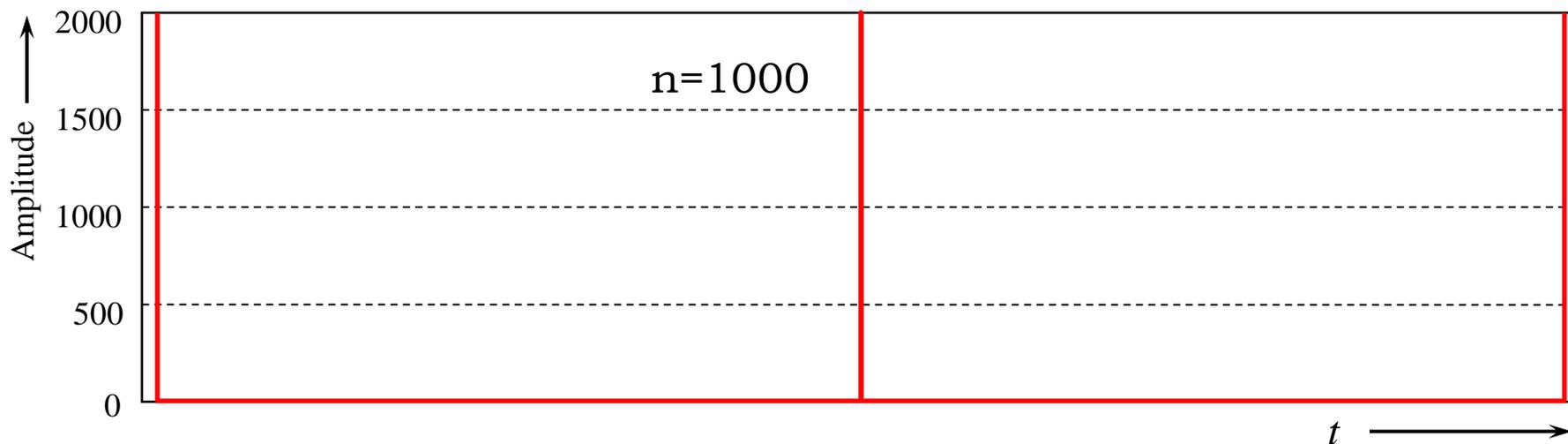
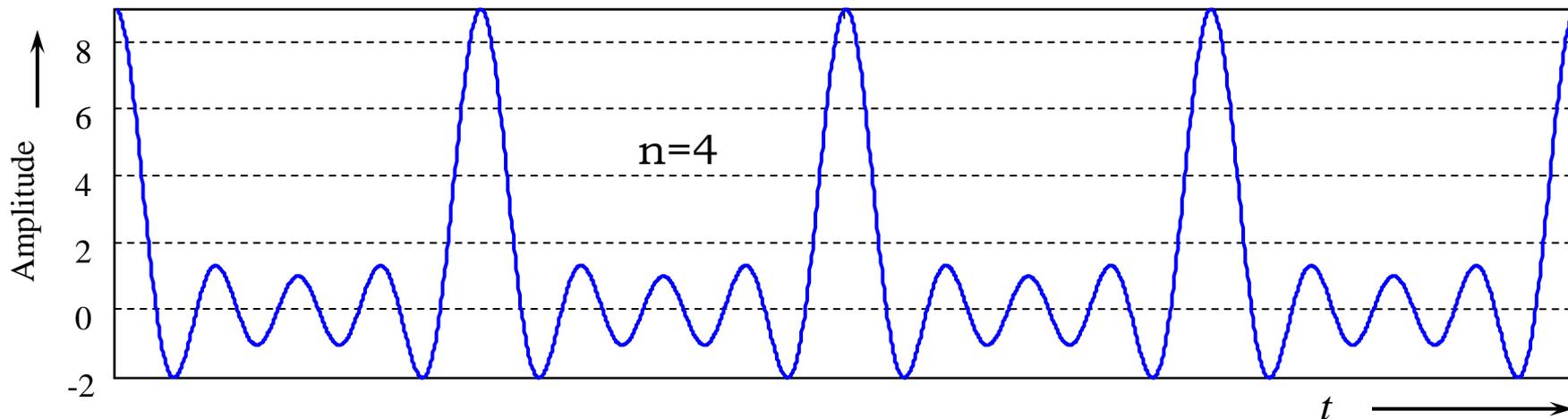


Das Mehrträgermodulationsverfahren (OFDM)

orthogonal frequency division multiplexing

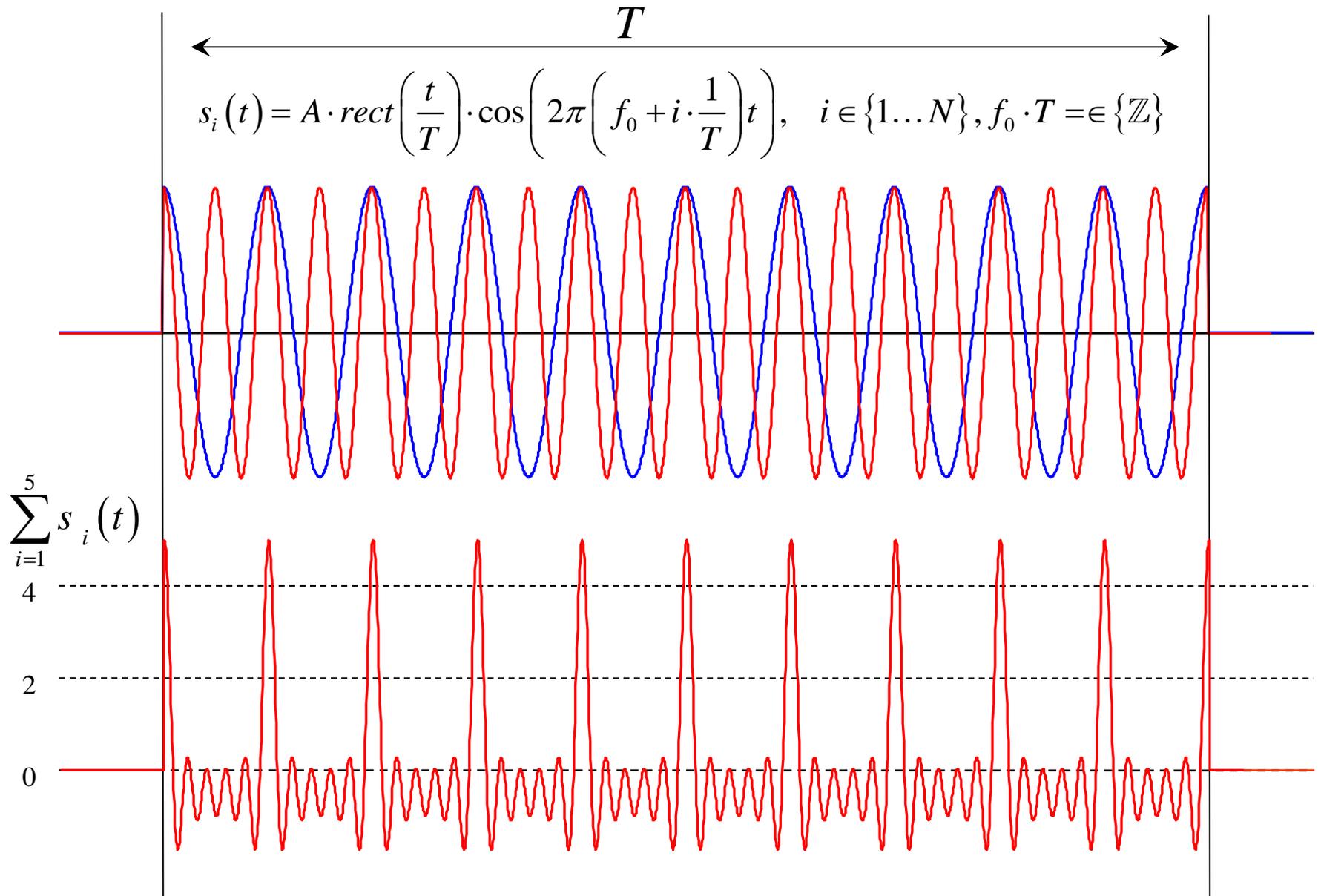
Aufsummieren einer harmonischen Reihe sinusförmiger Signale

$$\text{III}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi nt} = 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \cos(2\pi nt)$$



Einführung von Zeitbegrenzung unter Beibehalten der Orthogonalität

Signalformdauer T , Frequenzabstand $1/T$



Orthogonalität

$$s_i(t) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot \cos\left(2\pi\left(n \cdot \frac{1}{T}\right)t\right) \quad n \in \{\mathbb{Z}\}$$

Orthogonalität für sinusförmige Signale in diskreter Darstellung:

Eine Korrelation erfolgt stets über eine ganze Anzahl von Perioden

$$\left[\sum_{i=0}^{N-1} e^{-j2\pi mi/N} \cdot e^{j2\pi ni/N} \right] = N \text{ für } m = n \text{ und } 0 \text{ sonst}$$

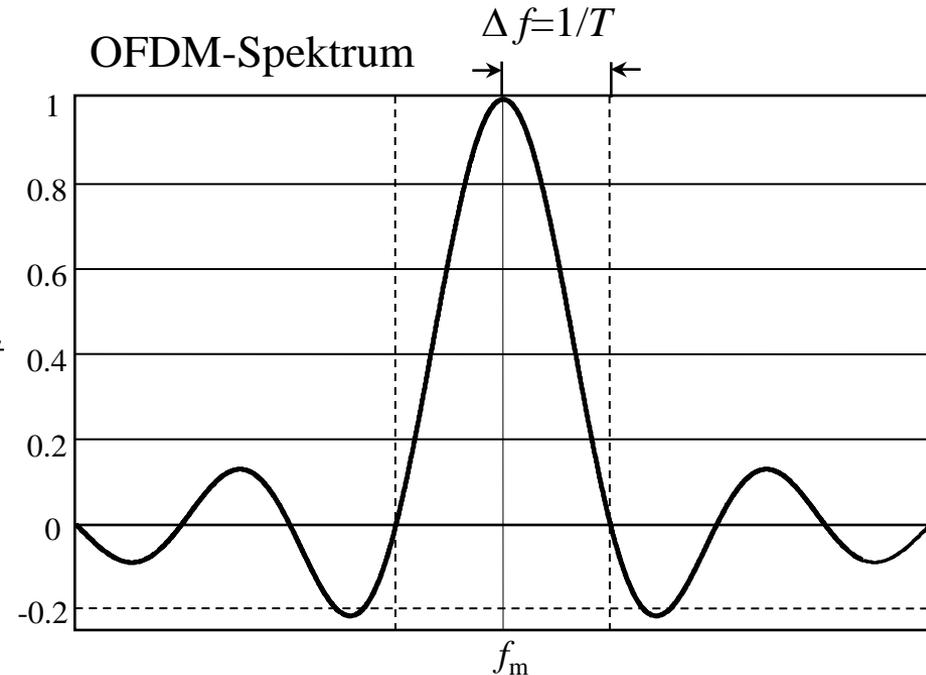
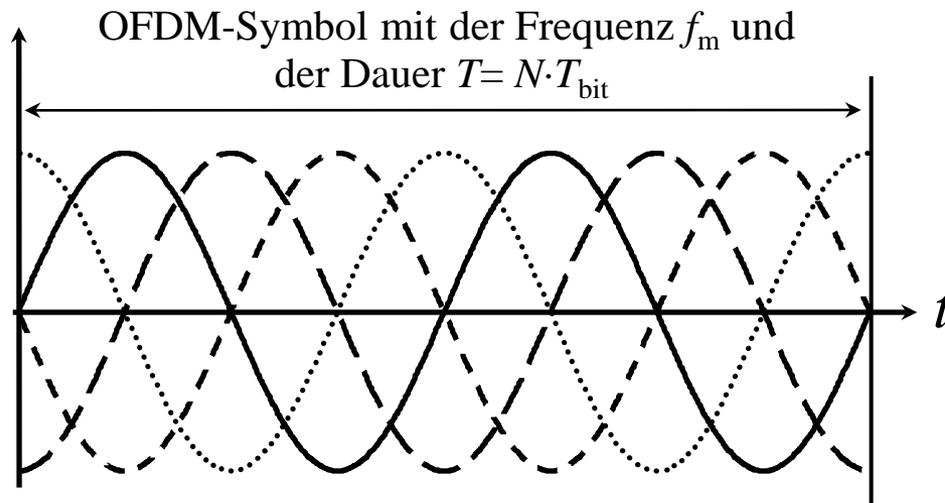
$$\sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(2\pi m \frac{i}{N}\right) \cdot \sin\left(2\pi n \frac{i}{N}\right) = \frac{N}{2} \text{ für } m = n \text{ und } 0 \text{ sonst}$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \cos\left(2\pi m \frac{i}{N}\right) \cdot \cos\left(2\pi n \frac{i}{N}\right) = \frac{N}{2} \text{ für } m = n \text{ und } 0 \text{ sonst}$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(2\pi m \frac{i}{N}\right) \cdot \cos\left(2\pi n \frac{i}{N}\right) = \text{immer } 0$$

