

WLAN-Vorlesung

Teil-3

Inhalt

Signalspreizung

FHSS / DSSS (Rahmenaufbau)

OFDM-Übertragungsverfahren

Sende-Ablauf

Empfangs-Ablauf

Window-Funktion

OFDM-Rahmenaufbau

Trainingssequenz

Vergleich: FHSS, DSSS, OFDM

PHY-Layer

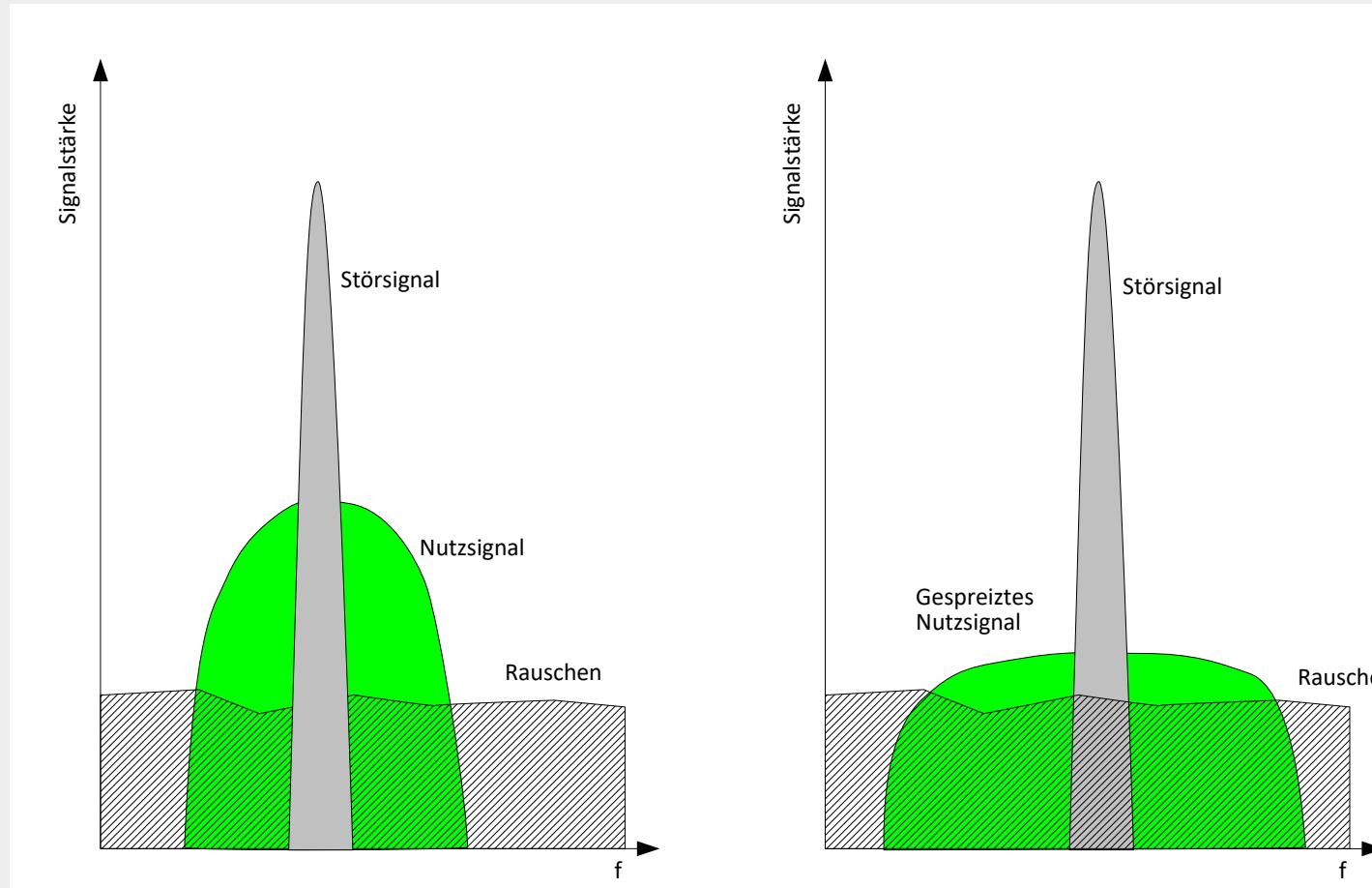
Normierung von:

- FHSS
- DSSS
- Infrarot
- OFDM
- OFDMA

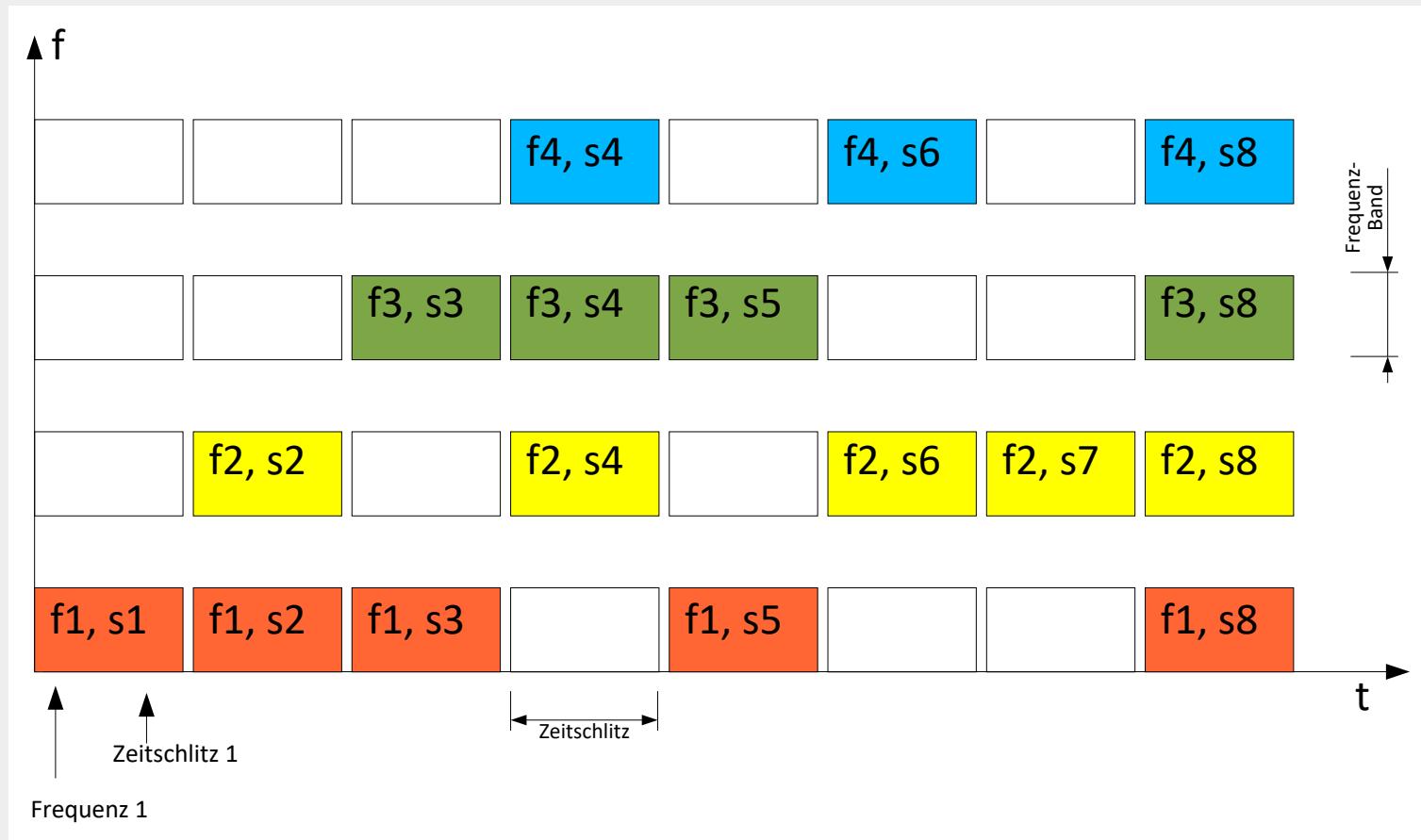
Realisiert wurden:

