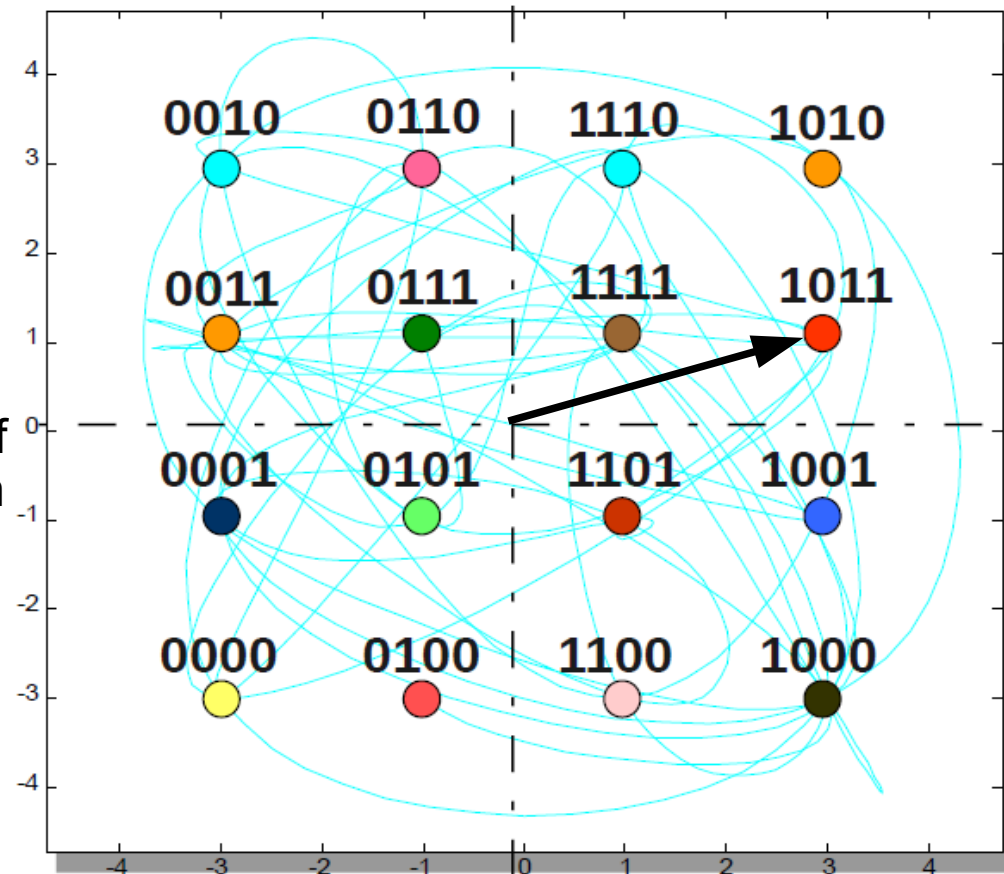
$$f_{Bit} = f_{Symbol} \cdot \log_2(\text{Zustände}) \approx \underline{\underline{9.6\text{kBit/s}}}$$



Digitale Funkübertragung

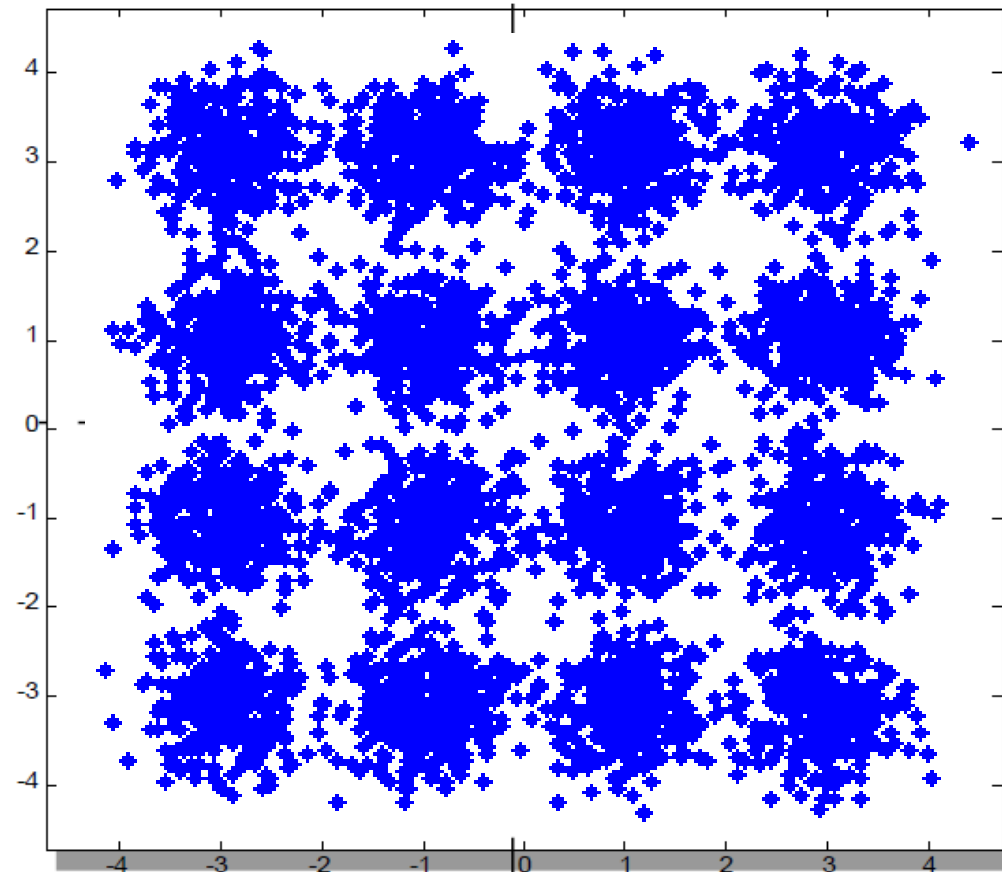
- **Digitale Modulation – Symbole und Bits**

- Diskrete Amplituden- und Phasen-Zustände (Constellation Points – CP) werden definiert, um eine bestimmte Bit-Sequenz zu repräsentieren
- Anzahl der unterschiedlichen Zustände bestimmt Anzahl Bits pro CP (=Symbol)
- Anzahl der „anfahrbaren“ Symbole pro Sekunde ist begrenzt durch die erlaubte Kanalbandbreite
- Modulierter Träger (Zeiger) geht kontinuierlich von einem CP zum anderen abhängig von der zu sendenden Bit-Sequenz
- Nur zu bestimmten Zeitpunkten darf Zustand im RX ausgewertet werden (Symboltakt-Rückgewinnung nötig)