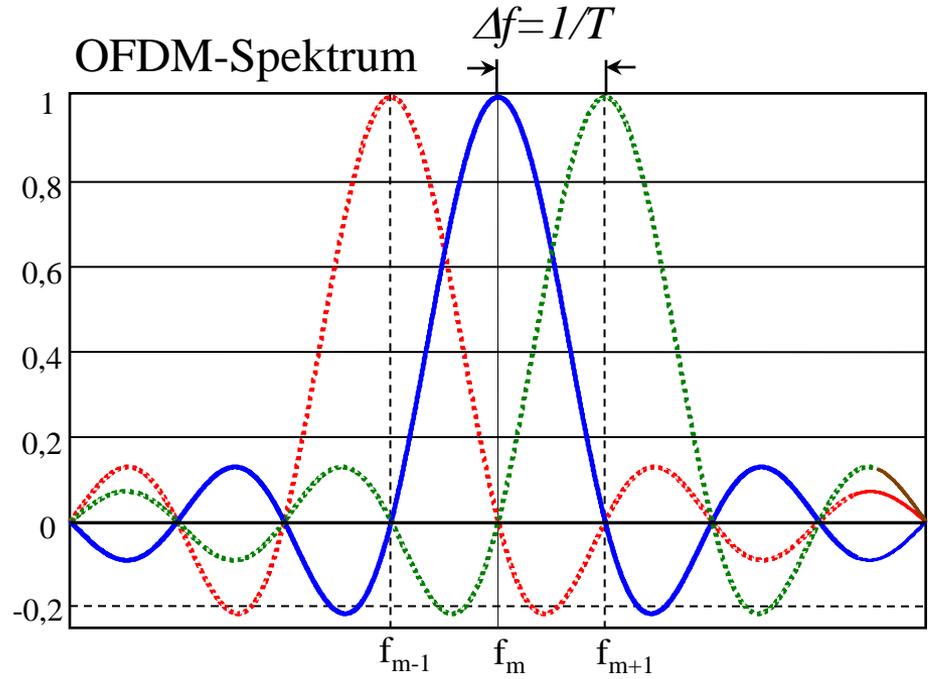
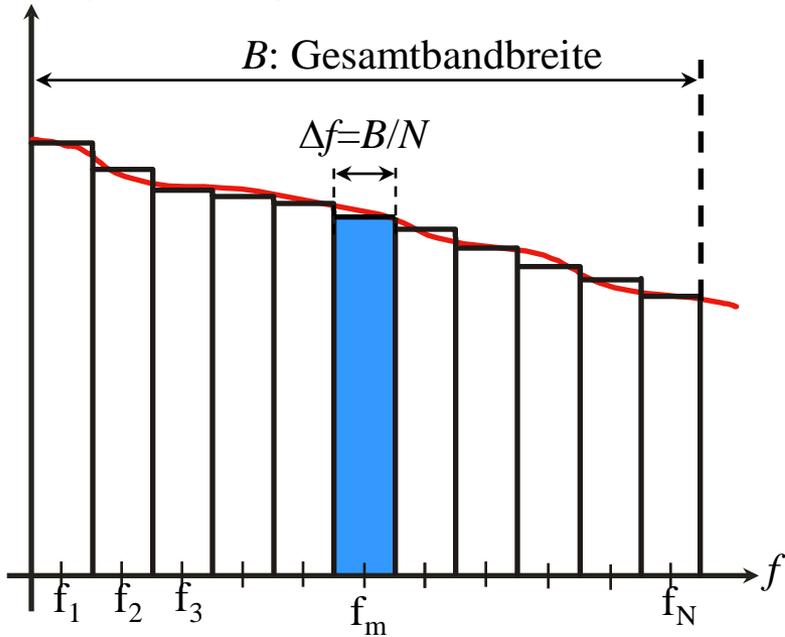
OFDM-Signale im Zeit- und Frequenzbereich

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cdot e^{j2\pi f_m t} \longleftrightarrow T \cdot \text{sinc}(\pi \cdot T \cdot f) * \delta(f - f_m) = T \cdot \text{sinc}[\pi \cdot T \cdot (f - f_m)]$$

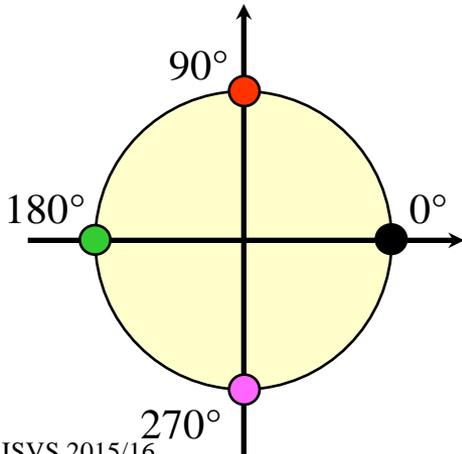


Weitere Aspekte von OFDM-Signalen: Trägermodulation

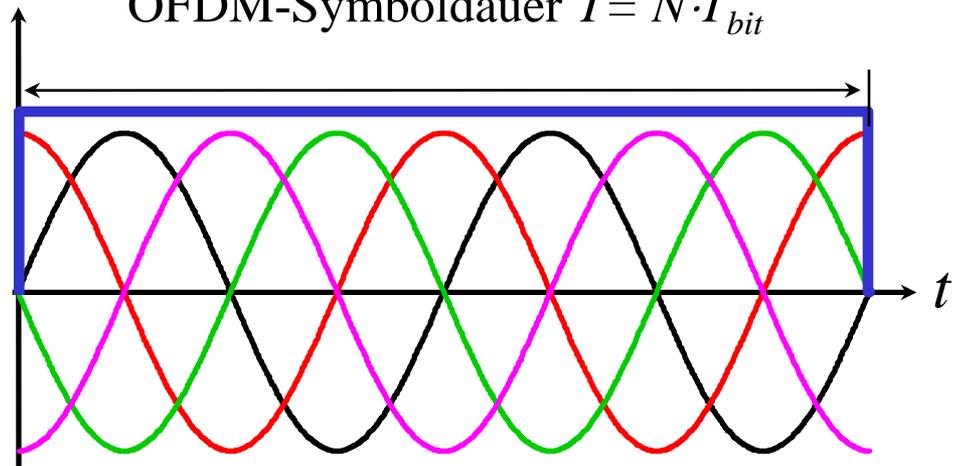
N Träger $\hat{=}$ N Subkanäle
 jeder „trägt“ $1/N$ der Datenrate



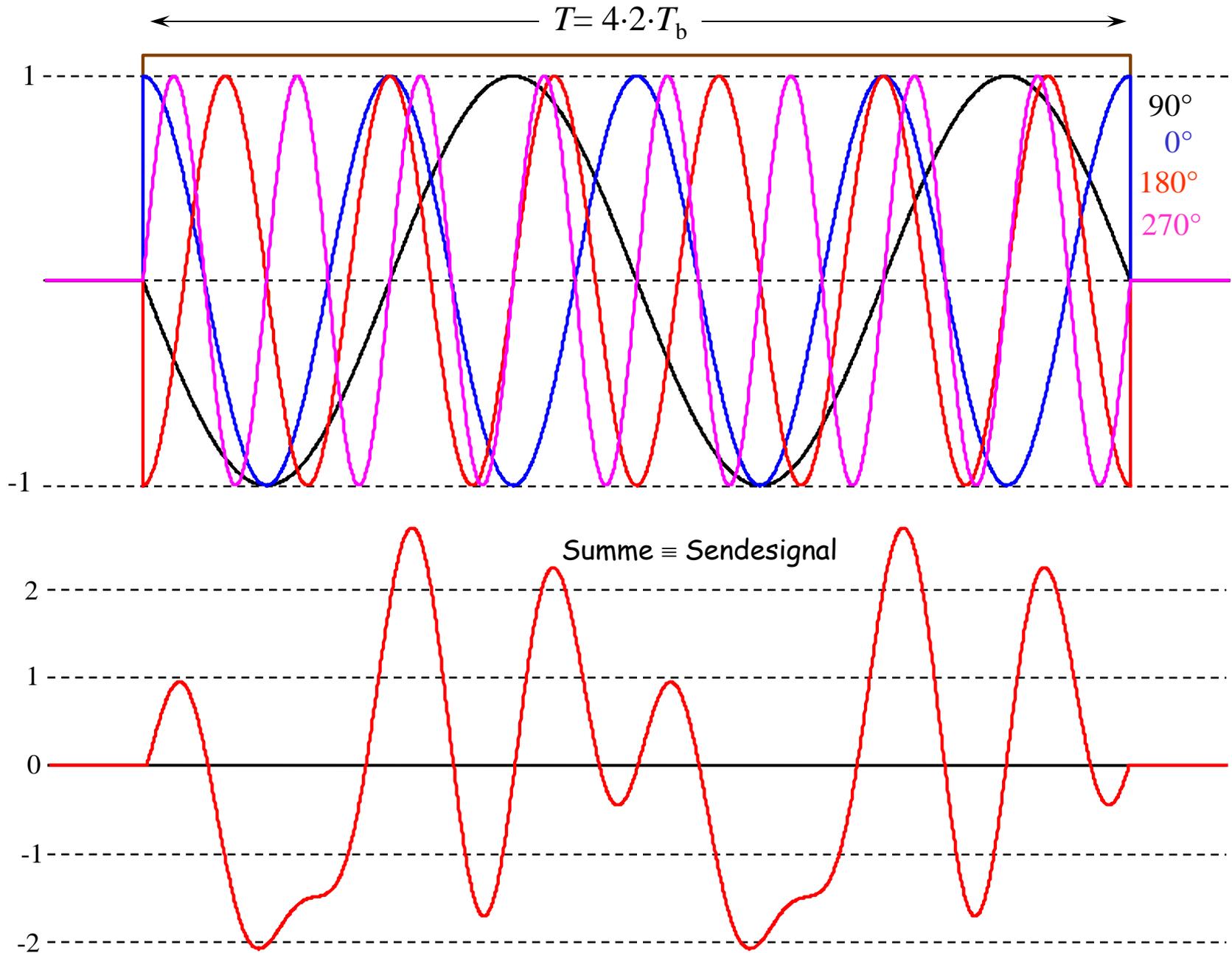
QPSK Signalraumdiagramm



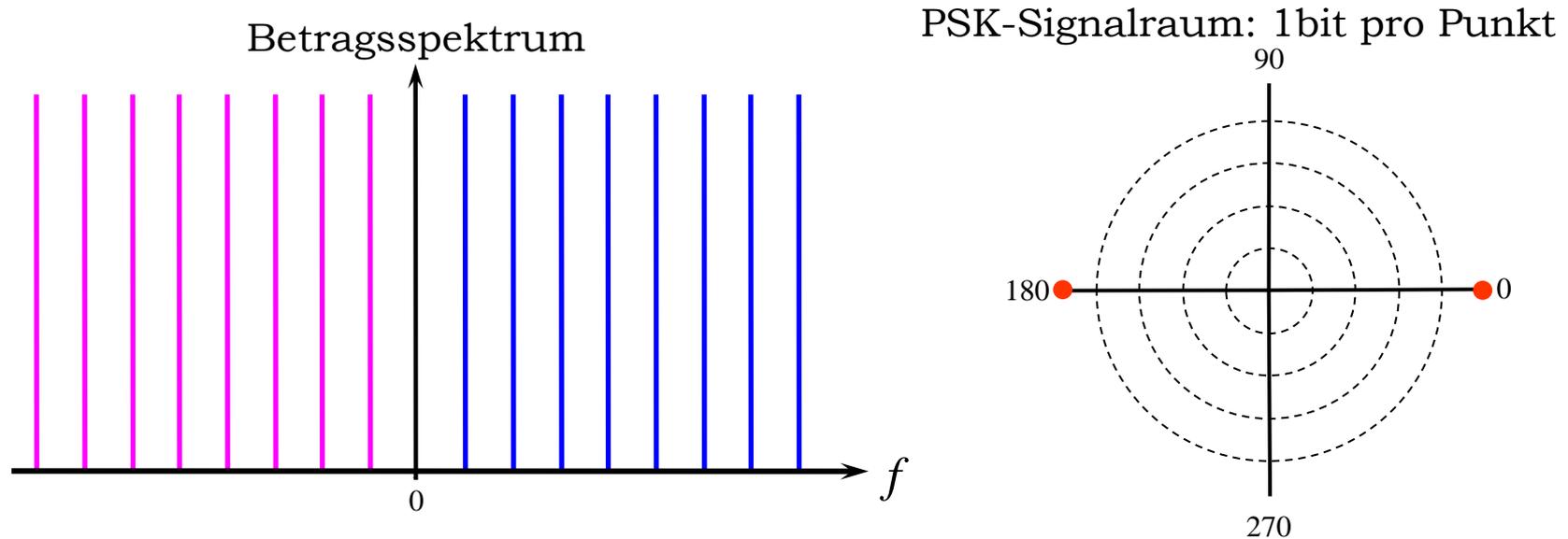
OFDM-Symboldauer $T = N \cdot T_{bit}$



OFDM im Zeitbereich: 4 Träger mit QPSK-Modulation



OFDM-Beispiel mit 8 Trägern und BPSK-Modulation: $T_s = 8 \cdot T_b$



Sender: Die Abtastwerte $s(k)$ des Sendesignals müssen reell sein
 $\Rightarrow \text{Re}\{\underline{C}(n)\}$ gerade und $\text{Im}\{\underline{C}(n)\}$ ungerade

$$\text{IDFT: } s(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \underline{C}(n) \cdot e^{j2\pi \frac{nk}{N}} = \frac{1}{N} \left[\sum_{n=0}^{N-1} \text{Re}\{\underline{C}(n)\} \cdot \cos\left(2\pi \frac{nk}{N}\right) - \sum_{n=0}^{N-1} \text{Im}\{\underline{C}(n)\} \cdot \sin\left(2\pi \frac{nk}{N}\right) \right]$$