- FHSS
- DSSS
- OFDM
- OFDMA

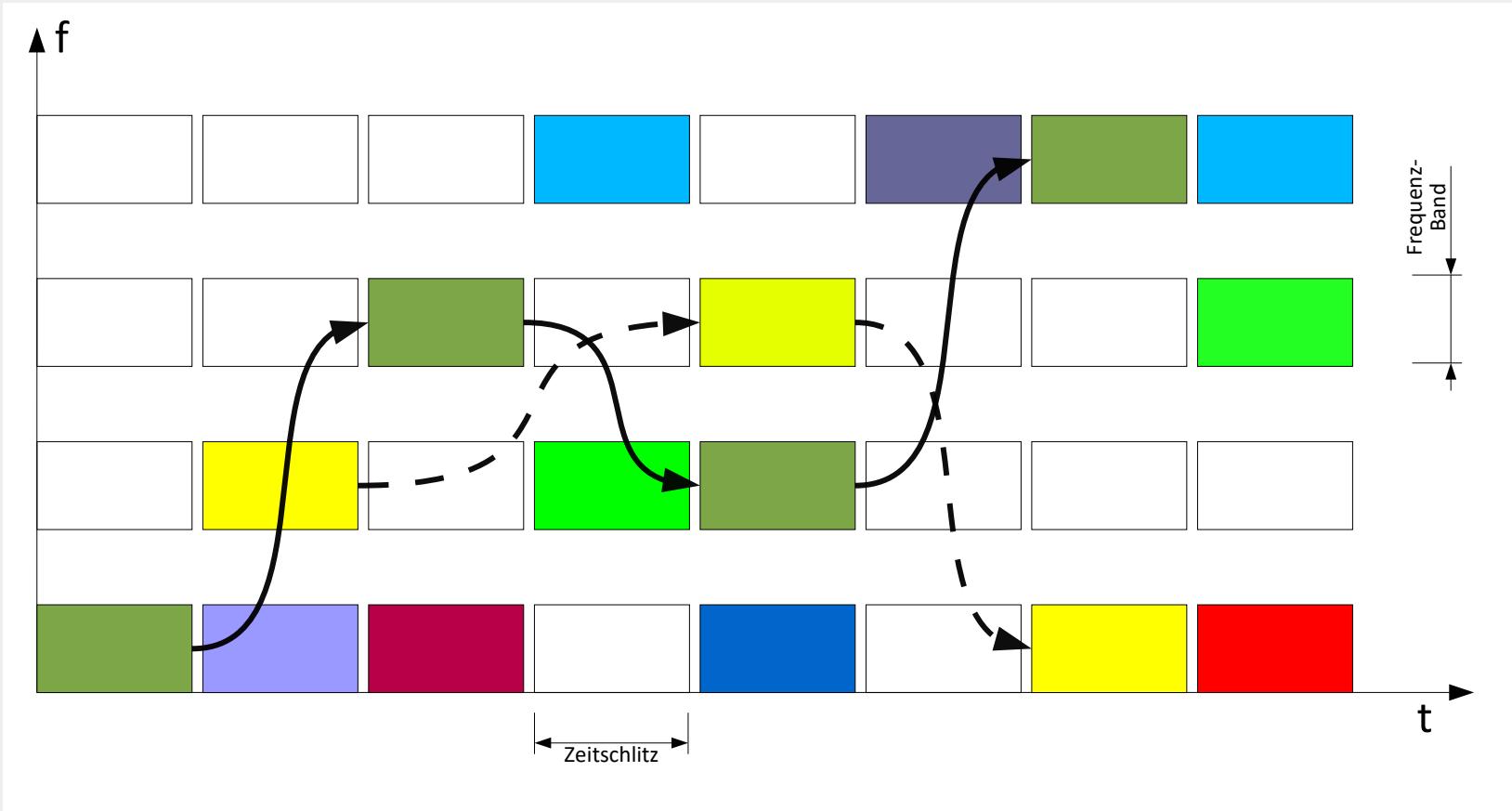
PHY-Layer: Signalspreizung



PHY-Layer: Signalspreizung TDMA in Kombination mit FDMA



PHY-Layer: Signalspreizung Frequency Hopping

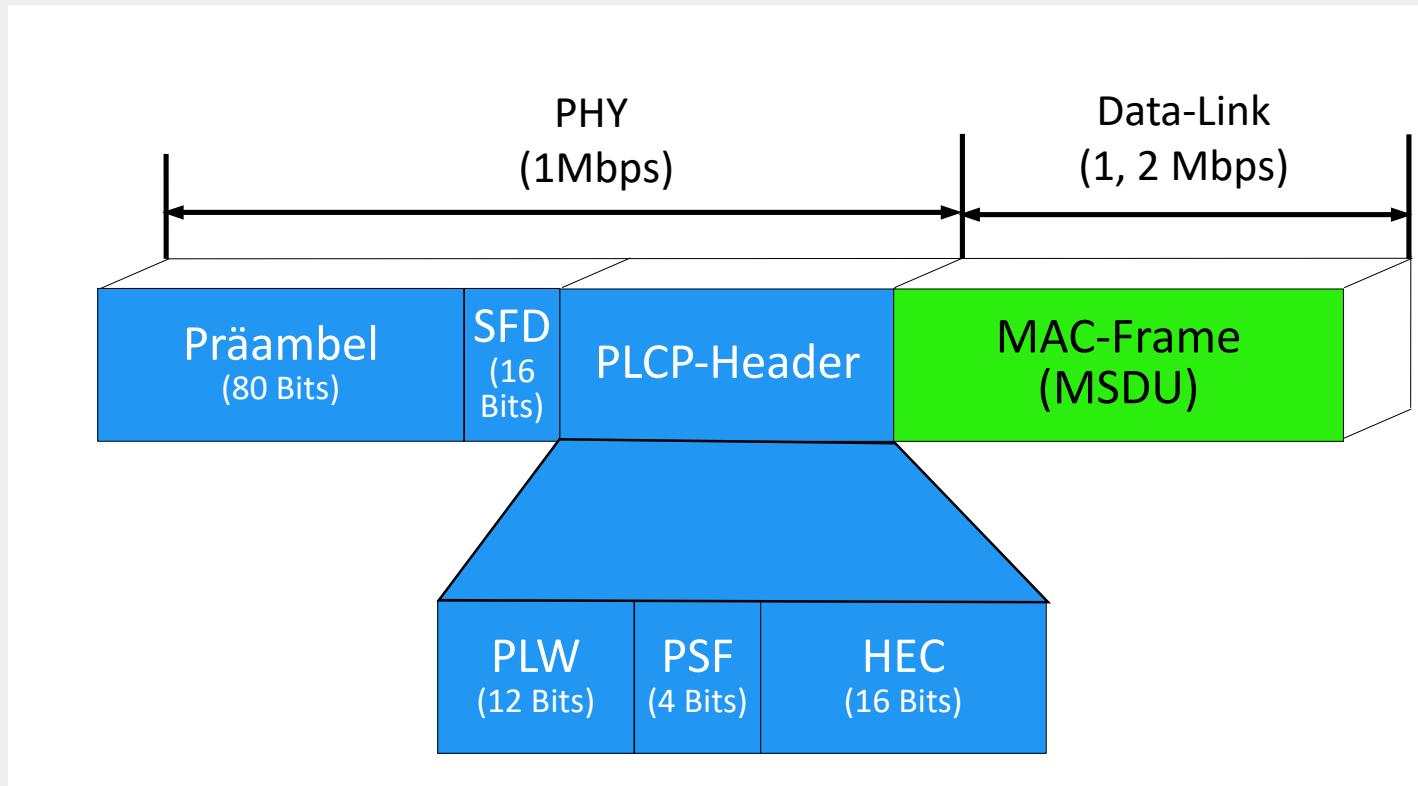


PHY-Layer: Signalspreizung Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)