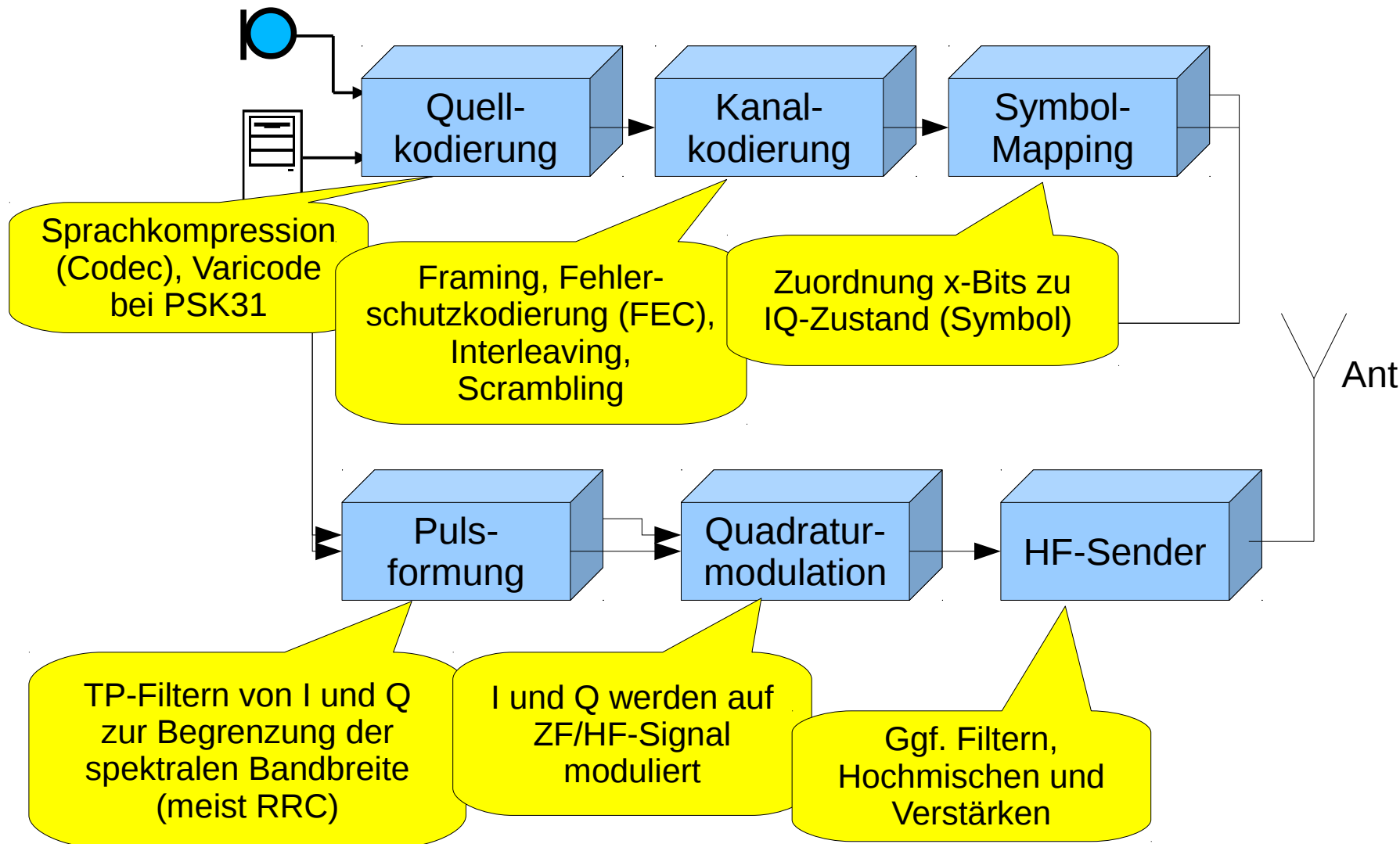


Digitale Funkübertragung

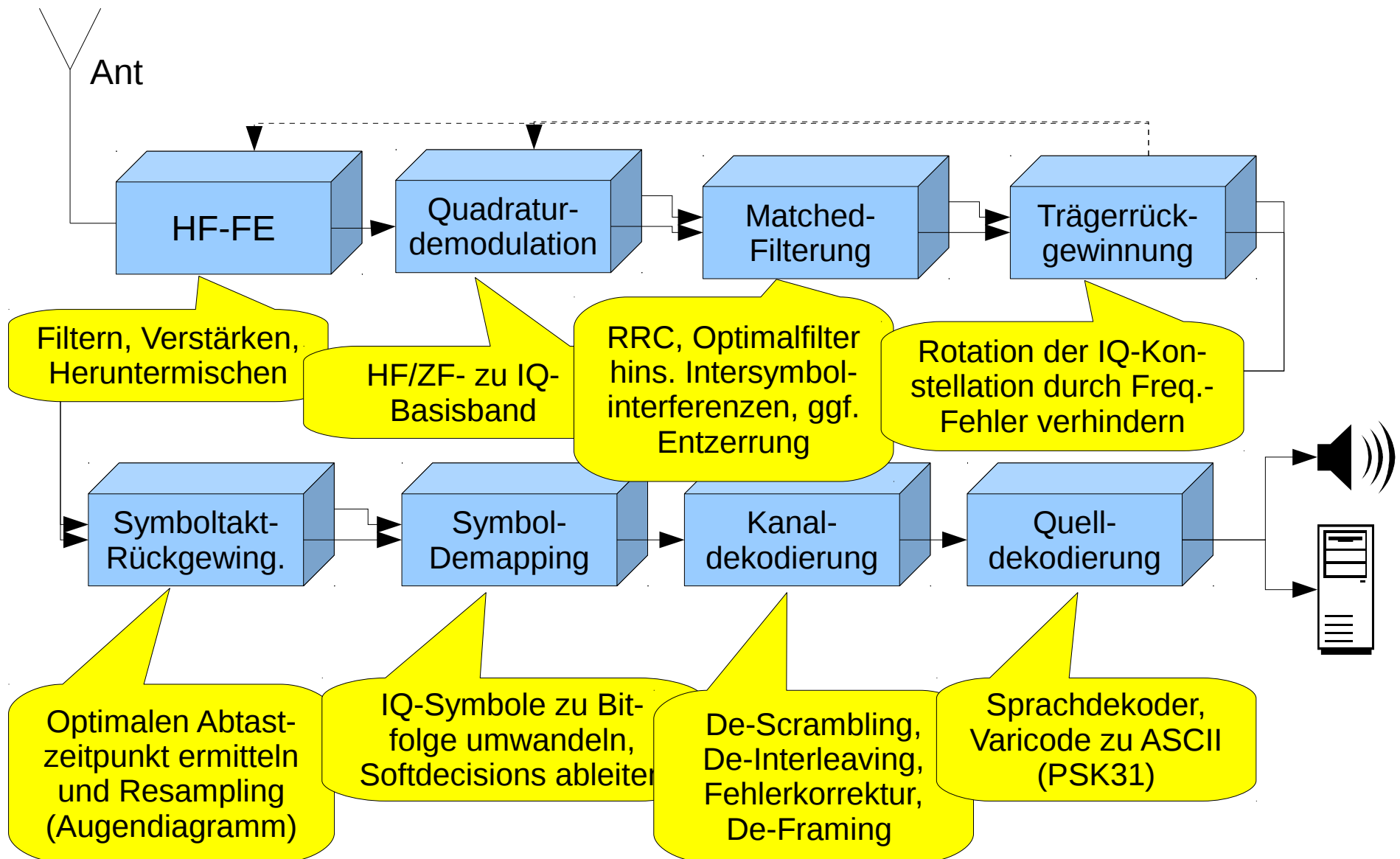
- **Digitale Modulation – Signal-Rausch/Interferenz-Abstand (CNR / CIR)**
 - Wenn Rauschen oder Interferenzen das Empfangssignal beeinträchtigen wird es schwer, die CP von einander zu unterscheiden
 - Geringere Bitrate → weniger Symbole
→ Geringere CNR/CIR nötig für gute BER
 - **Je höher die Datenrate, desto mehr CNR / CIR ist nötig!**