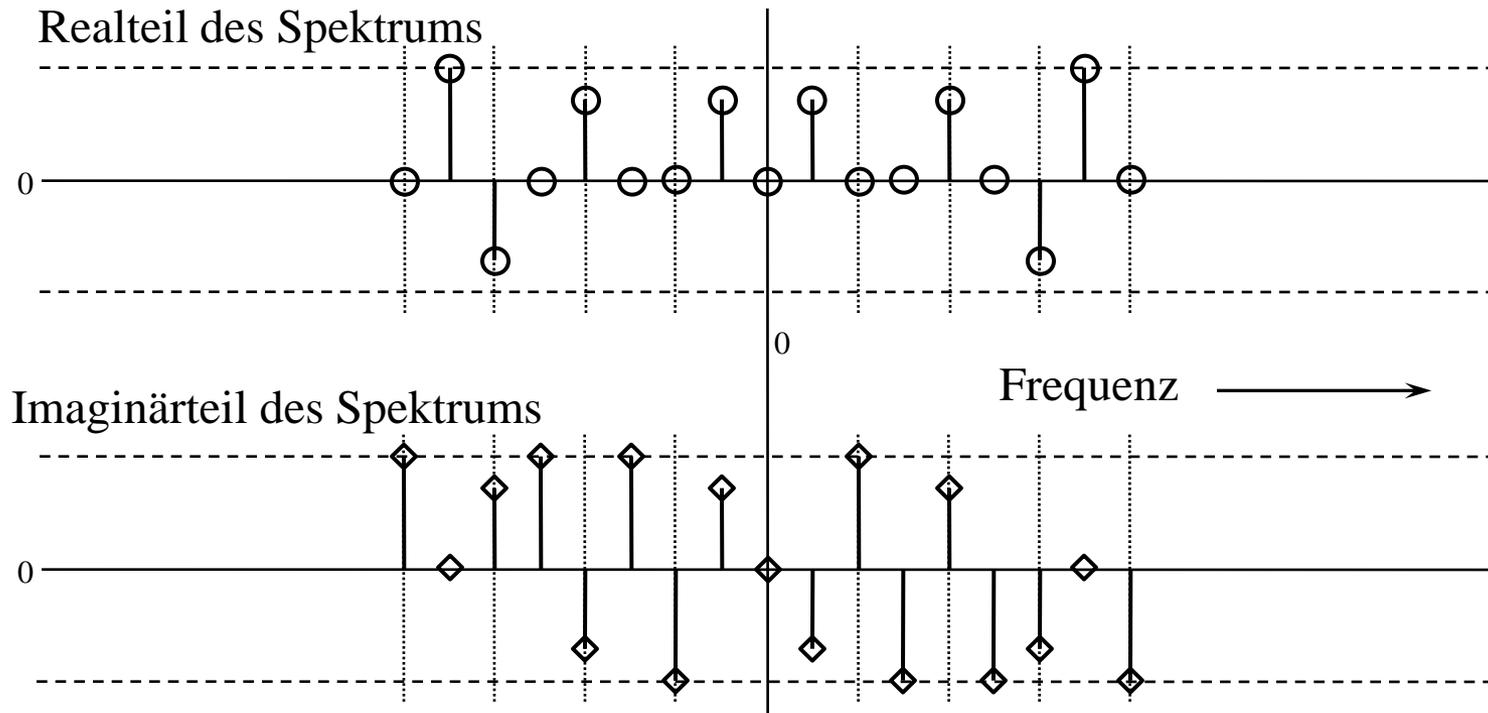
Bedingung: $\Rightarrow \sum_{n=0}^{N-1} \left[\text{Re}\{\underline{C}(n)\} \cdot \sin\left(2\pi \frac{nk}{N}\right) + \text{Im}\{\underline{C}(n)\} \cdot \cos\left(2\pi \frac{nk}{N}\right) \right] \stackrel{!}{=} 0$

Empfänger: Die DFT erzeugt ein komplexes Spektrum

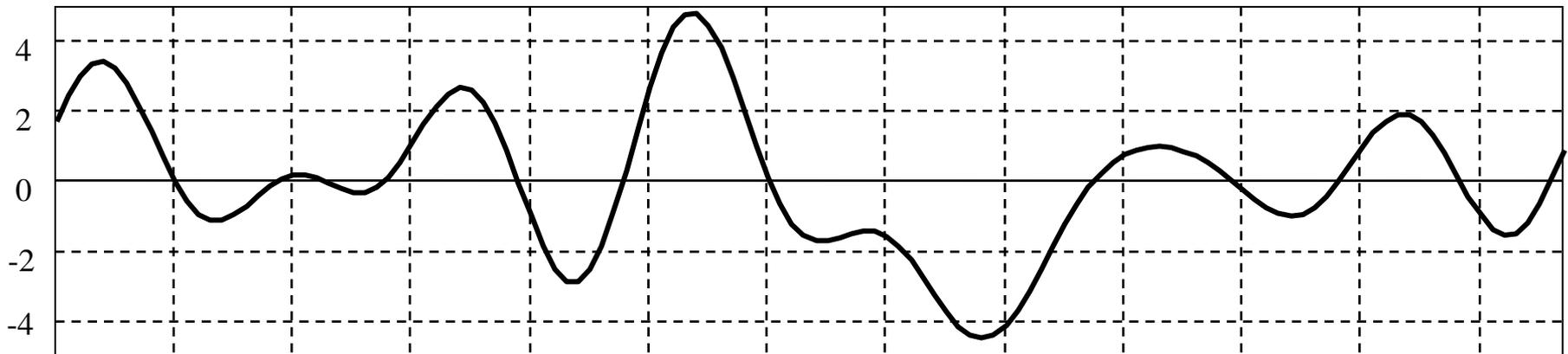
$$\text{DFT: } \underline{C}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \cdot e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} = \underbrace{\sum_{k=0}^{N-1} s(k) \cdot \cos\left(2\pi \frac{nk}{N}\right)}_{\text{Realteil von } \underline{C}(n)} - \underbrace{j \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \cdot \sin\left(2\pi \frac{nk}{N}\right)}_{\text{Imaginärteil von } \underline{C}(n)}$$

OFDM-Sendesignalerzeugung allgemein:

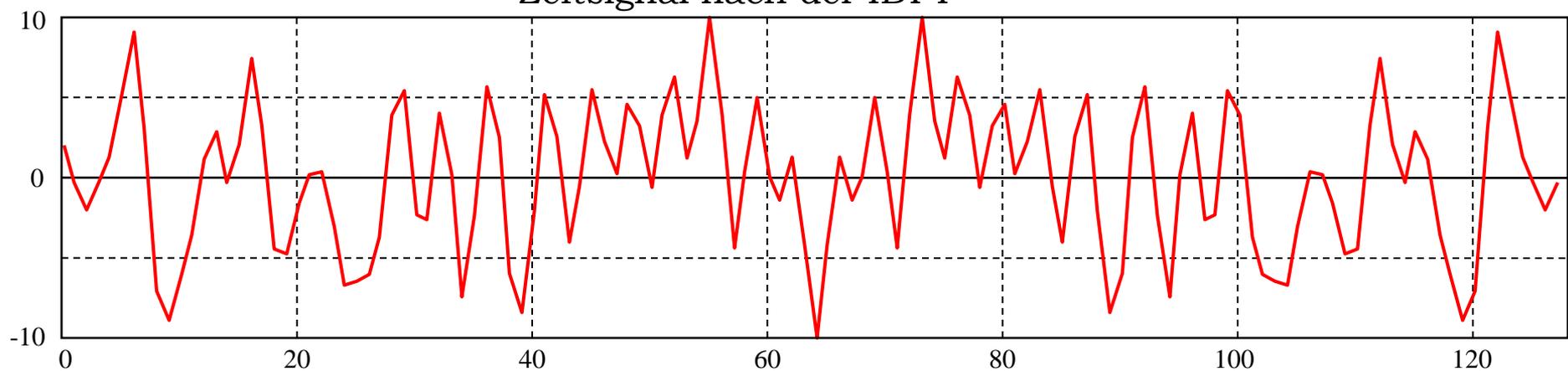
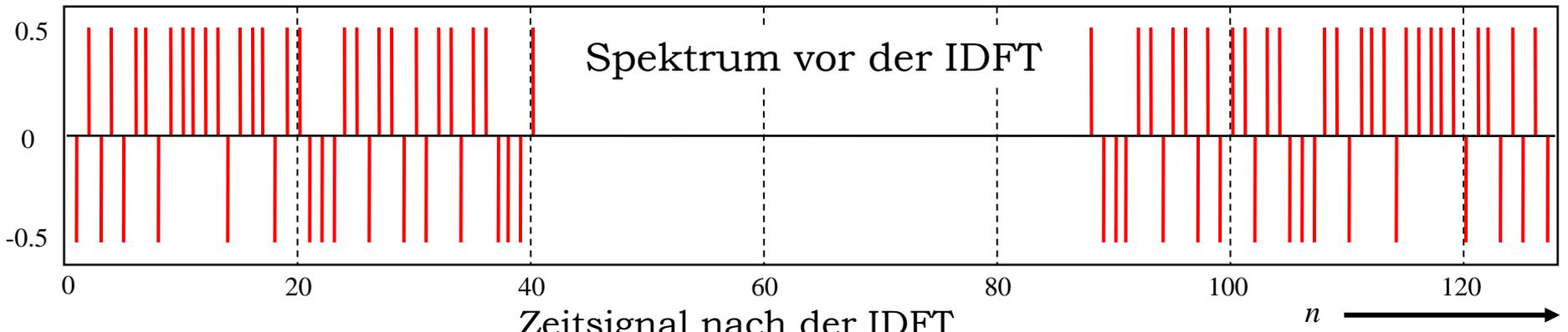
Amplitude und Phase der Spektrallinien werden durch die Modulation bestimmt



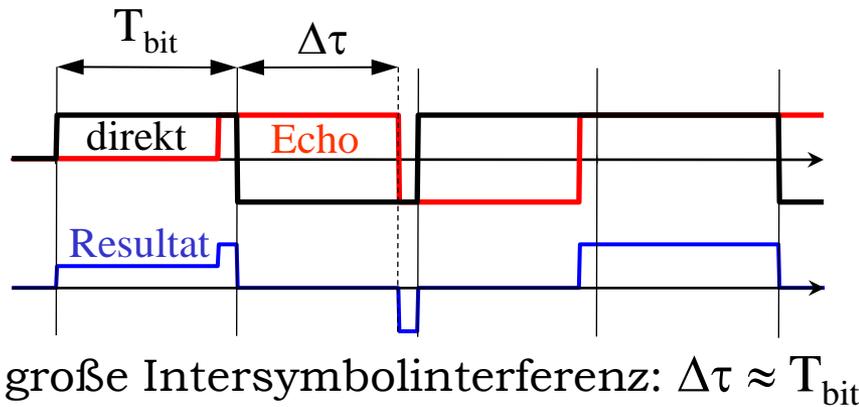
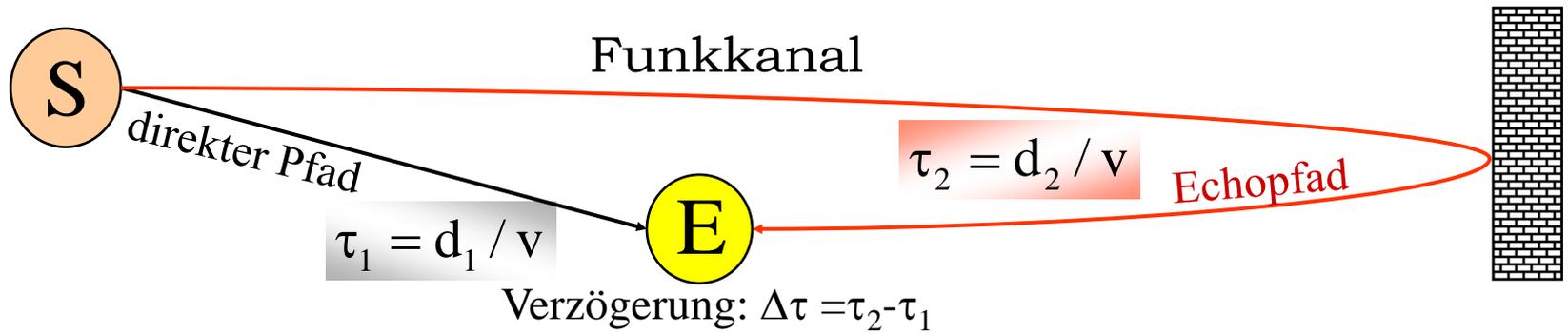
Sendesignal im Zeitbereich nach IFFT und Digital/Analog-Wandlung