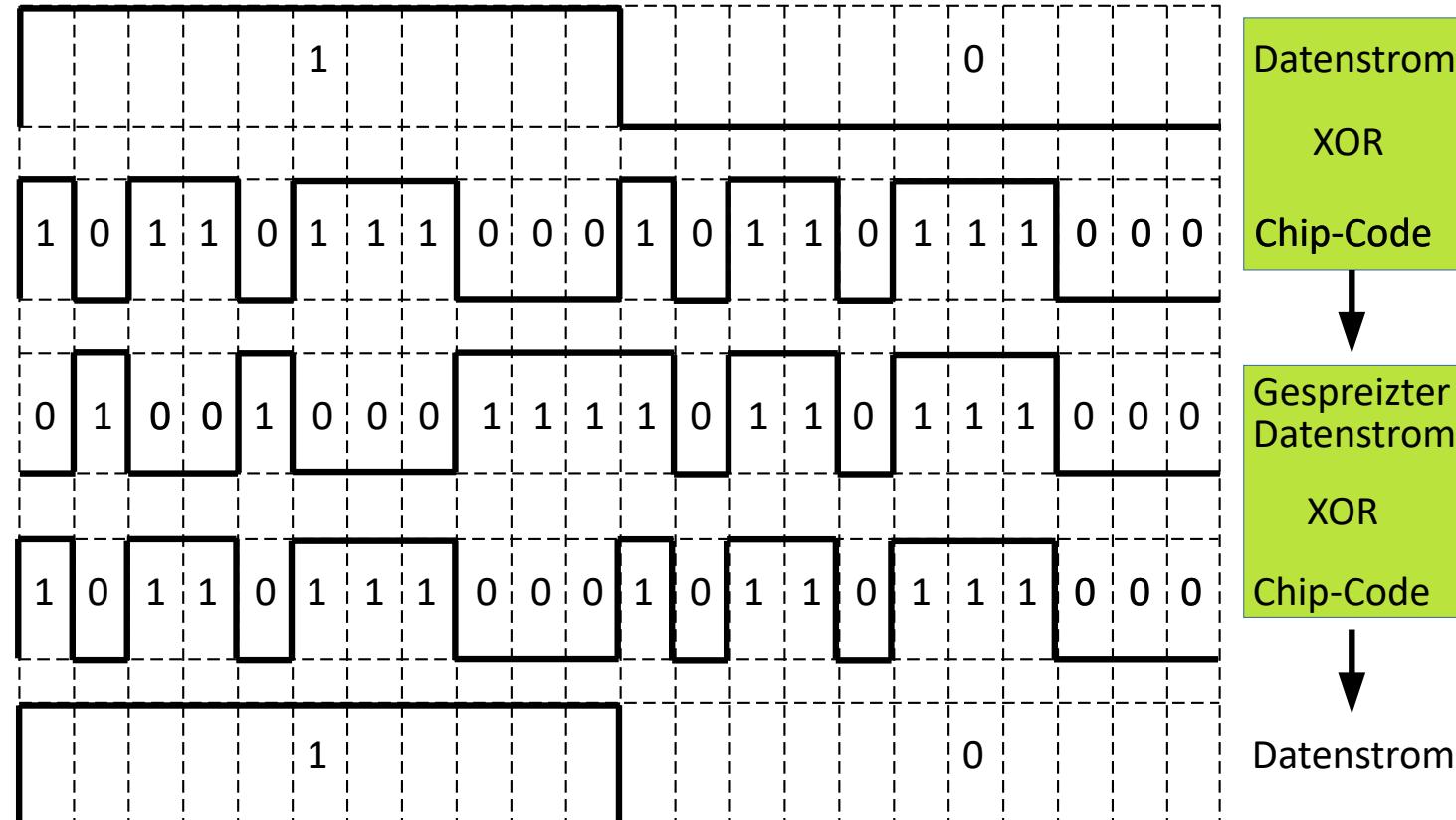
Die Bandbreite von 2,4000 GHz bis 2,4835GHz wird in 79 Frequenzunterbänder mit je 1 MHz aufgeteilt.
Aus einem Set von 3 unterschiedlichen Sequenzen wird ein Set ausgewählt
Sender und Empfänger wechseln alle 400ms den Kanal, was alle 2,4S einen Wechsel bedeutet

1. Set: $x = \{0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 75\}$
2. Set: $x = \{1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 52, 55, 58, 61, 64, 67, 70, 73, 76\}$
3. Set: $x = \{2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 56, 59, 62, 65, 68, 71, 74, 77\}$