Digitaler Sender



Digitaler Empfänger



Herausforderungen Digitalfunk

- **Hohe Audiodatenrate**

- Angesichts der schmalen Kanalbandbreiten ist Datenrate für Sprechfunk relativ hoch, Annahme:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Audio-BW: 3kHz} \rightarrow \text{Abtastrate: 7kHz} \\ \text{Dynamik: } \approx 20\text{dB} \rightarrow \text{3Bit / Abtastwert} \end{array} \right\} \text{21 kBit/s}$$

- Zusätzliche Daten für Framing und Fehlerschutz, ggf. Hilfsdaten nötig (sinnvoller minimaler Faktor 1.5) \rightarrow **31.5kBit/s**

$$V/U/SHF: f_{Symbol} = \frac{BW}{1 + R_{off}} = \frac{6.25\text{kHz}}{1.3} \approx \underline{\underline{4.8\text{kS/s}}}$$

$$HF: \frac{2.5\text{kHz}}{1.3} \approx \underline{\underline{1.9\text{kS/s}}}$$

- Für die Übertragung von 31.5kBit/s innerhalb 6.25kHz bzw. 2.5kHz Kanalbandbreite wären **7 Bit/Symbol bzw. 17 Bit/Symbol** nötig
- Anzahl der nötigen Konstellationszustände wäre 128 bzw. 131072 !

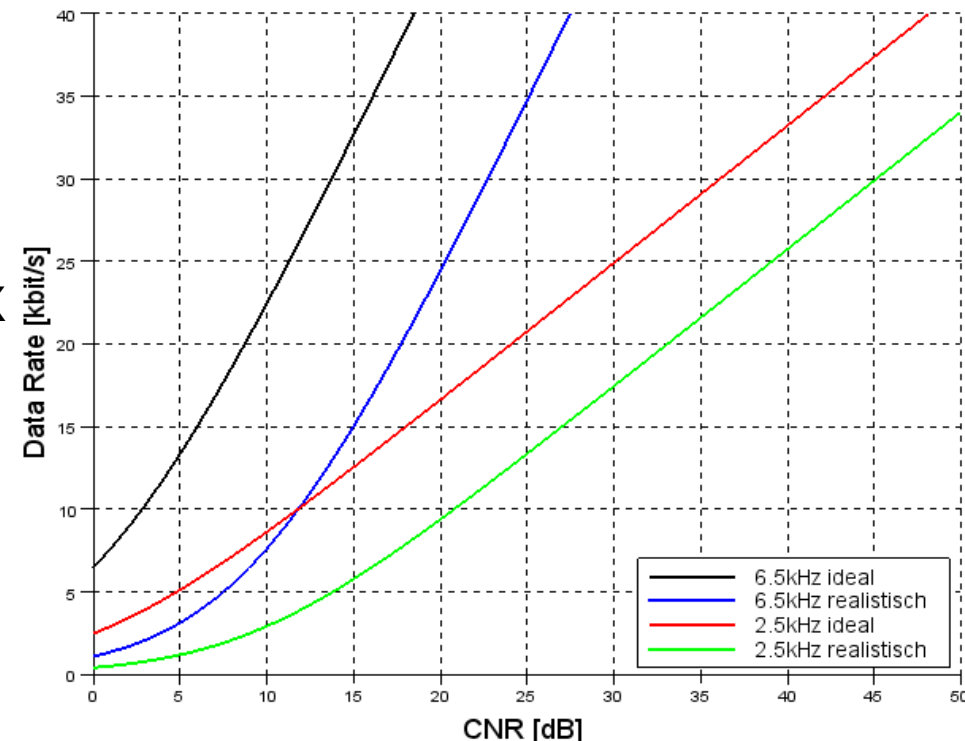
Herausforderungen Digitalfunk II

- **Geringe Kanalbandbreite im Amateurfunk**

- Einfache und robuste digitale Modulationen (z.B. FSK, GMSK) erlauben nur geringe Datenrate innerhalb der schmalen Amateurfunkkanäle
- Modulationsverfahren höherer Ordnung (mehrere Bit/Symbol) mit schmaler spektraler Formung benötigen
 - Hohes CNR / CIR
 - Hohe Modulationsgenauigkeit, Träger- und Seitenbandunterdrückung
 - Hohe Linearität in allen Stufen
 - Hohen Aufwand in Träger- und Symboltaktückgewinnung im RX
- Kanalkapazität (CC) beschreibt **maximale** Datenrate über CNR

$$CC = BW \cdot \log_2 \left(1 + 10^{\left(\frac{CNR [dB]}{10} \right)} \right)$$