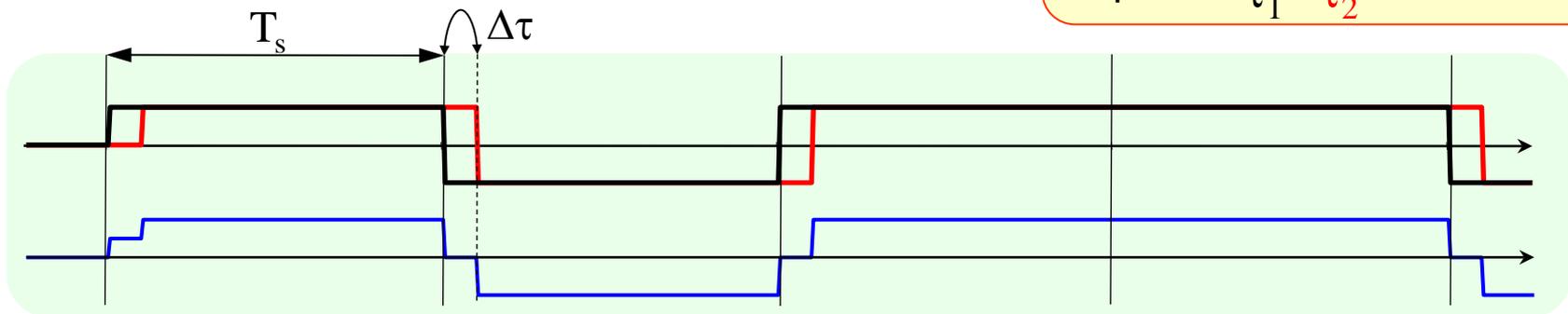
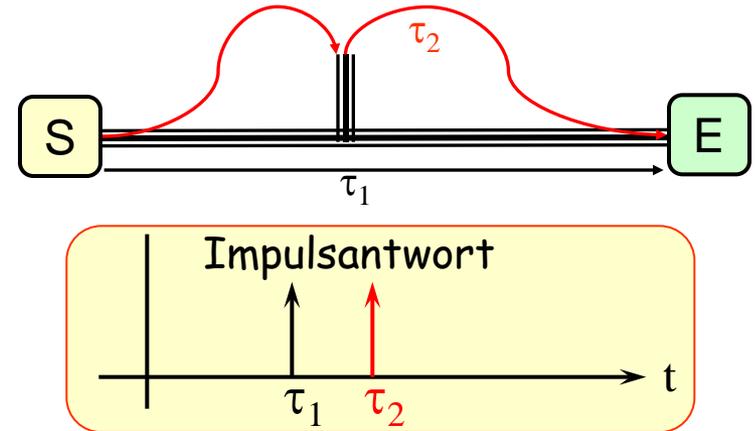
Beispiel: $N=128$, $f_s=1\text{MHz}$, $Z=40$ Träger, $\Delta f=f_s/N=7,8\text{kHz}$, BPSK-Modulation



Reflexionen bzw. Echos führen zu Intersymbolinterferenz

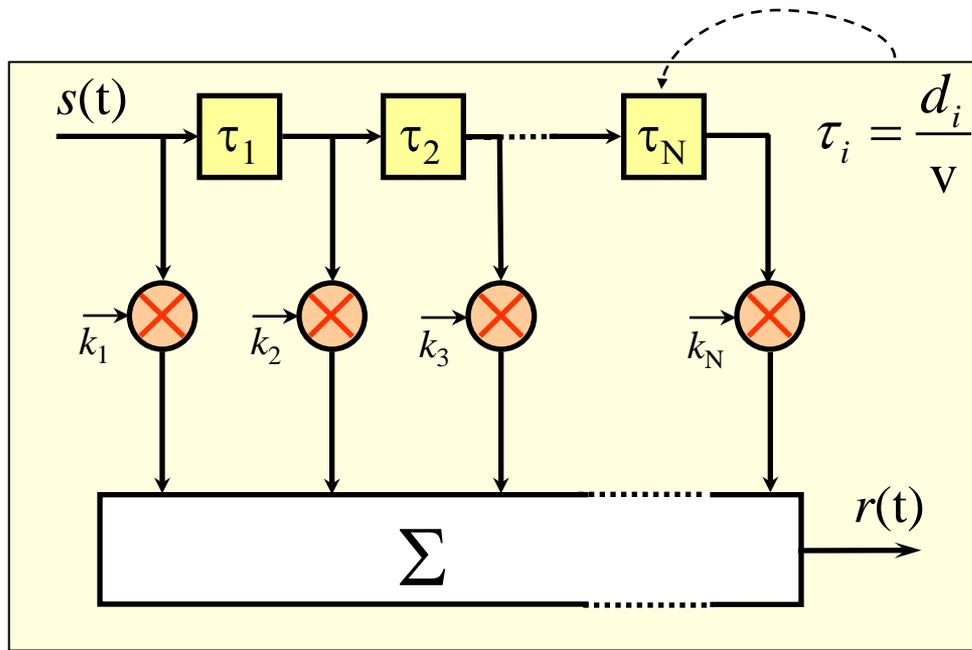


Leitung mit Abzweig (ohne Anpassung)



geringe Intersymbolinterferenz nach „Dehnung“ der Bit- bzw. Symboldauer: $\Delta\tau \ll T_s$

Ein echobasiertes Kanalmodell für Stromnetze



nur Echos: $k_i = \text{konst}$

Impulsantwort

$$h_E(t) = \sum_{i=1}^N k_i \cdot \delta(t - \tau_i)$$

Fourier-
transf.

Übertragungsfunktion

$$H_E(f) = \sum_{i=1}^N k_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}$$

Tiefpaßverhalten

$$k_i \Rightarrow k(f, d_i) = g_i \cdot e^{-\alpha(f) \cdot d_i}$$

Abhängig von der Anzahl, Länge und Anpassung der Abzweige
im allgemeinen komplex

Ergebnis

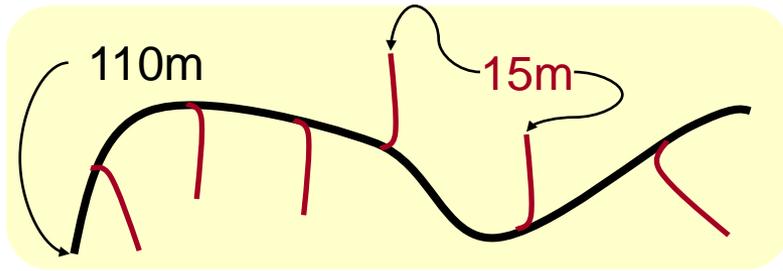
$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-j2\pi f \frac{d_i}{v}} \cdot e^{-\alpha(f) \cdot d_i}$$

Dämpfungskoeffizient:

$$\alpha(f) \approx c_1 \cdot \sqrt{f} + c_2 \cdot f \approx a_0 + a_1 \cdot f^{0.5 \dots 1}$$

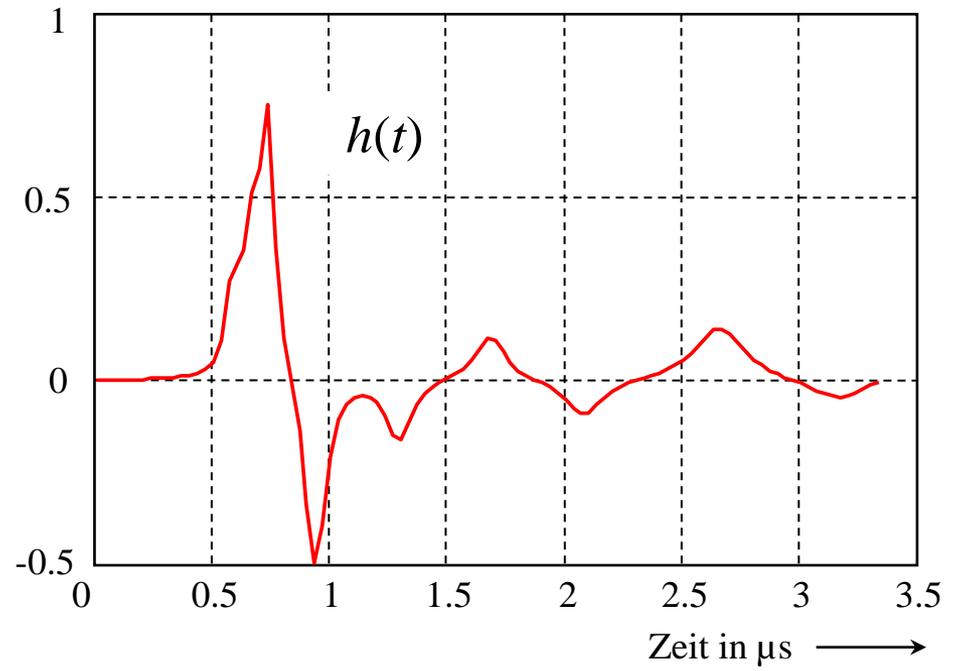
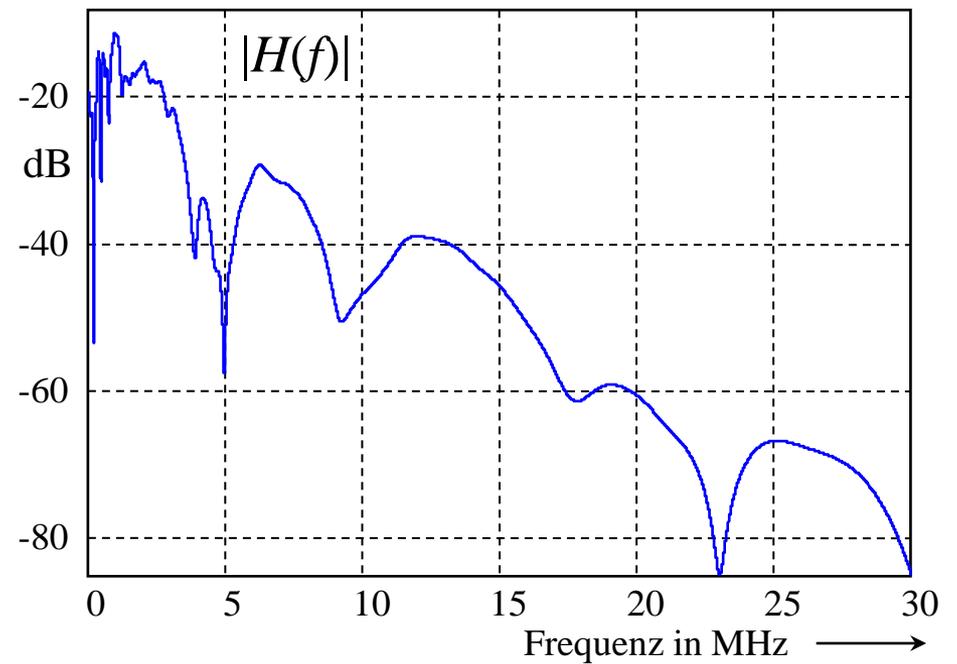
↑ Skineffekt ↑ dielektrische Verluste

Ein komplexeres Beispiel

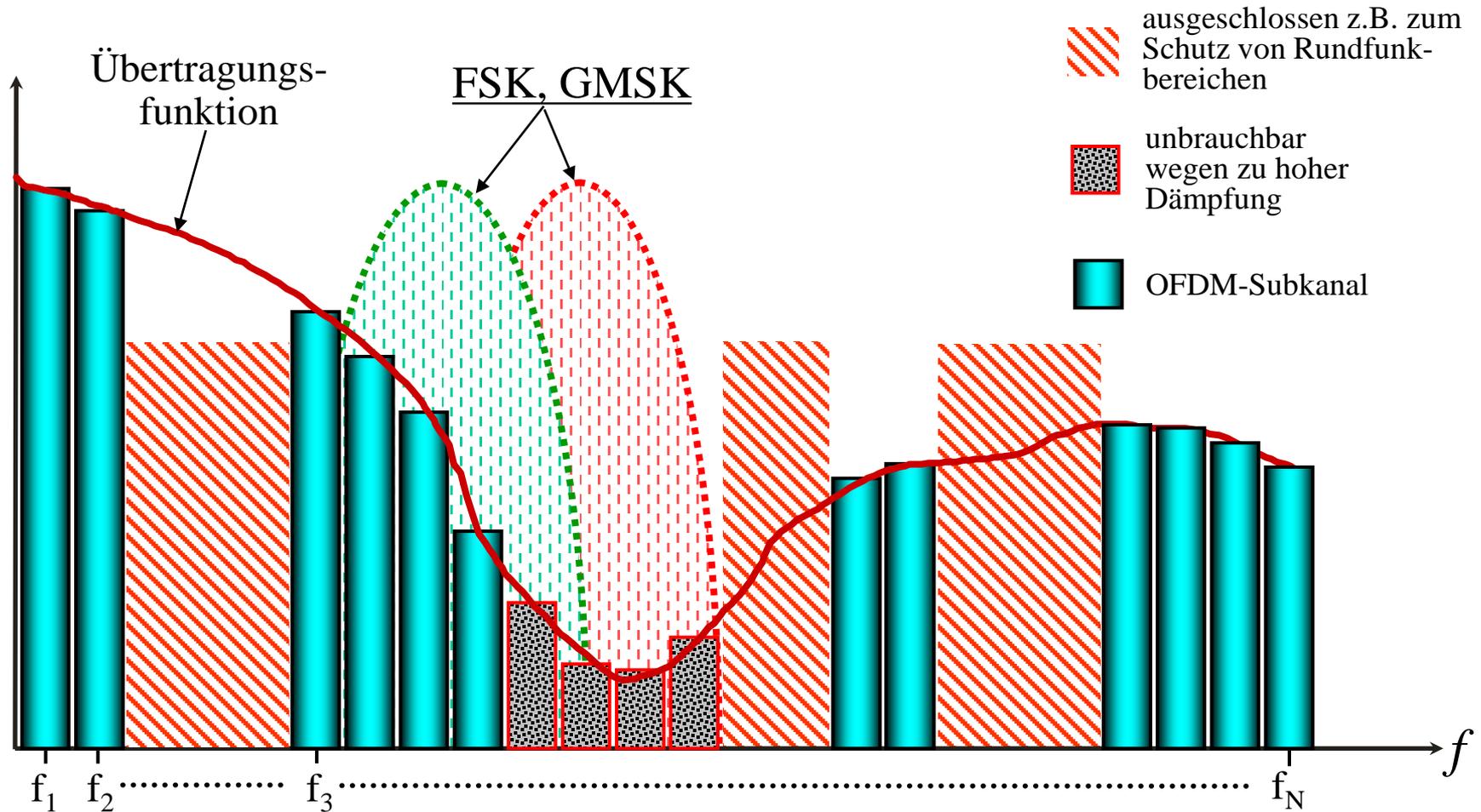


$$\alpha(f) = 7,8 \cdot 10^{-10} \cdot f^1 \left[\frac{1}{\text{m}} \right] \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = 1,5 \cdot 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Pfad	d_i/m	g_i
1	90	0.029
2	102	0.043
3	113	0.103
4	143	-0.058
5	148	-0.045
6	200	-0.040
7	260	0.038
8	322	-0.038
9	411	0.071
10	490	-0.035
11	567	0.065
12	740	-0.055
13	960	0.042
14	1130	-0.059
15	1250	0.049



Warum gilt OFDM generell das beste Modulationsverfahren für verschiedene PLC-Anwendungen?