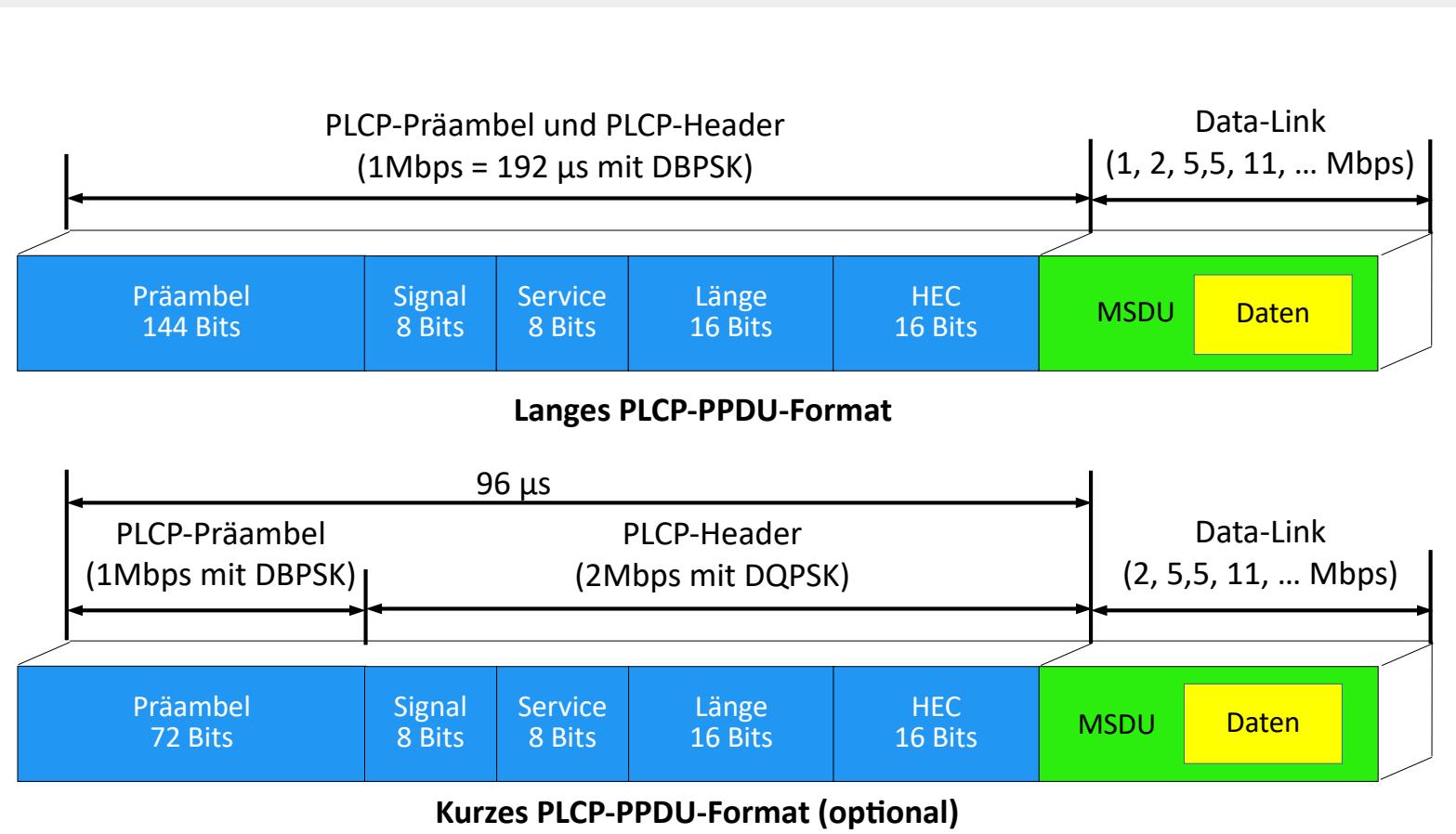
FHSS -Frameformat



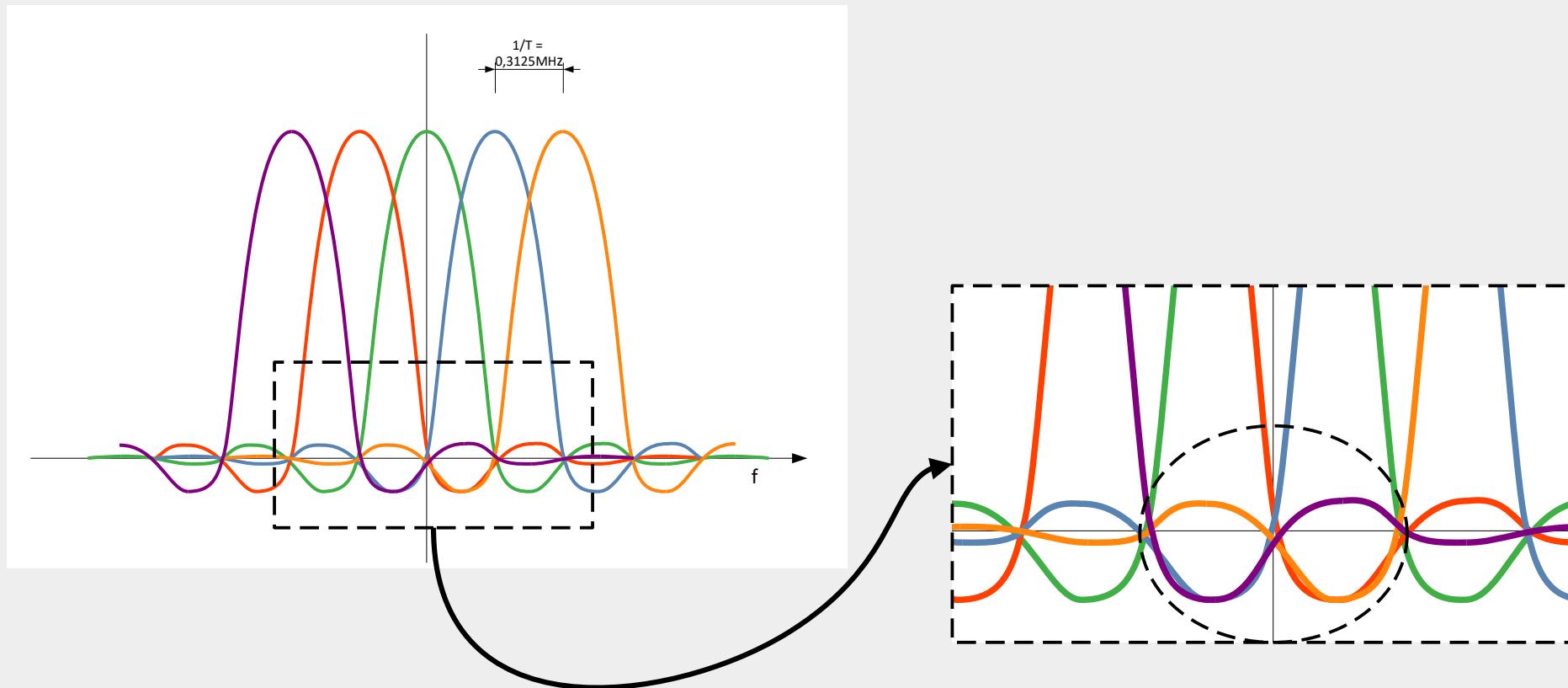
DSSS - Signalspreizung



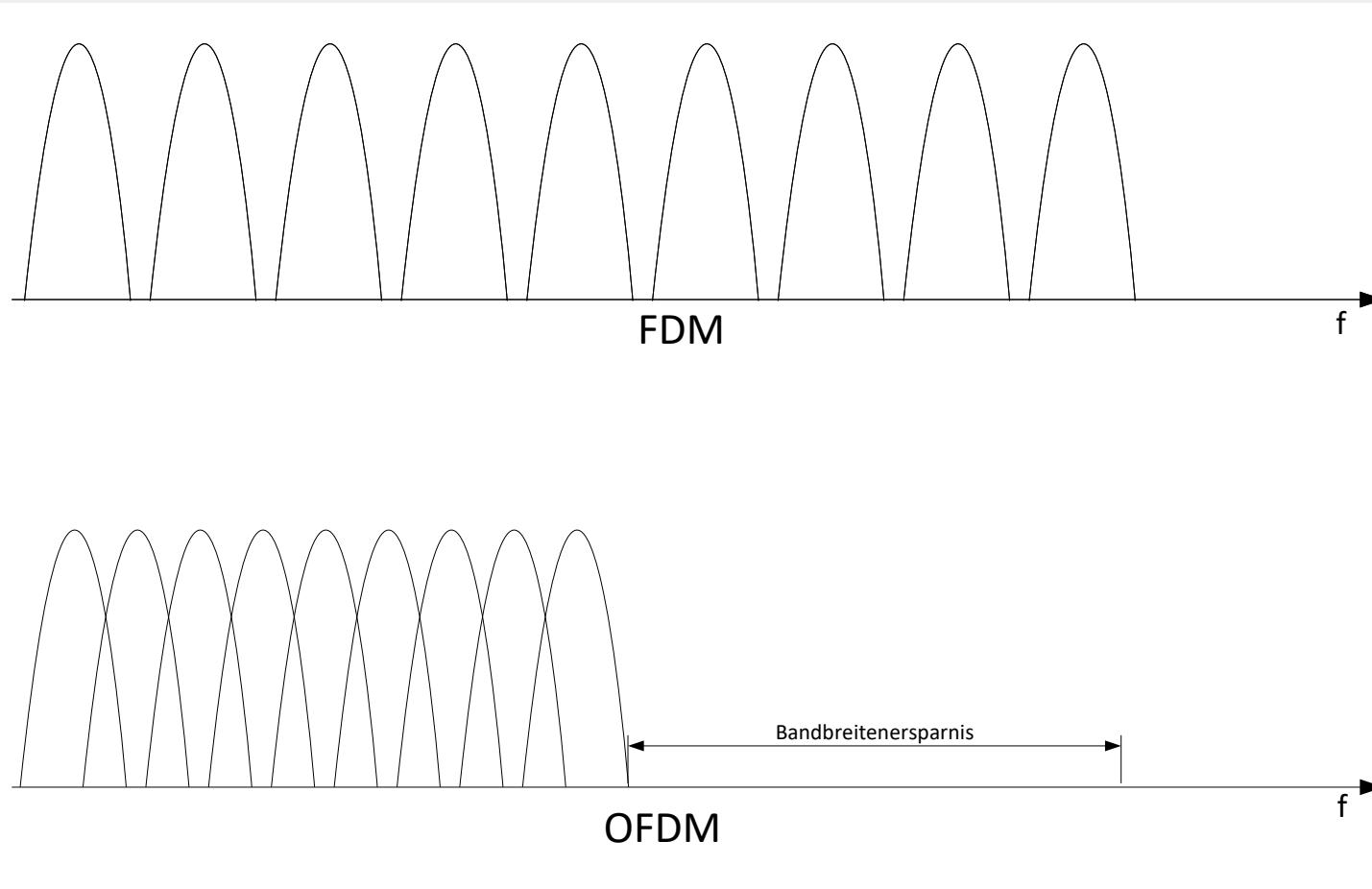
DSSS-Frameformat