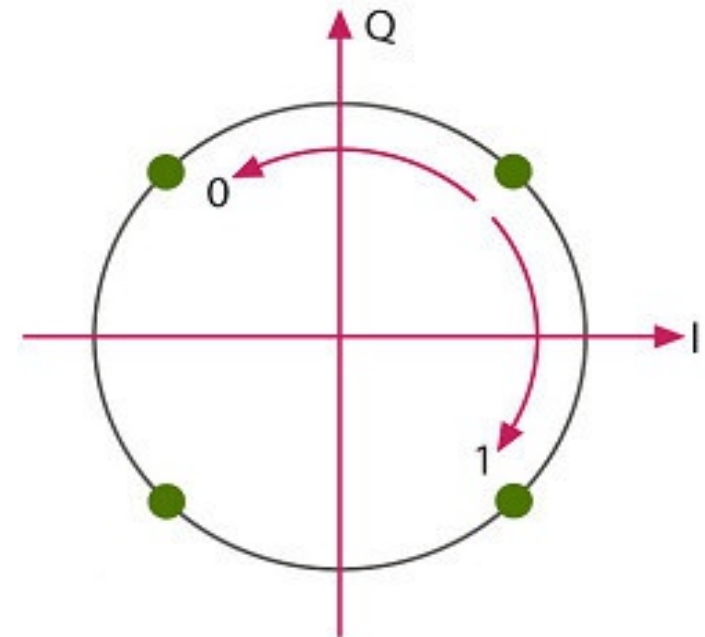
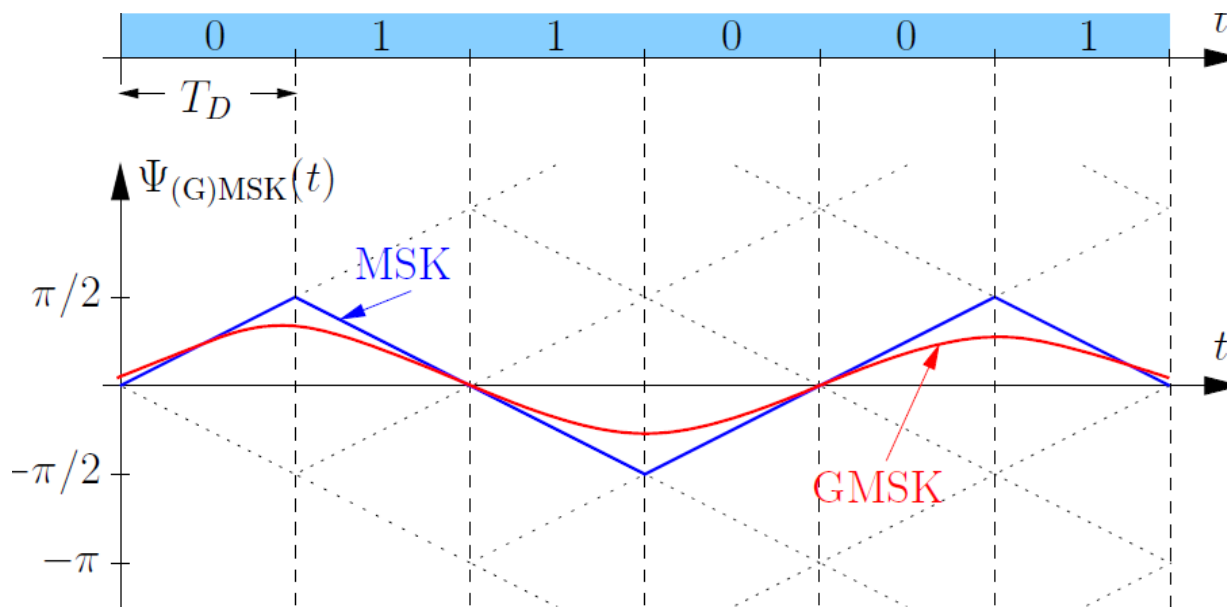
Kanalkapazität über CNR für $BER = 10^{-3}$



Herausforderungen Digitalfunk III

- **Linearitätsanforderungen für Modulation**

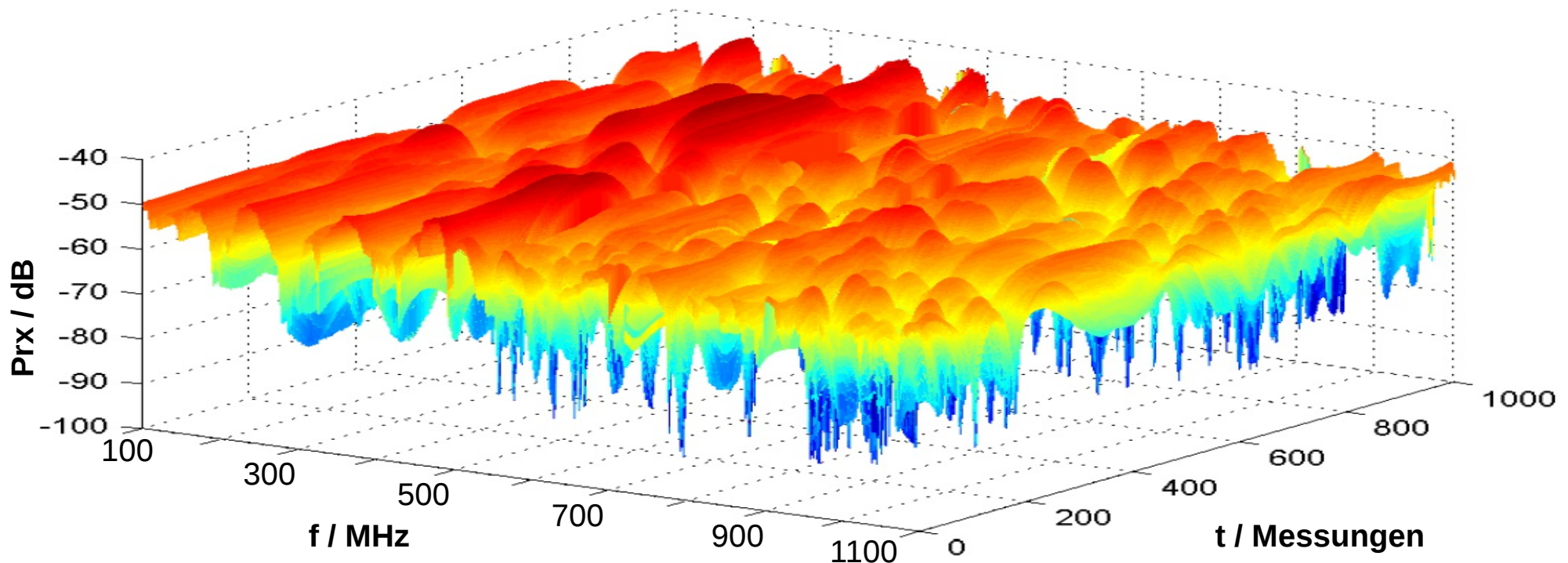
- Frequenzeffiziente Modulationsverfahren höherer Ordnung (mehrere Bits/Symbol) benötigen durch AM-Anteil hohe Linearität in allen Stufen
- Insbesondere Sendeverstärker enden oft mit **Wirkungsgraden <10%**
→ Keine gute Option für Batterie betriebene Geräte!
- Optimierung durch Sendeleistungsregelung und Zeitschlitzverfahren möglich
→ Kompromiss in Datenrate
- Alternative sind Modulationsverfahren mit **konstanter Einhüllenden** (FSK, GMSK)
→ Kompromiss bzgl. realisierbarer Datenrate zu CNR