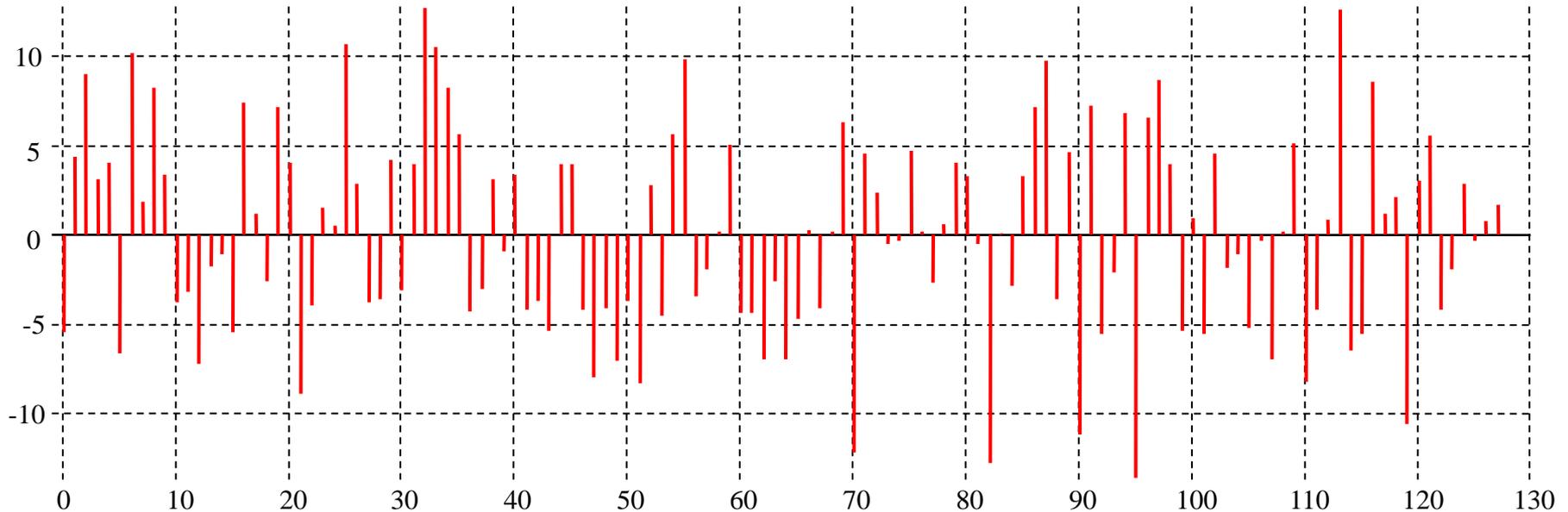


OFDM-Zeitsignalerzeugung

'Spitzen-zu-Mittelwert-Verhältnis', beschrieben durch den 'Crestfaktor'

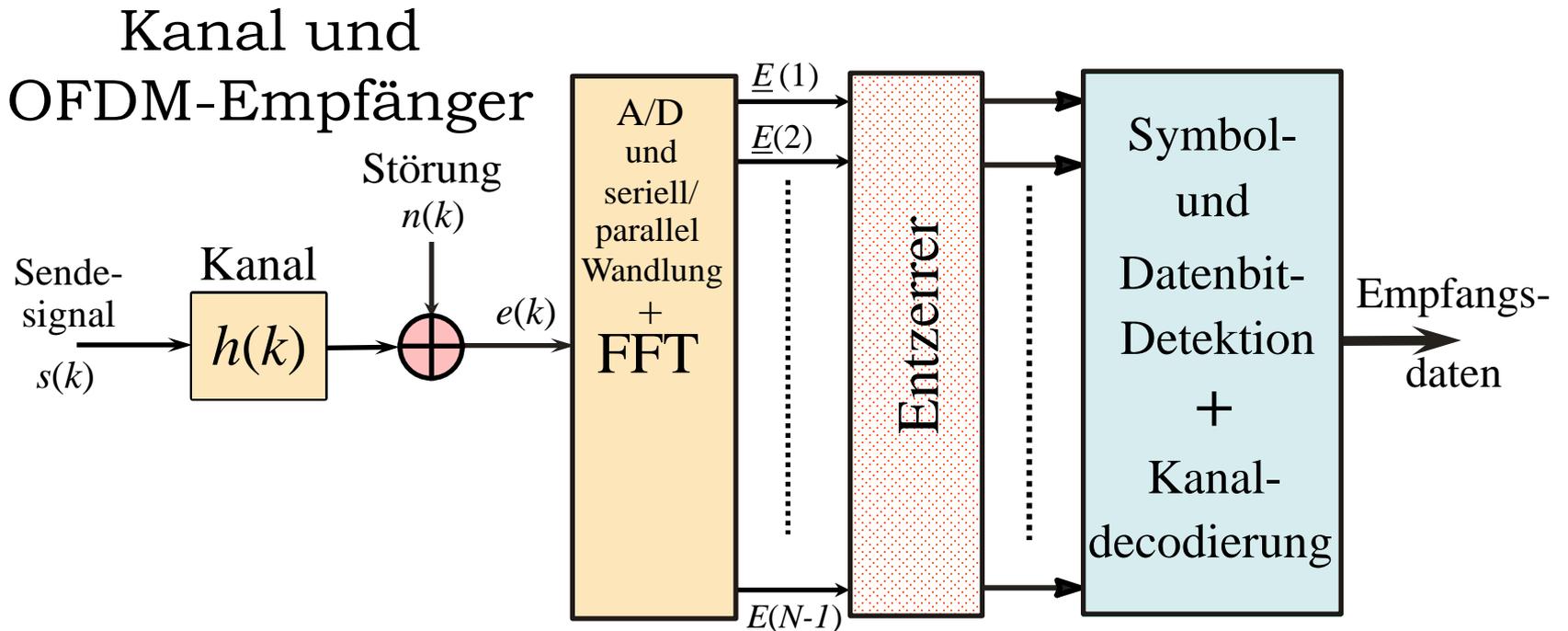
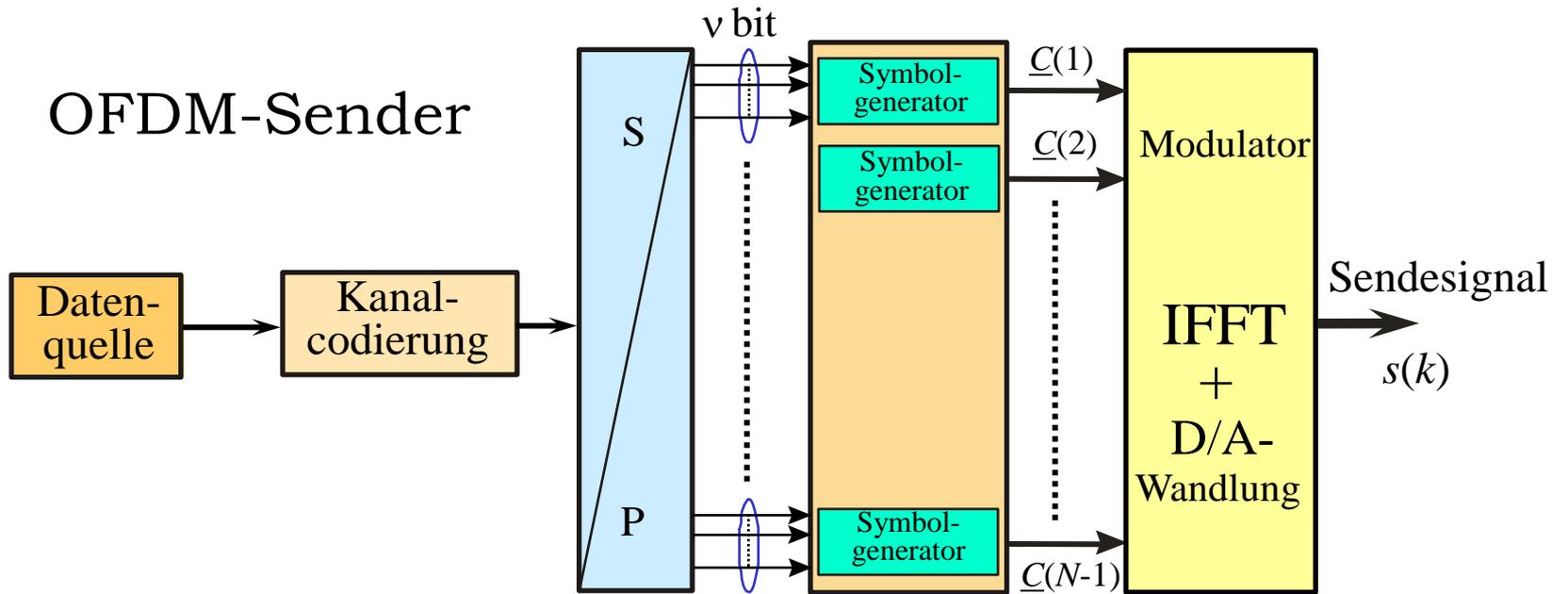
$$s(k) = \text{rect}\left(\frac{k - \frac{N}{2}}{N}\right) \cdot \sum_{\nu} \cos\left(2\pi \cdot \nu \cdot f \cdot kT + \underbrace{\psi_{\nu}}_{\in\{0,2\pi\} \text{ zufällig}}\right) \quad \text{mit } \nu = 0..63$$

Summe von 64 orthogonalen PSK-modulierten Trägern im Zeitbereich mit zufälligen Phasen



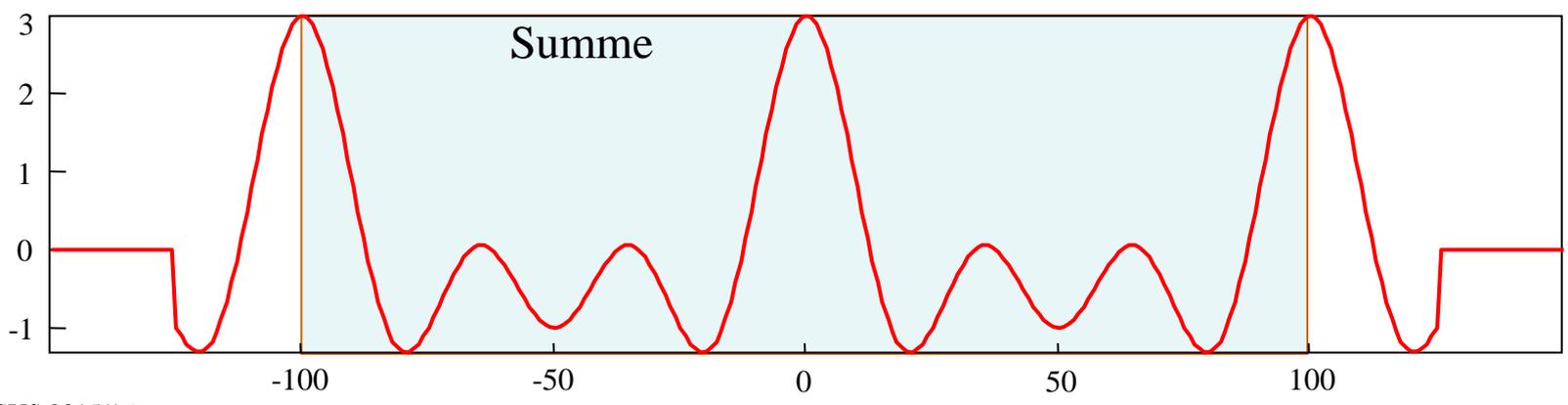
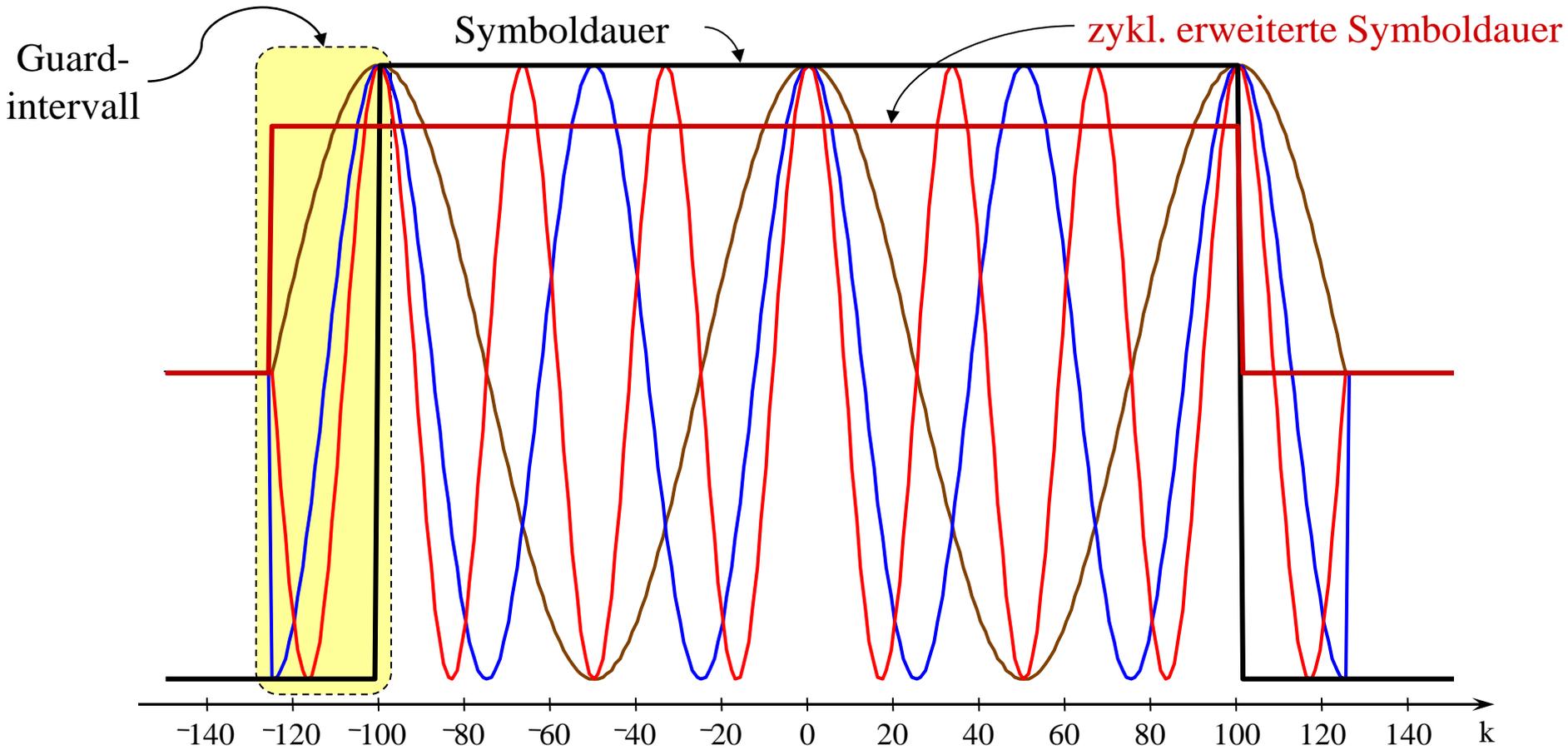
Crestfaktor:
$$= \frac{\max\{|s(k)|\}}{\text{Eff-W}\{s(k)\}} = 2,4$$