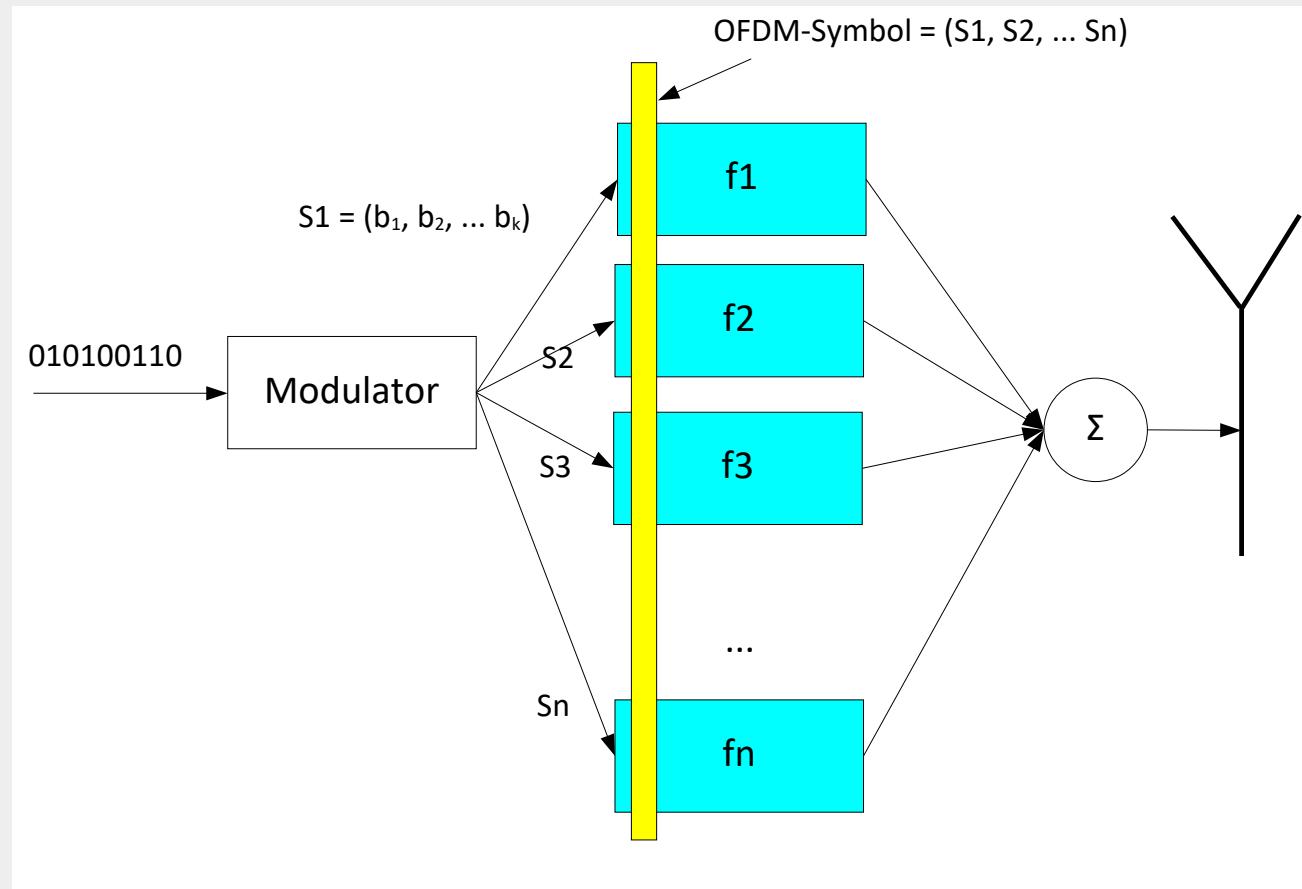
OFDM



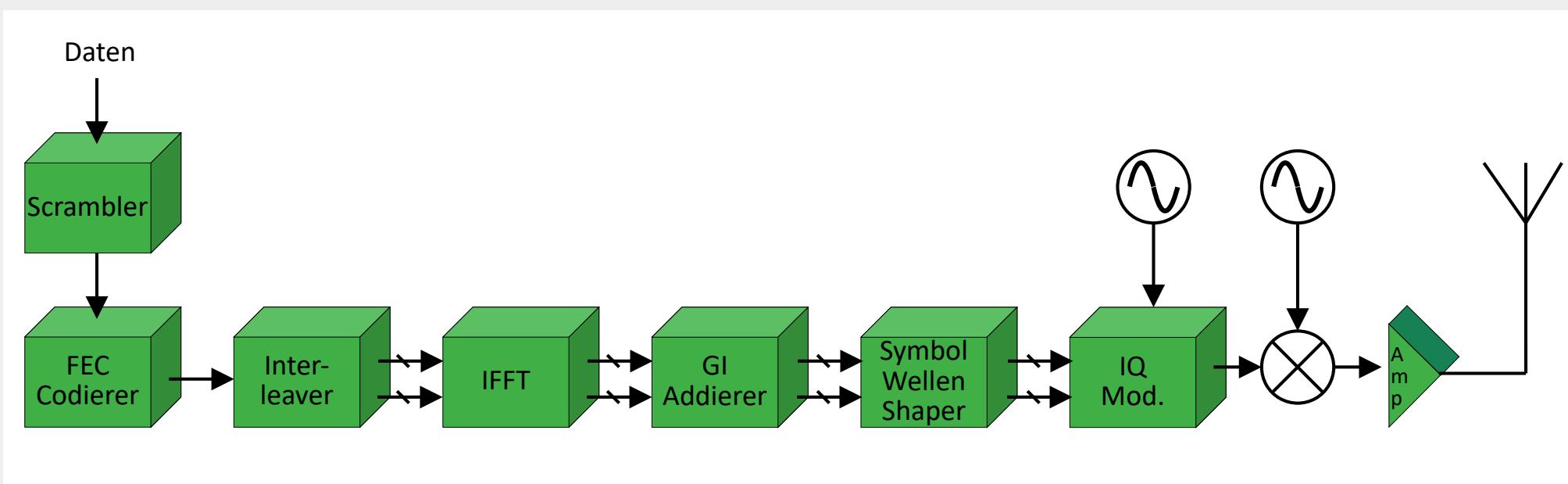
OFDM: Bandbreitenersparnis



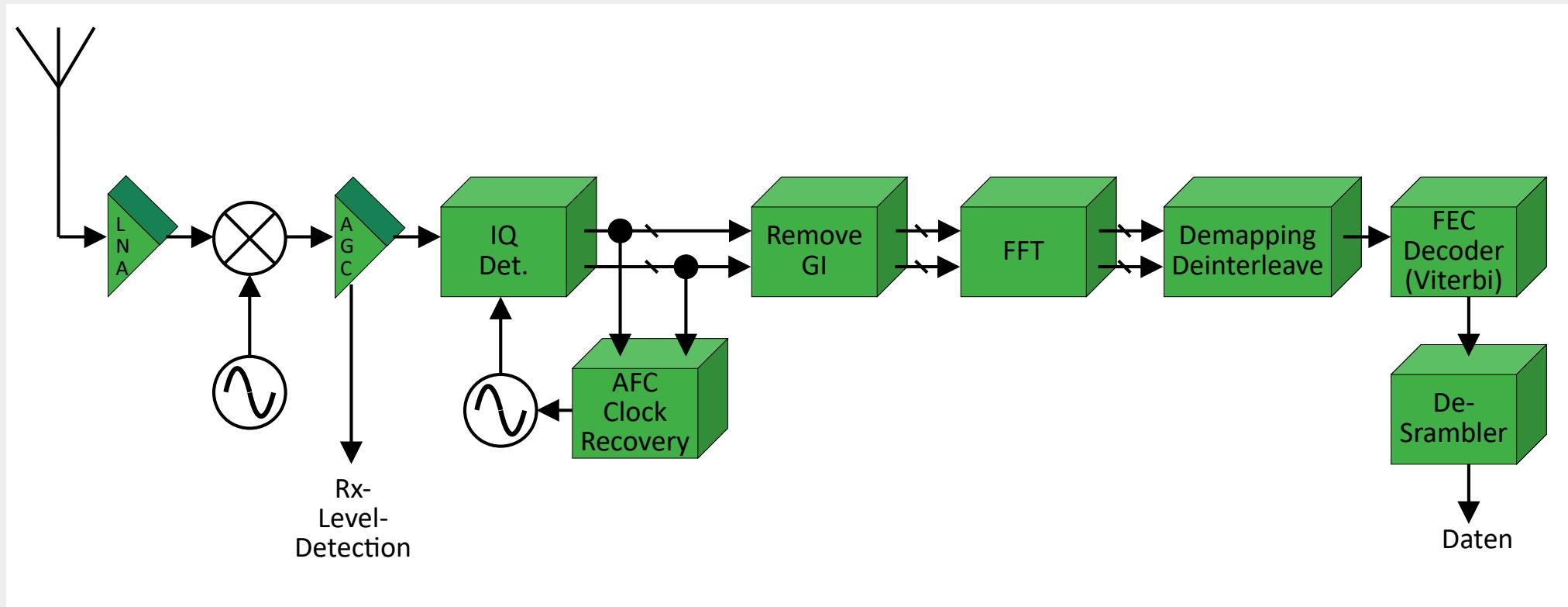
OFDM: Verteilung der Symbole auf die Unterträger