Herausforderungen Digitalfunk IV

- **Ausbreitungsbedingungen und Synchronisation**

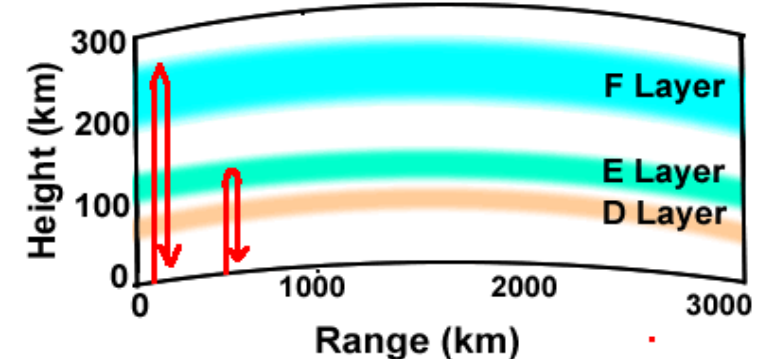
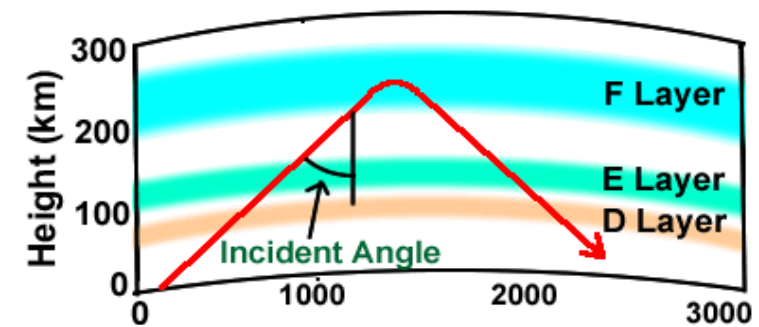
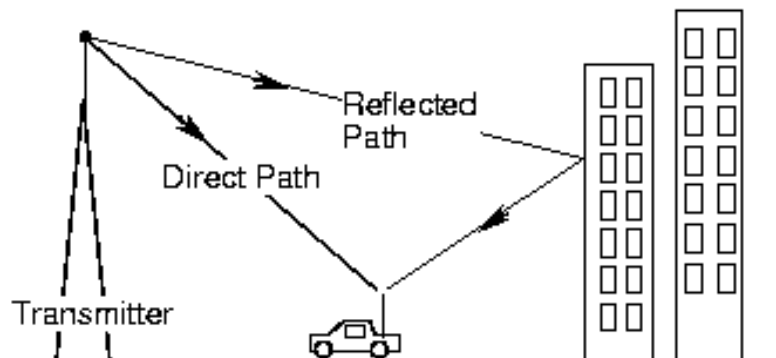
- Digitale Übertragungsverfahren benötigen eine Synchronisation des RX zum TX auf verschiedenen Ebenen
 - Trägerfrequenz, Symboltakt, Bitstrom (Framing, Audio-Codec)
- Kurze Bit-Fehler-Bursts durch Zeit- und Frequenz-selektives Fading dürfen nicht zum Ausrasten der Synchronisation führen - alternativ sehr schnelles Syncen
- Kanaloptimierte Entzerrung, Interleaving und Fehlerschutz (FEC) einzusetzen



Herausforderungen Digitalfunk

- **Zusammenfassung**

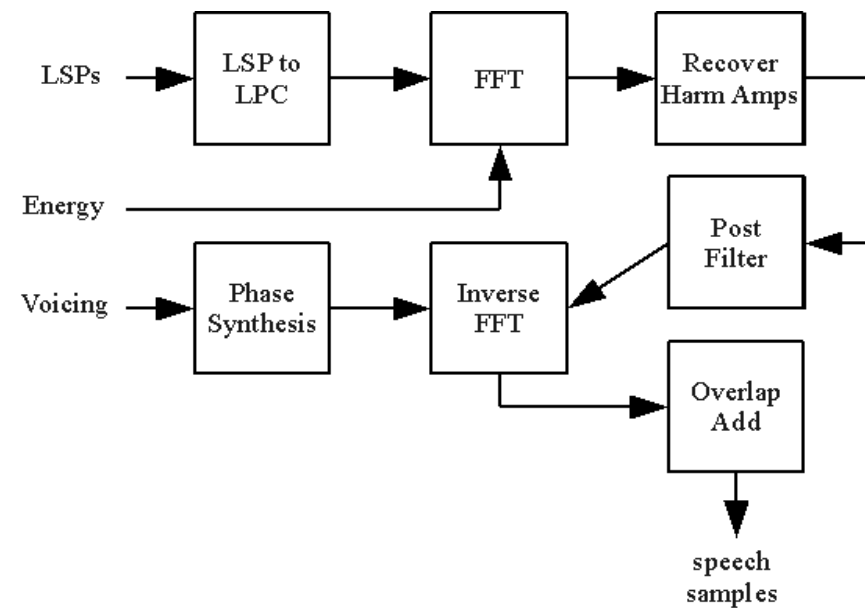
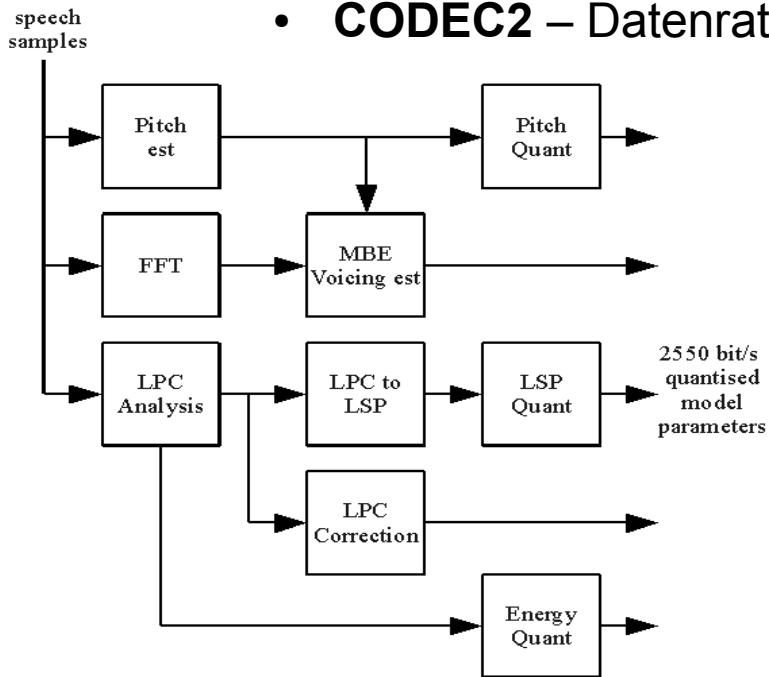
- Audiosignale benötigen ohne Maßnahmen eine **hohe Datenrate**
- Geringe Kanalbandbreite im Amateurfunk erlaubt nur **geringe Datenraten**
- Man möchte möglichst weit funken, daher soll nur **geringes CNR** nötig sein
- Ausbreitungsbedingungen sind sehr unterschiedlich
 - Über Frequenz (HF, VHF, UHF, ...)
 - Ausbreitungsphänomene (Mehrwegeausbreitung, sporadic-E, Aurora)
 - Bewegungsgeschwindigkeiten (Fading, Doppler-Verschiebung)
- Handfunkgeräte sollen hohen Wirkungsgrad für lange **Betriebszeit** haben