$$\text{Effektivwert}\{s(k)\} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{k=0}^{N-1} [s(k)]^2}$$

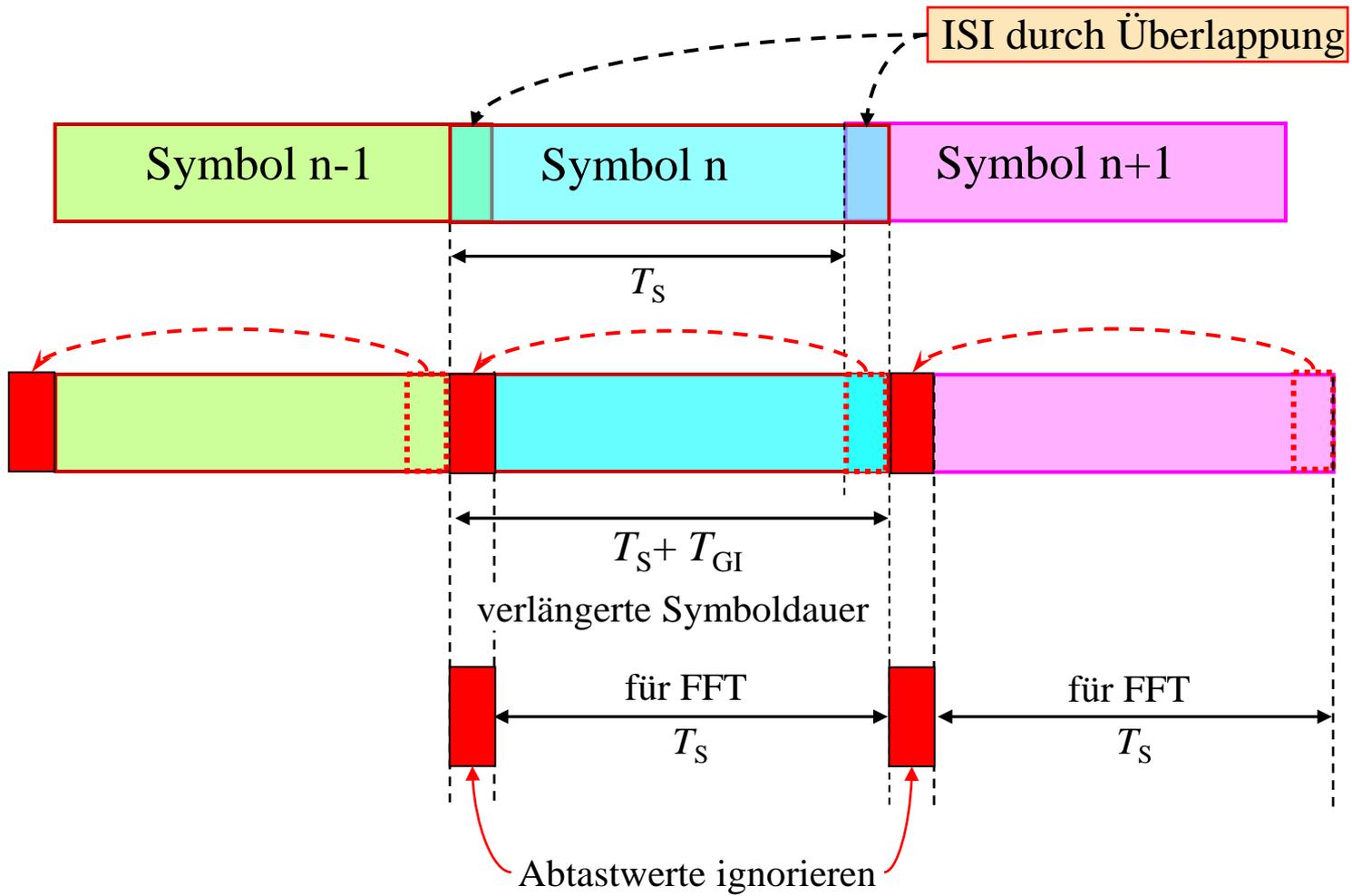


Typische Eigenschaften von OFDM II

- ◆ hohe spektrale Effizienz
- ◆ automatische Echoenterdrückung ohne Entzerrer
 - keine Intersymbolinterferenz
- ◆ Beseitigung von 'Restechos' mit Schutzintervalltechnik
 - niedriger Aufwand für die Symbolsynchronisation
- ◆ flexibel anpaßbar an verschiedenartige Kanaleigenschaften
 - gezielte Ausblenden ungünstiger oder zu schützender Frequenzen
 - intelligentes Verhalten in komplexen Störszenarien
- ◆ Einfach erweiterbar durch Hinzufügen von Trägern
 - hohe Flexibilität bei der Trägermodulation
- ◆ Nachteile: Crestfaktor, Empfindlichkeit gegenüber Frequenzfehlern



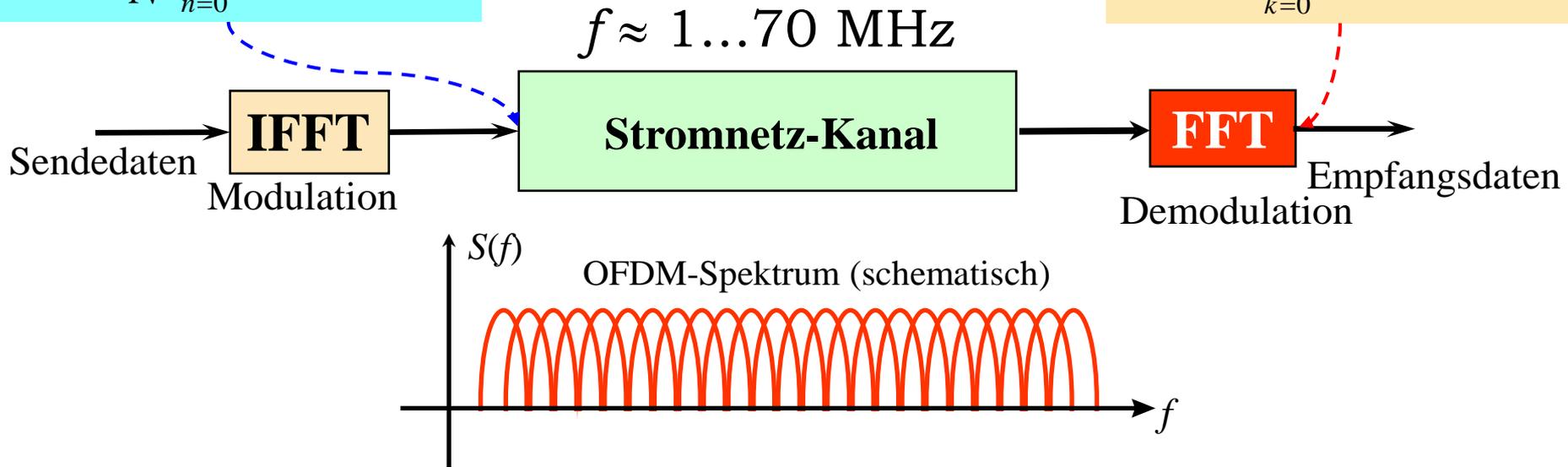
Nutzen des Guardintervalls: Vermeiden der Auswirkung von ISI



OFDM-Systembeispiele

$$s(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \underline{S}(n) \cdot e^{j2\pi \frac{n}{N}k}$$

$$\underline{S}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \cdot e^{-j2\pi \frac{n}{N}k}$$



Zugang:

<u>Datenrate</u>	2 Mbit/s, N = 1000, Trägermod.: QPSK
<u>Symbolrate</u>	1000 s ⁻¹ (Δf = 1kHz) ⇒ Dauer: 1ms
<u>Gesamtbandbreite</u>	1 MHz

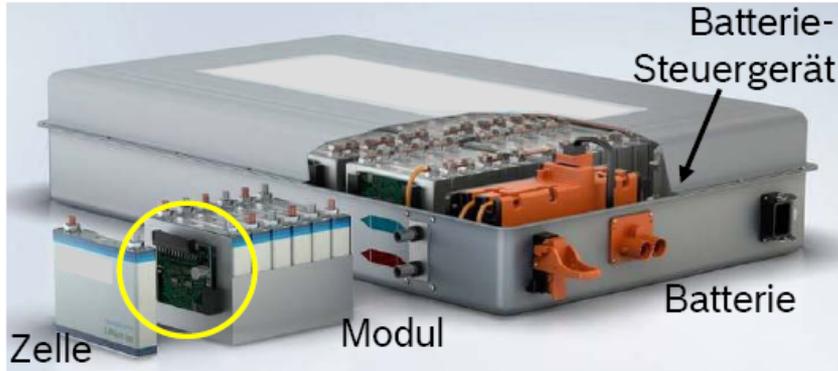
Inhaus:

<u>Datenrate:</u>	10 Mbit/s, N = 512, QPSK
<u>Symbolrate:</u>	9765 s ⁻¹ (Δf = 9,765kHz) ⇒ Dauer: 102,4μs
<u>Gesamtbandbreite:</u>	5 MHz

Einsatzgebiete der Kommunikation über Energienetze

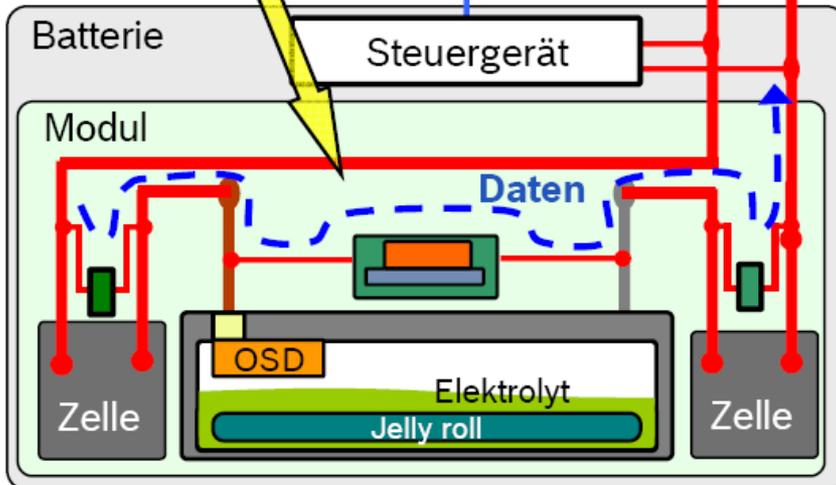
- ◆ “niederrartige” Dienste in den Bändern A-D nach EN50065
 - ‘Smart-Grid’ Technologien
 - Zählerfernabfrage, energiebezogene Dienste, Tarifgestaltung der EVU
 - Vernetzung von Hausgeräten (Steuerung, Statusabfrage, Diagnose)
- ◆ Breitbanddienste im Frequenzbereich bis ca. 30MHz
“Last Mile”-Lösungen für den schnellen Internetzugang
 - permanente Verbindung über jede Steckdose => **kein Erfolg!**
- ◆ schnelle Inhaus-Netzwerke mit Datenraten bis 500Mbit/s
 - dominant am Markt HomePlug-Standard
 - real: ca. 50Mbit/s bei Frequenznutzung bis 70MHz
- ◆ KFZ-Kabelbaumkonzept für Datenraten >10Mbit/s
 - hohe Symmetrie, Karosserie wird vom Stromtransport ausgeschlossen
- Datenbuskonzepte für Li-Ionen-Batterieüberwachung
 - hohe Echtzeitanforderungen, keine zusätzlichen Leitungen
- ◆ PLC im Bergbau: vereinheitlichtes Energie- und Datennetz
- ◆ PLC in Satelliten: vereinheitlichtes Energie- und Datennetz