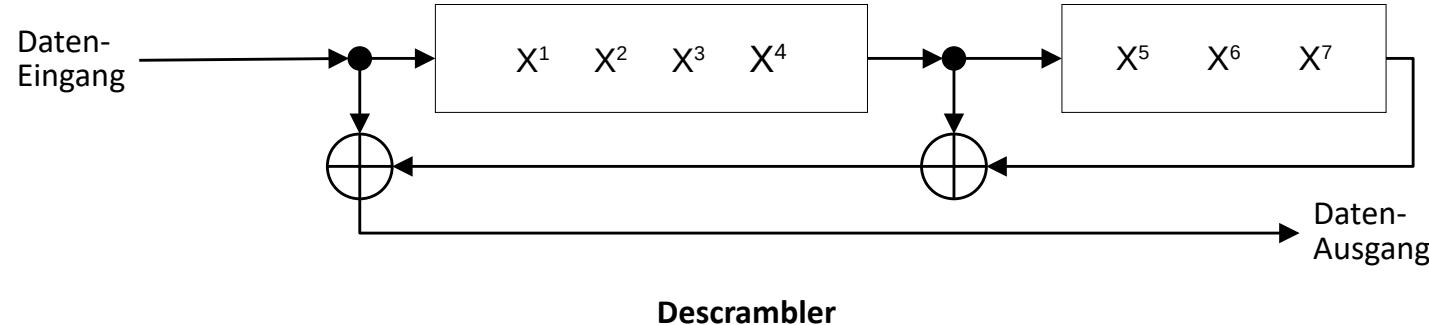
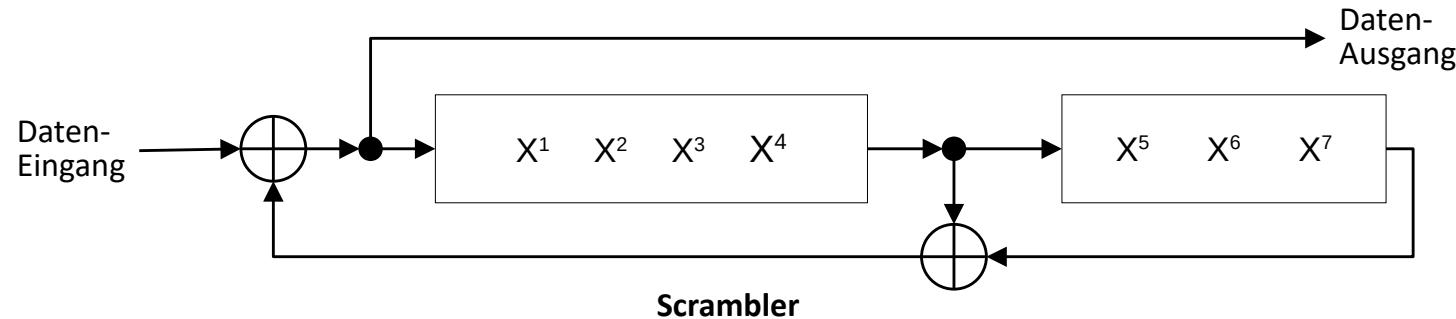
OFDM: Sendeeinheit