Audio ↔ Datenrate ↔ Kanal

- **Audiodatenkompression = Audio-Codec**

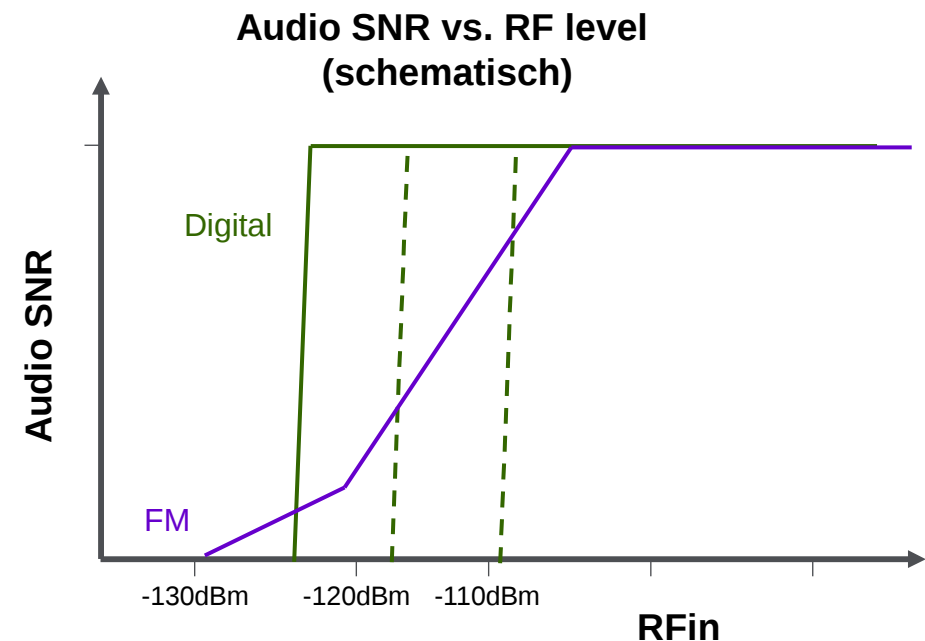
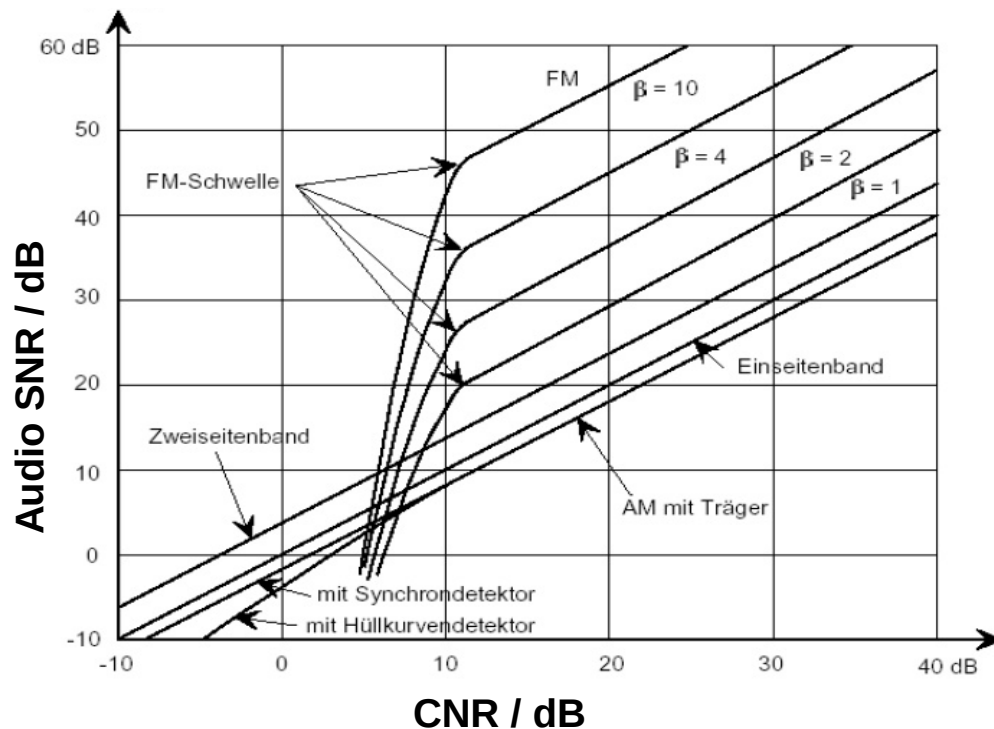
- Es gibt viele Audio-Codex, aber kaum einer ist optimiert auf sehr geringe Datenraten (<5kBit/s) und nur Sprache in „Telefonqualität“
- Digitaler Bündelfunk / Betriebsfunk hat ganz ähnliche Anforderungen wie wir im VHF/UHF-Bereich → **AMBE-Codec** wurde entwickelt
- Zum Zeitpunkt der D-STAR-Entwicklung gab es keine echte Alternative!
- Aktuell: Erfreuliche Entwicklungen von **Sprach-Codex** im Open Source Umfeld
 - **SPEEX** – Datenraten von 2kBit/s...44kBit/s
 - **CODEC2** – Datenraten 2.4/1.4/1.2kBit/s (von David Rowe, VK5DGR)



Reichweite analog / digital

- **Empfängerempfindlichkeit / Verhalten im Grenzbereich**

- Der Übergang von „Aus“ (schlechte BER) zu sehr guter Verbindung ist sehr abrupt
- Übergangseffekte wie „Roboterstimme“ kommen vom Audio-Codec (ggf. mit Fehlerverschleierung)
- Auslegung der Digitalstrecke bzgl. Burst-Fehlern durch Fading entscheidend
- Synchronisation im RX sollte auch bei Fading sehr lange stabil bleiben
- FM-Modulationsgewinn wird durch schmalere Kanäle immer geringer (6.25kHz!)



Verschiedene Ausbreitungsphän.