Datenbuskonzepte für Li-Ion Batterien

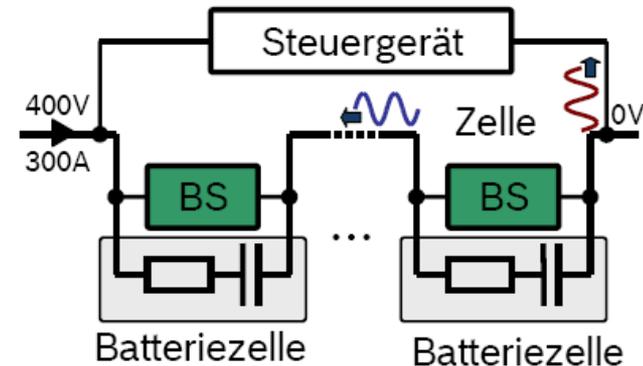


Innovation

CAN Strom

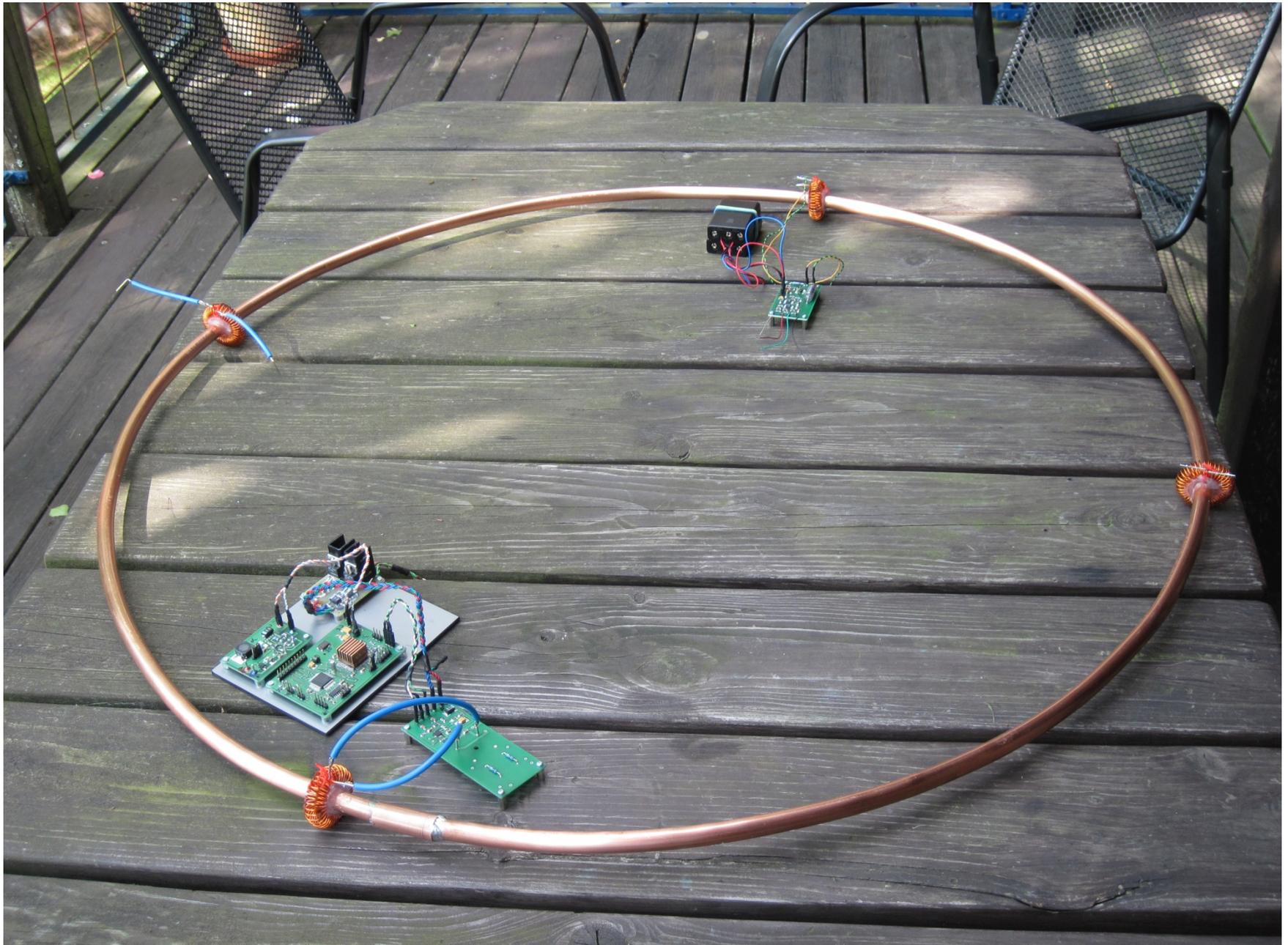


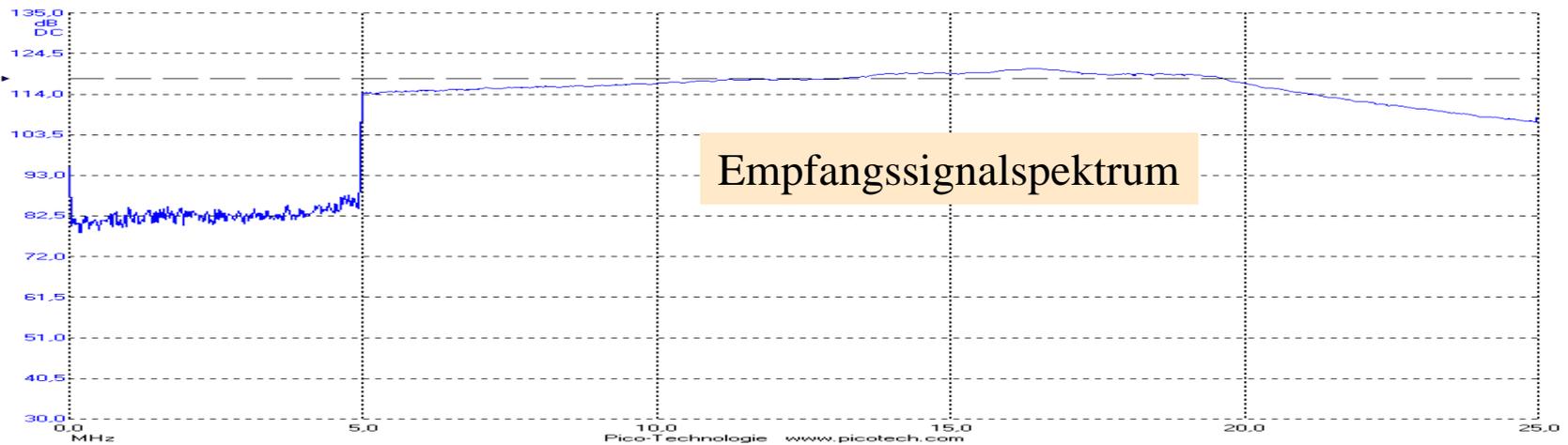
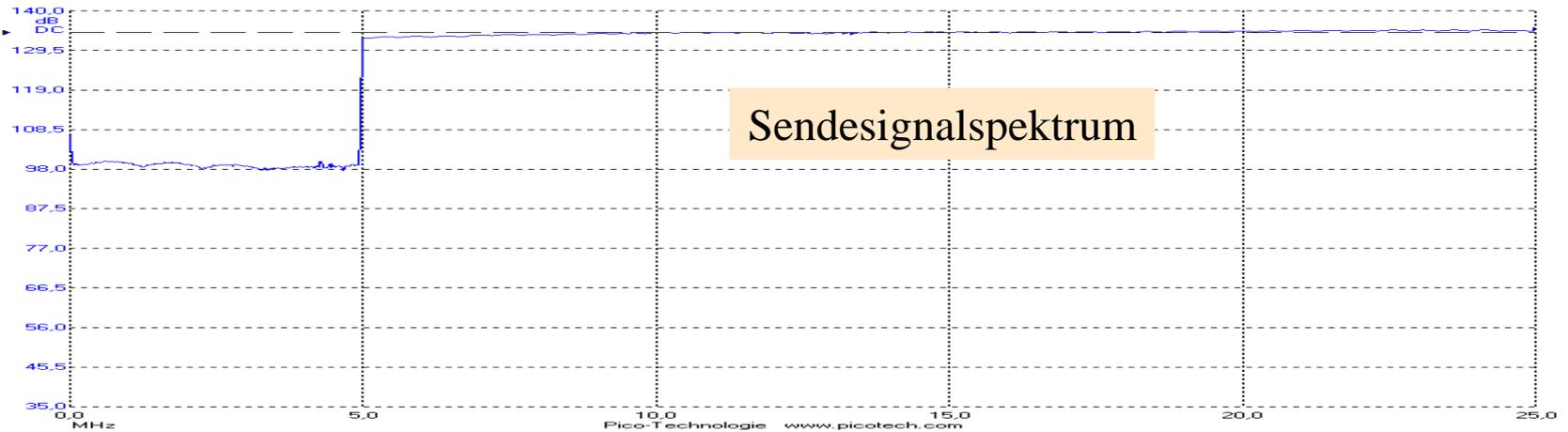
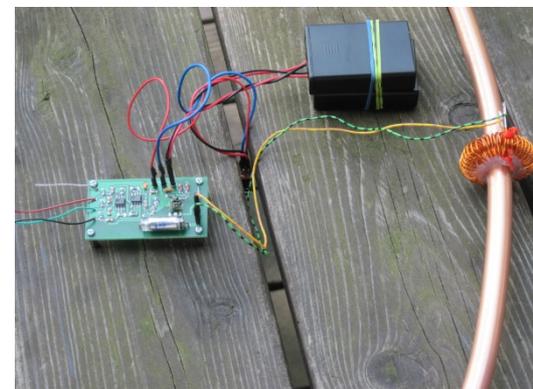
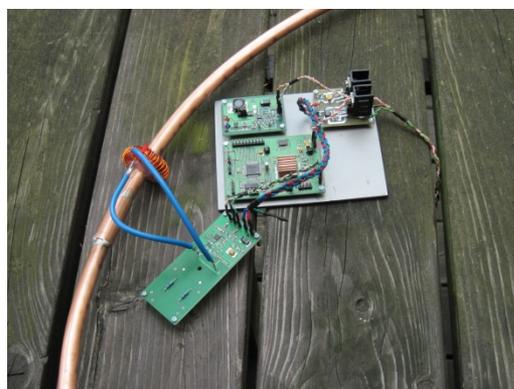
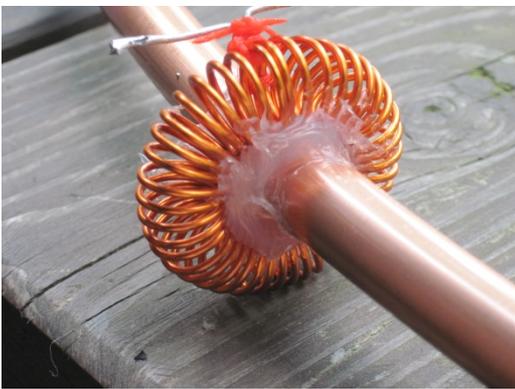
Alternative Powerline Communication



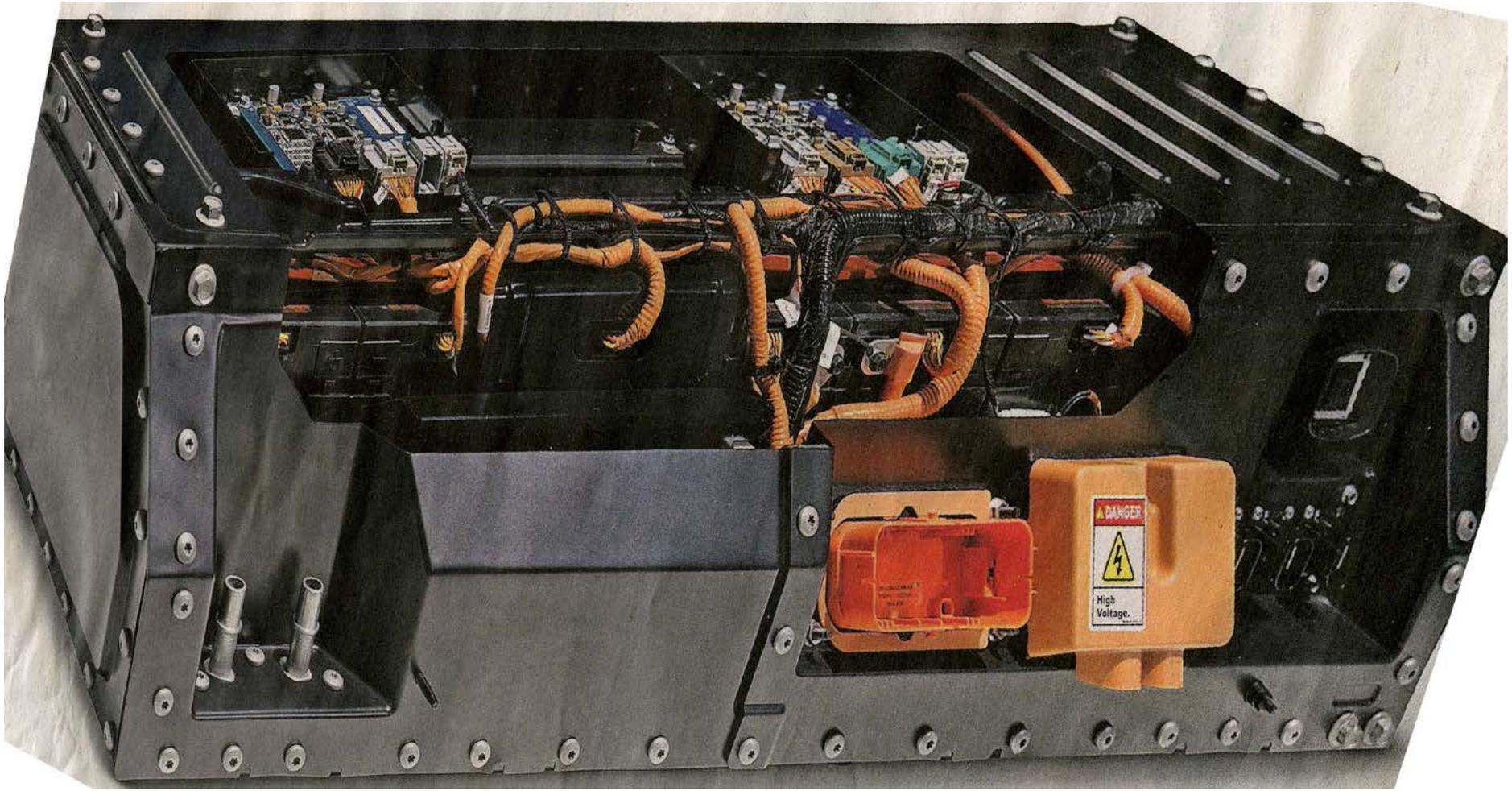
- HF Übertragung (~1...100MHz), Lastmodulation oder kapazitiv
- Kostenersparnis durch Wegfall Stecker-, Kabel- und Einbaukosten
- Ziel: Nachweis störsicherer Kommunikation (ASIL) und erzielbare Datenrate

Demoaufbau für leitungsgebundene Übertragung



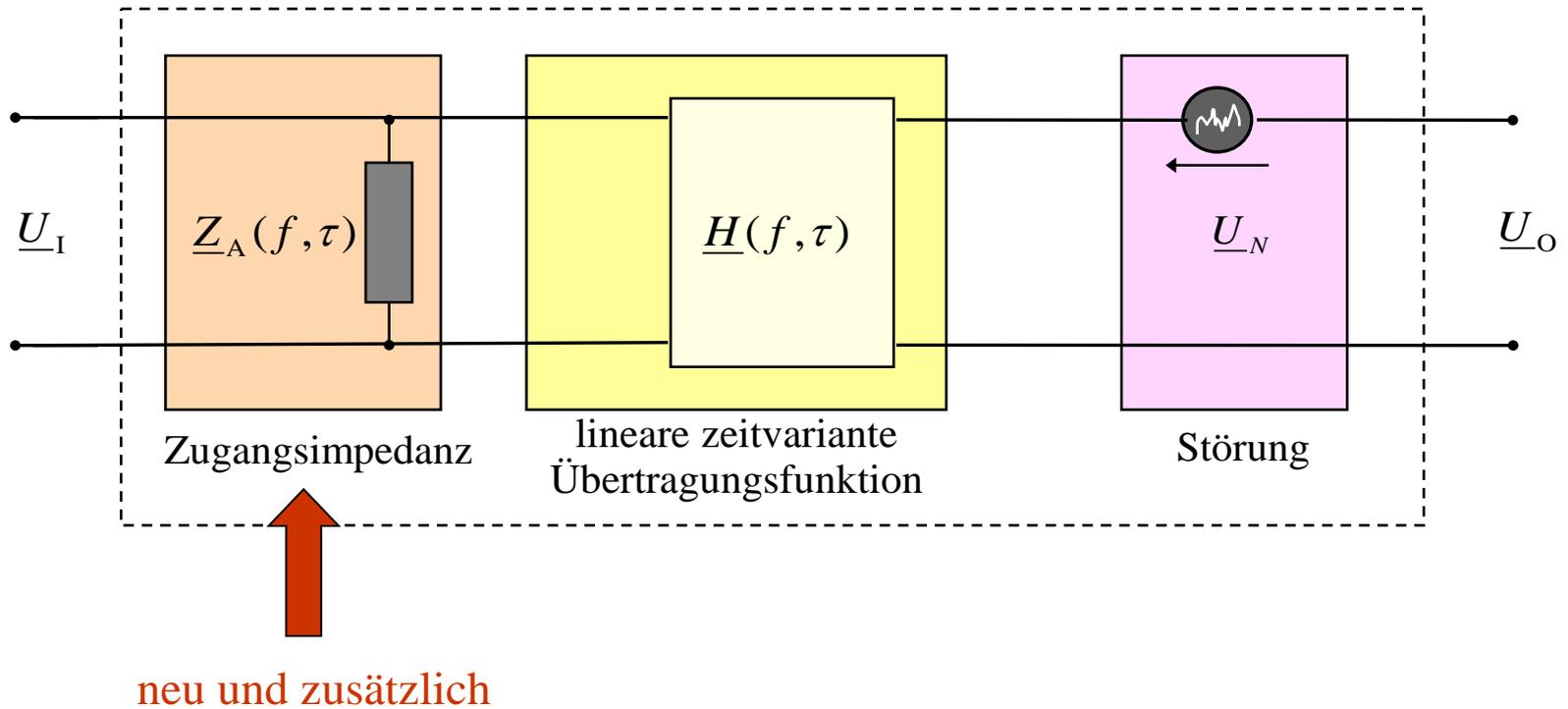


Aufbau der Traktionsbatterie für ein Serienfahrzeug

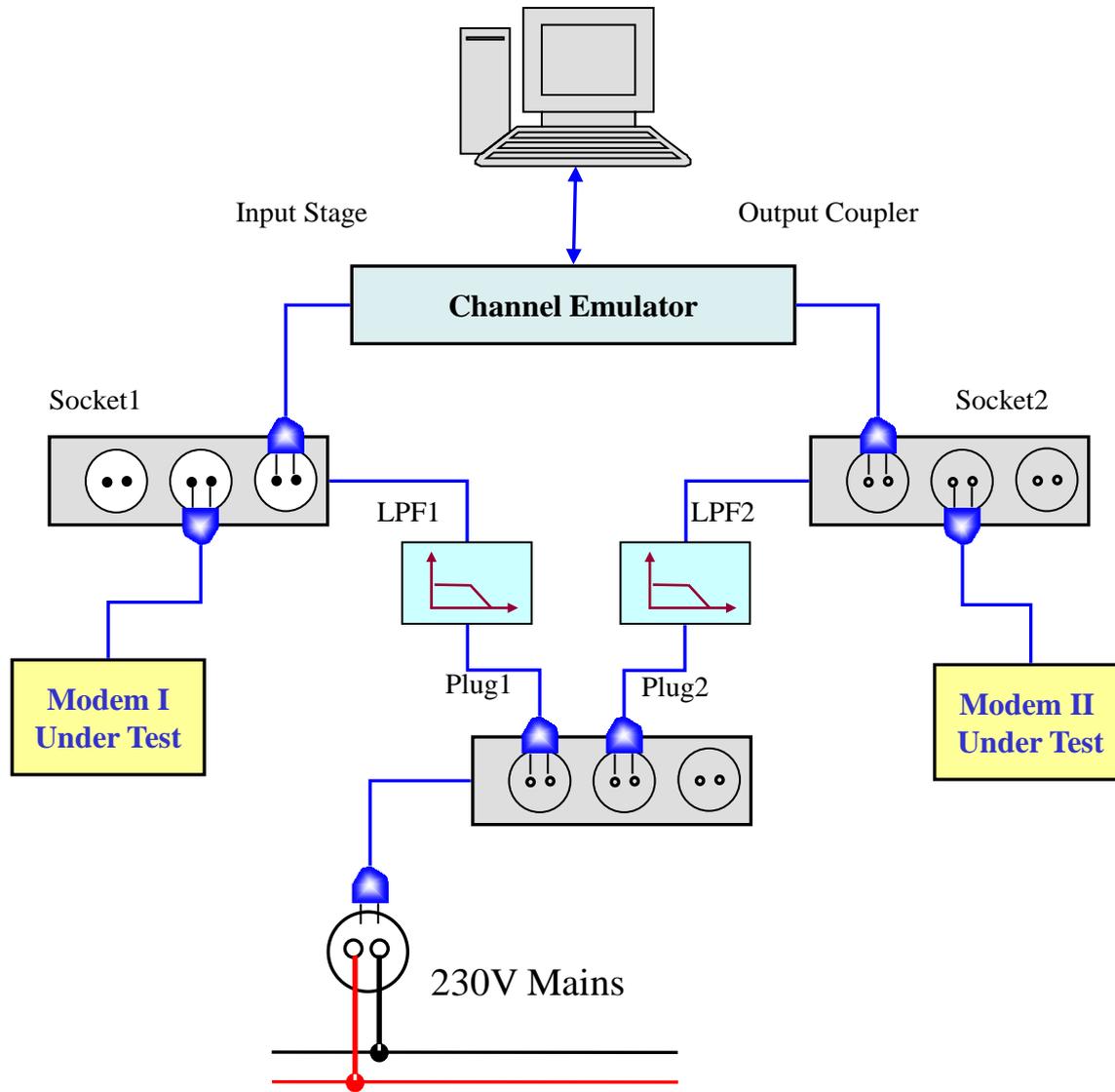


Modellansatz für den Frequenzbereich 9kHz-500kHz

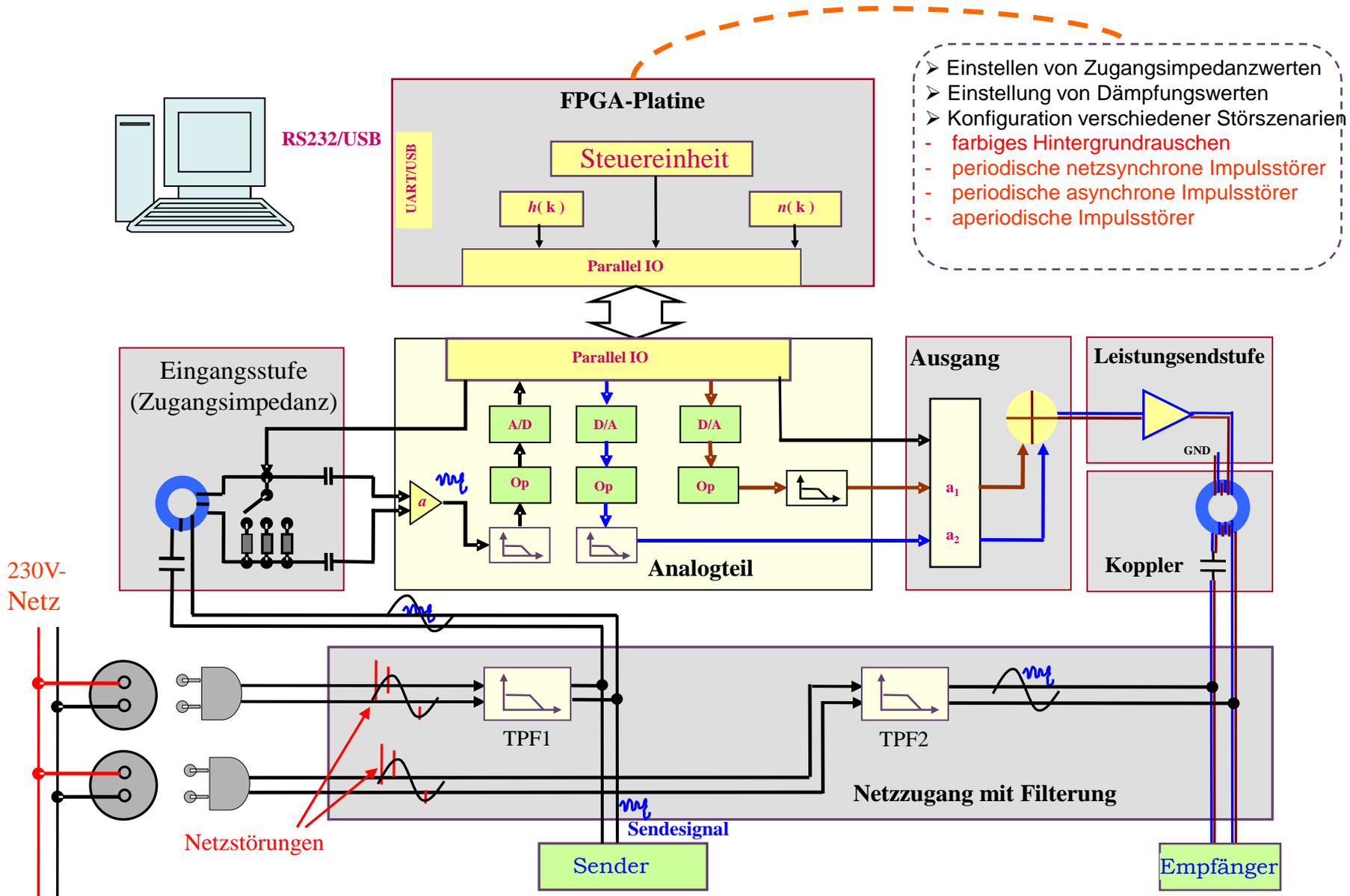
- Energieinformationsdienste, Gebäudeautomatisierung -



Kanalemulator-Konzept für den Frequenzbereich 9kHz-500kHz



Details eines Emulatoraufbaus für den Frequenzbereich 9kHz-500kHz



Frontansicht des Emulators



FPGA-Platine als Kernstück zur Signalverarbeitung innerhalb des Emulators