- **Fading und Kanalverzerrung**

- Kanalverzerrung ist bisher nicht im Fokus der V/U/SHF-AFu-Lösungen und könnte weitere Verbesserungen bringen (ggf. Kompromiss mit Datenrate)
- Gewinn durch Diversity-Empfang (≥ 2 RX-Antennen) hilft deutlich bei V/U/SHF
- Da heute (noch) kein Gegensprechen eingesetzt wird, kann langes Interleaving die Leistungsfähigkeit des Fehlerschutzes dramatisch verbessern

Eingangsdaten (4 Blöcke mit je $n = 5$ Bits):

00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Ausgangsdaten (5 Blöcke mit je $q = 4$ Bits):

19 14 09 04 18 13 08 03 17 12 07 02 16 11 06 01 15 10 05 00

Ausgangsdaten gestört mit einem 4-Bit-Burst-Fehler:

19 14 09 04 18 13 08 ■ ■ ■ ■ 02 16 11 06 01 15 10 05 00

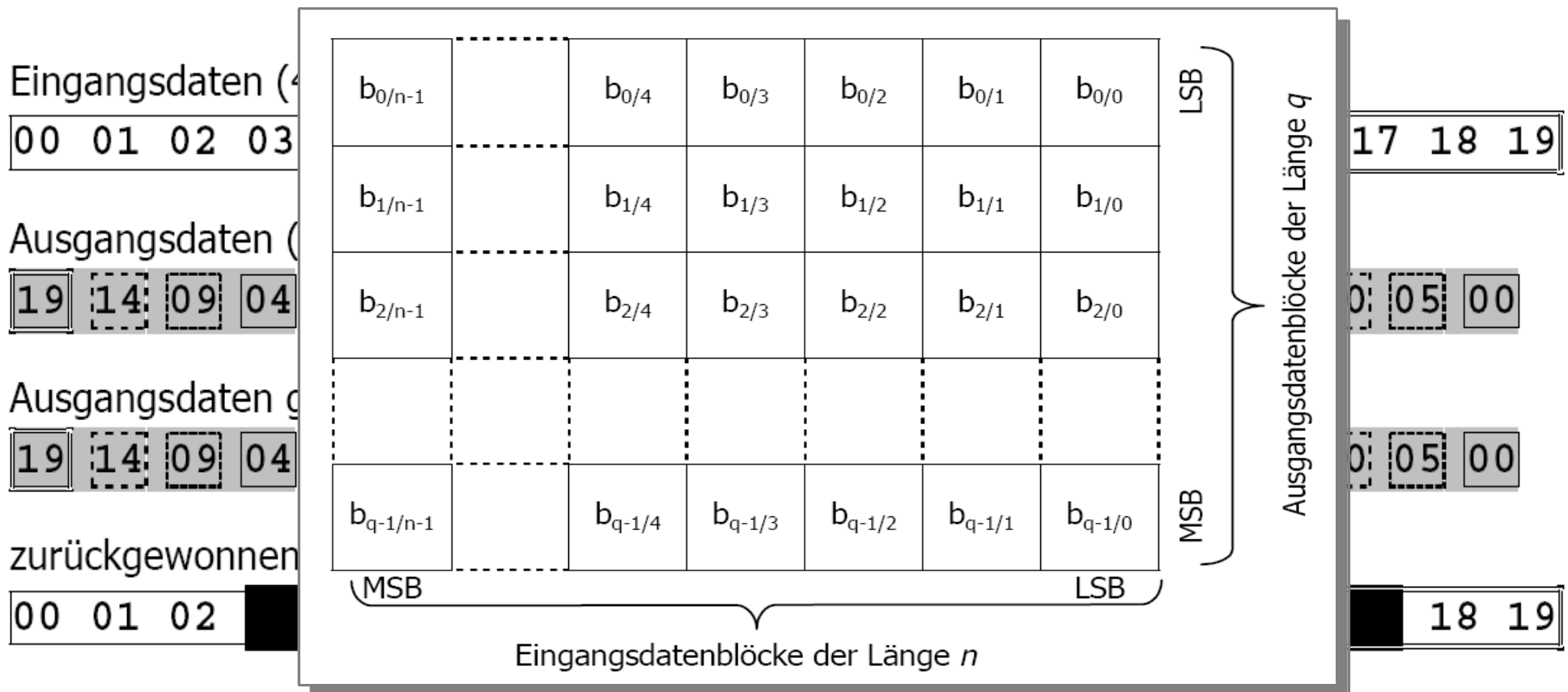
zurückgewonnene Eingangsdaten:

00 01 02 ■ 04 05 06 ■ 08 09 10 11 ■ 13 14 15 16 ■ 18 19

Verschiedene Ausbreitungsphän.

- **Fading und Kanalentzerrung**

- Kanalentzerrung ist bisher nicht im Fokus der V/U/SHF-AFu-Lösungen und könnte weitere Verbesserungen bringen (ggf. Kompromiss mit Datenrate)
- Gewinn durch Diversity-Empfang (≥ 2 RX-Antennen) hilft deutlich bei V/U/SHF
- Da heute (noch) kein Gegensprechen eingesetzt wird, kann langes Interleaving die Leistungsfähigkeit des Fehlerschutzes dramatisch verbessern



Vergleich NFM und DV (D-STAR)



HAM-Radio 2012

- **Technische Daten NFM**

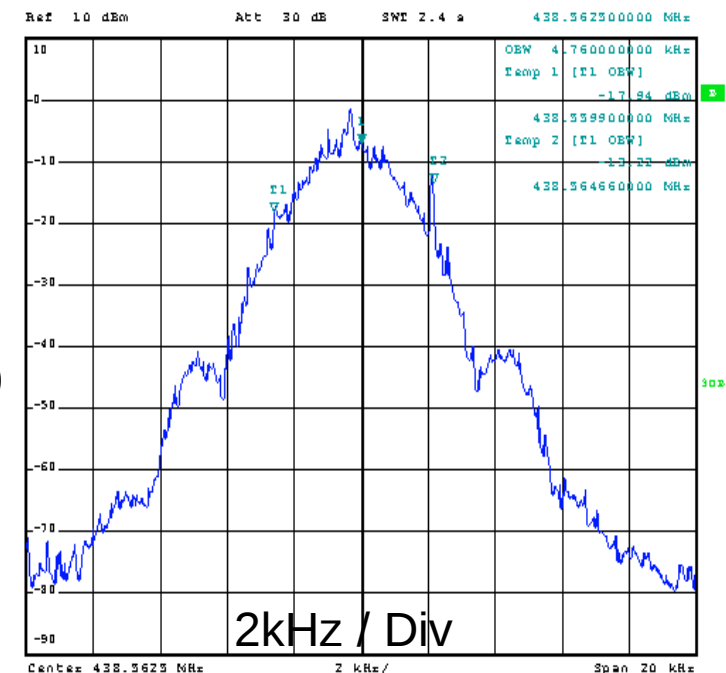
- NFM mit 3.5kHz Hub in 12.25kHz-Kanal
- IC-E91: 0,14 - 0,16 μV @12dB SINAD (-123dBm, MDS=-129dBm @NF=4dB, **CNR=6dB**)

- **Technische Daten DV (D-STAR)**

- 4.8kBit/s Datenrate: 2.4kBit/s Audio + 1.2kBit/s Fehlerschutz + 1.2kBit/s Daten
- GMSK – Gaussian Minimum Shift Keying
- Nominal 6.25kHz Kanalbandbreite, faktisch 12.5kHz, Kanalraster IARU Reg.1
- IC-E91: 0,22 μV @BER 10^{-2} (-120dBm, MDS=-129dBm @NF=4dB, **CNR=9dB**)

DV Mode:

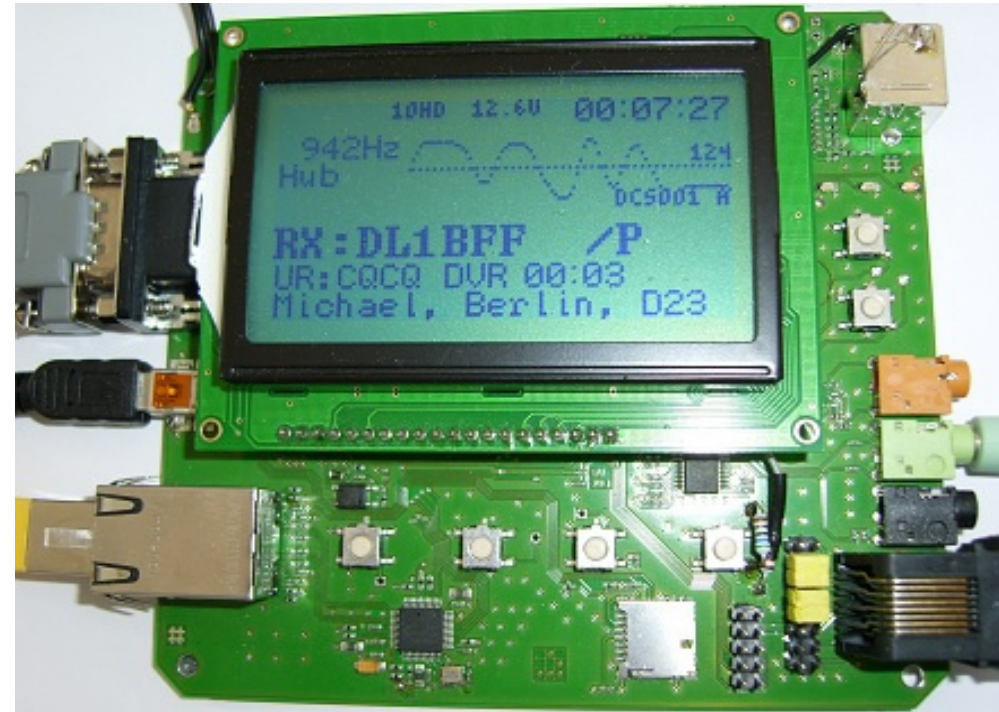
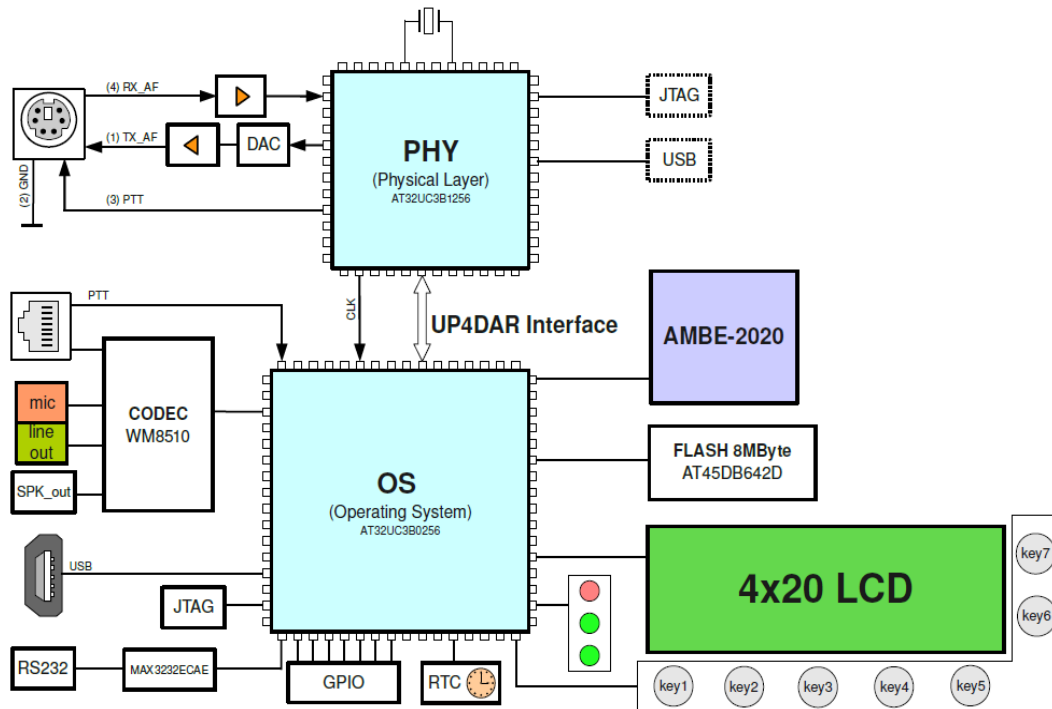
- + Sehr geschickte Wahl des Audio-Codecs
- + Gute Modulation mit konst. Einhüllenden
- Keine Nutzung der Soft Decision Information in FEC (noch Gewinn zu holen)
- Implementierungsverluste zugunsten hoher Integration



UP4DAR

- **Universal Platform for Digital Amateur Radio**

- Offenes Projekt von Denis, DL3OCK, Michael, DL1BFF, und weiteren Helfern
- Generische Hardware für viele denkbare digitale Übertragungsverfahren im AFu
- Erstes implementiertes Verfahren ist D-STAR
 - AMBE-Audio-Codec mit auf PCB
 - Implementierungsverluste heutiger Lösungen vermieden → beste Performance



Zusammenfassung

- **Digitalisierung der Übertragungsverfahren im Amateurfunk**
 - Ist eine riesige Herausforderung aufgrund der hohen verschiedenen Anforderungen
 - Wird nicht immer zu Beginn, aber auf lange Sicht eine Verbesserung der Qualität und Zuverlässigkeit unserer Verbindungen ermöglichen
 - Bringt eine Menge neuer Funktionalität die praktisch ist und Spaß macht
 - Ermöglicht den technischen Stand unseres Wissens auszubauen und fördert somit die Anerkennung des Amateurfunks
 - Ist aufgrund der zeitgemäßen Technik eine Chance, Nachwuchs für unser Hobby zu interessieren

**Digitalisierung ist eine Chance
für den Amateurfunk!**

Ende