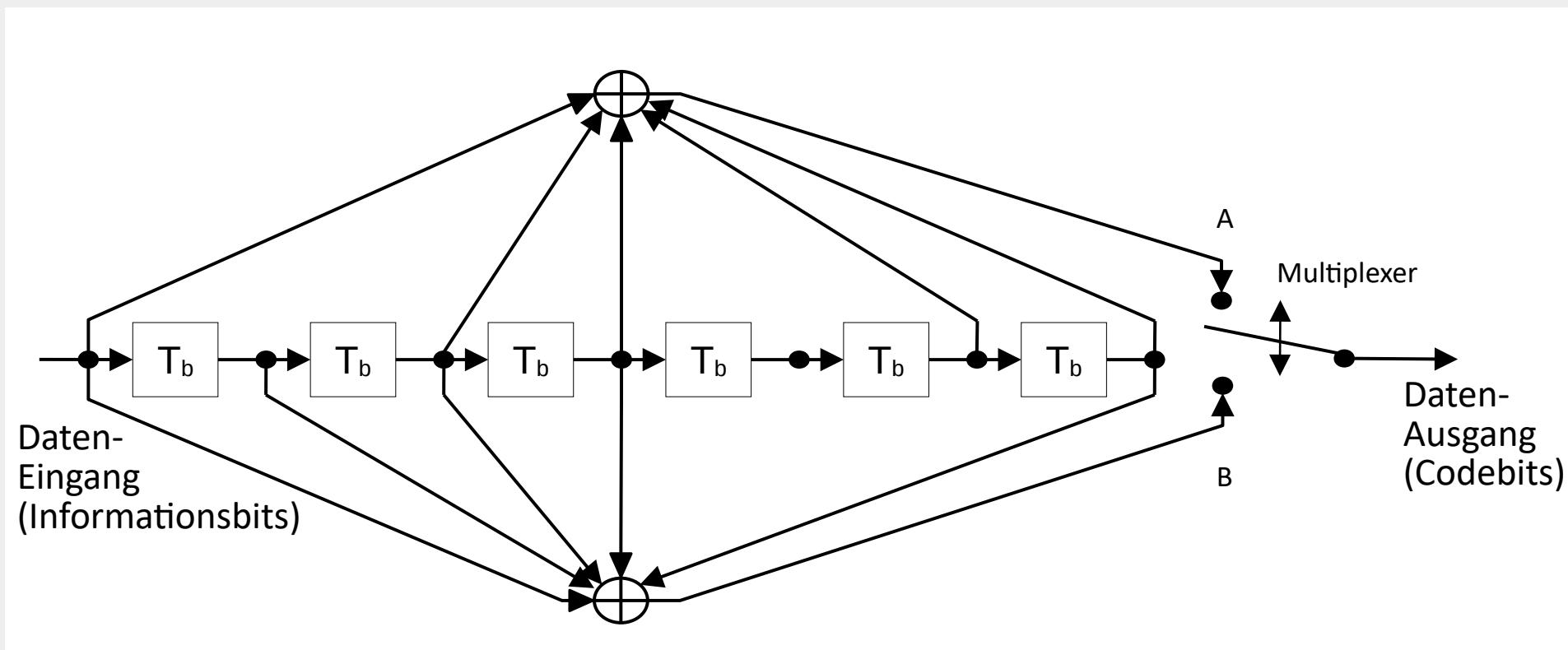
OFDM: Empfangseinheit



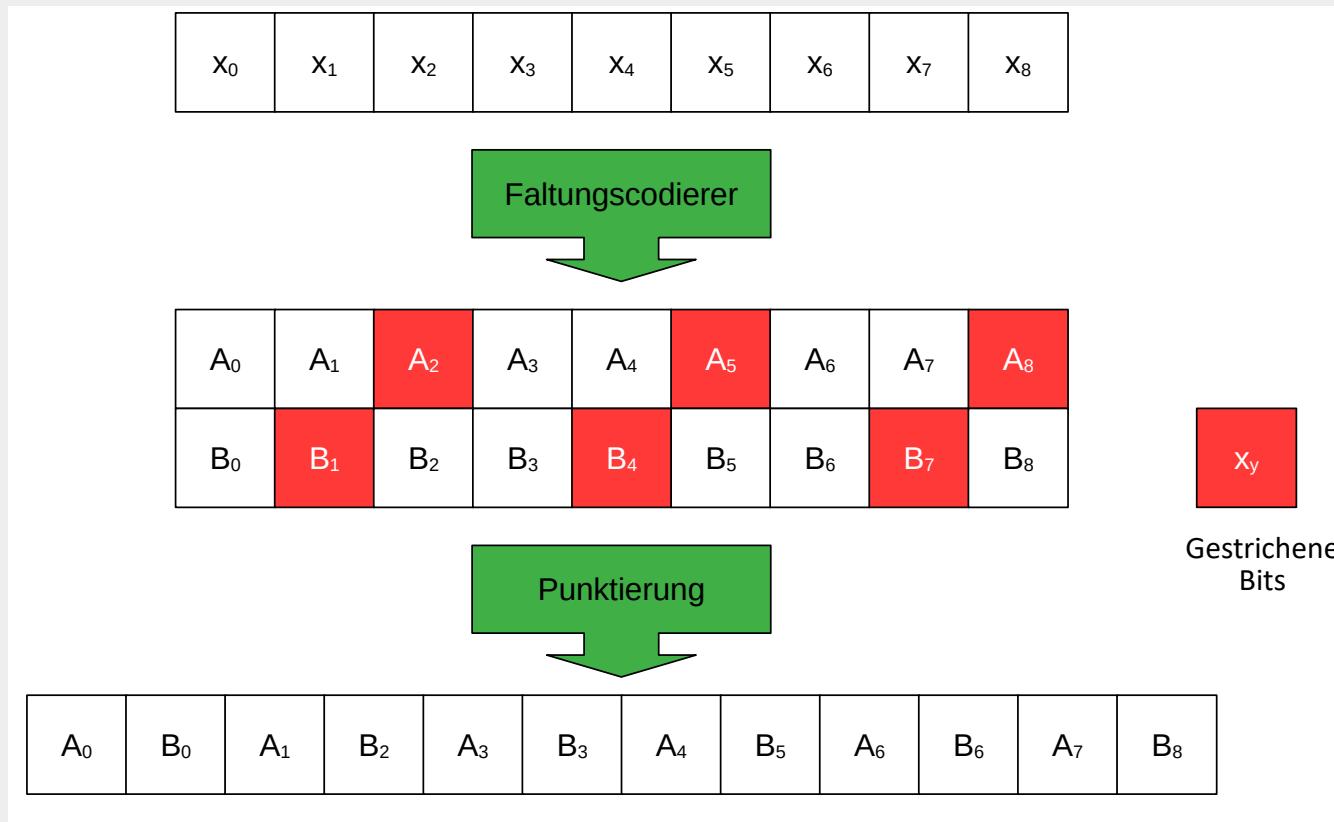
OFDM: Scrambler



OFDM: Faltungscodierer



OFDM: Punktierung



Beispiel Faltungscodierer und Punktierung

Datenbitfolge: $D_0=1, D_1=1, D_2=0, D_3=1, D_4=1, D_5=1, D_6=0, D_7=1; D_8=0$

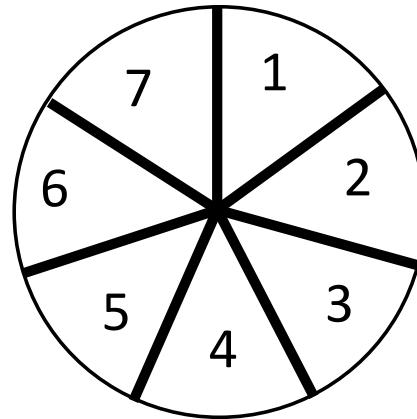
i	D_i	D_{i-1}	D_{i-2}	D_{i-3}	D_{i-4}	D_{i-5}	D_{i-6}	$A_i = \text{Modulo-2}$
0	1	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	1
2	0	1	1	0	0	0	0	1
3	1	0	1	1	0	0	0	1
4	1	1	0	1	1	0	0	0
5	1	1	1	0	1	0	0	1
6	0	1	1	1	0	1	1	0
7	1	0	1	1	1	0	1	0
8	0	1	0	1	1	0	0	0

i	D_i	D_{i-1}	D_{i-2}	D_{i-3}	D_{i-4}	D_{i-5}	D_{i-6}	$B_i = \text{Modulo-2}$
0	1	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	0	0
3	1	0	1	1	0	0	0	1
4	1	1	0	1	0	1	0	1
5	1	1	1	1	0	1	1	0
6	0	1	1	1	1	0	1	0
7	1	0	1	1	1	1	0	1
8	0	1	0	1	0	1	1	0

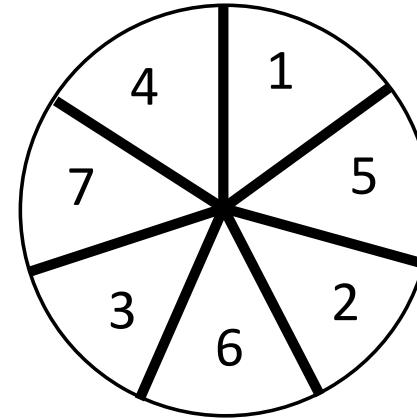
I	0	1	2	3	4	5	6	7	8
A	1	1	1	1	0	1	0	0	0
B	1	0	0	1	1	1	0	0	0

Der codierte Datenstrom am Ausgang ergibt sich damit ist 11-10-11-01-00-00.

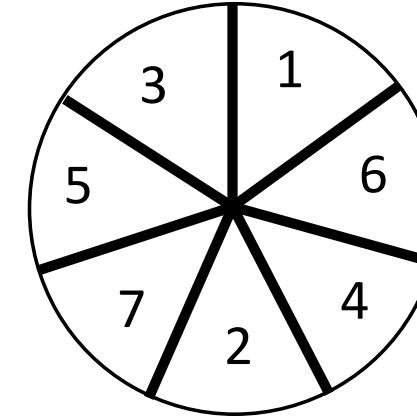
OFDM: Interleaving



Nicht interleaved
(interleaved mit Faktor 1)



Interleaved
mit Faktor 2



Interleaved
mit Faktor 3

OFDM: (Beispiel ohne Interleaving)

Daten:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Senden
ohne
Interleaving:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Störung:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Empfangene
Daten:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

OFDM: (Beispiel mit Interleaving)

Daten:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Interleaving:

Senden mit
Interleaving:

a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1	a2	b2	c2	d2	e2	f2	g2	a3	b3	c3	d3	e3	f3	g3	a4	b4	c4	d4	e4	f4	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Störung:

a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1	a2	b2	c2	d2	e2	f2	g2	a3	b3	c3	d3	e3	f3	g3	a4	b4	c4	d4	e4	f4	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

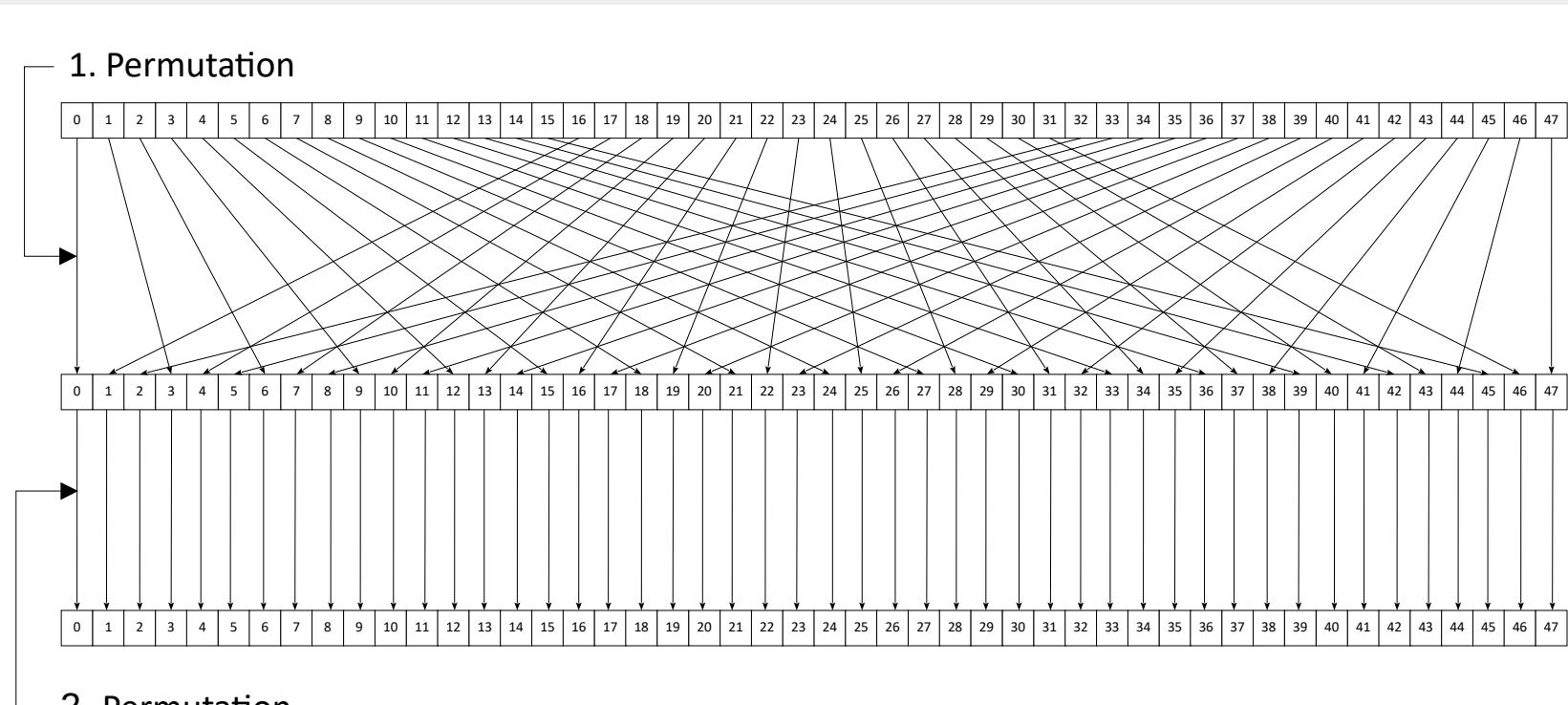
Empfangene
Daten:

a1	b1	c1	d1	e1	f1	g1	a2	b2	c2	d2					b3	c3	d3	e3	f3	g3	a4	b4	c4	d4	e4	f4	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	--	--	--	--	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

De-
Interleaving:Ausgelieferte
Daten:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

OFDM: Interleaving bei WLAN



Interleaving mit den Parametern (Datenrate = 9 Mbps)
 $N_{CBPS} = 48 \rightarrow$ ergibt die Blockbreite
 $N_{DBPS} = 36$
 $N_{BPSC} = 1 \rightarrow$ Sonderfall, dass es keine 2. Permutation gibt

OFDM: Punktierung

A ₀	B ₀	A ₁	B ₂	A ₃	B ₃	A ₄	B ₅	A ₆	B ₆	A ₇	B ₈
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Einfügen von
Dummy-Bits

A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈
B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈

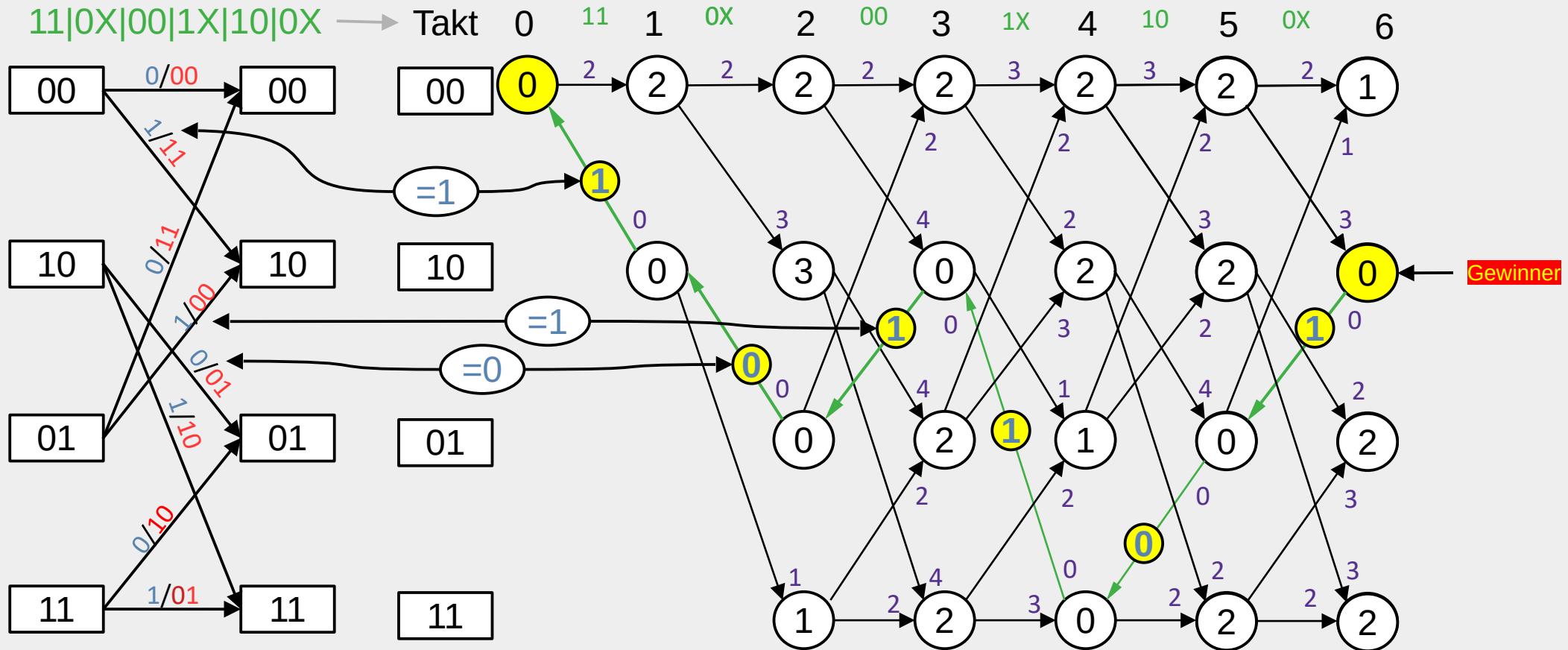
X_Y

Dummy-
Bits

Punktierung

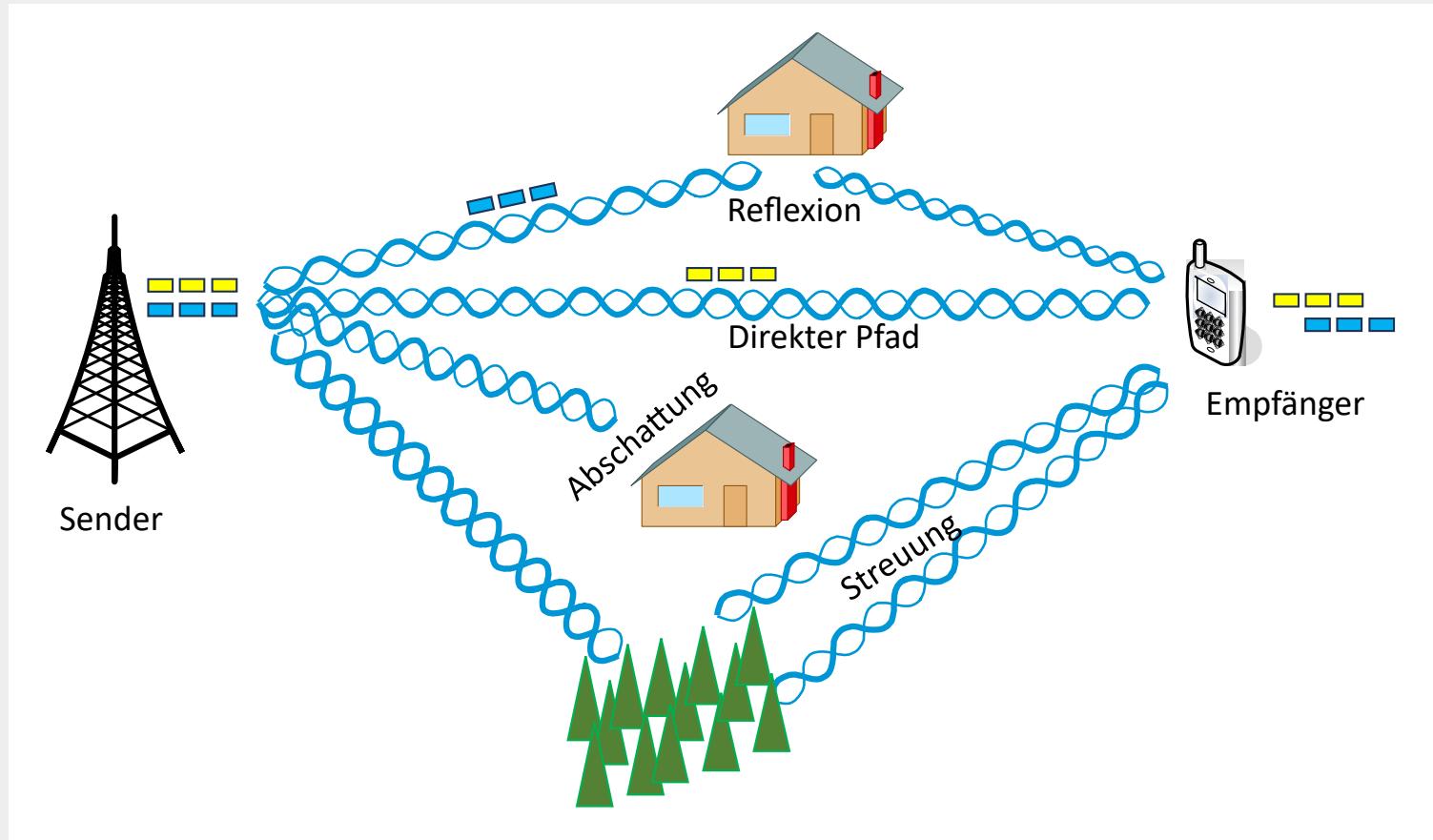
y ₀	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₇	y ₈	y ₀	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₇	y ₈
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

OFDM: Viterbi-Algorithmus



Ergebnis-Bitfolge: **1|0|1|1|0|1** = Beispiel-Bitfolge: **1|0|1|1|0|1**

Problem der Mehrwegeausbreitung



Kanalabschätzung (Teil-1)

Trainingssequenz:

($-1, +1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, +1, +1$)

Erweiterung der Trainingssequenz:

$+1, +1, -1, +1, +1, -1, +1, -1, -1, +1, +1, +1, +1, -1, +1, +1, -1, +1, -1, -1, -1$

Schritt -5:

$$\begin{array}{r} +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ -1 \\ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \\ \hline -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ = 0 \end{array}$$

Schritt -4:

$$\begin{array}{r} +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \\ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \\ \hline -1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ = 0 \end{array}$$

Kanalabschätzung (Teil-2)

Schritt -3:

$$\begin{array}{cccccccccccccccccccccc} +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{array}$$

$$+1 +1 -1 +1 -1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 = 0$$

Schritt -2:

$$\begin{array}{cccccccccccccccccccccc} +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 \end{array}$$

$$-1 +1 +1 -1 +1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1 -1 +1 -1 = 0$$

Schritt -1:

$$\begin{array}{cccccccccccccccccccccc} +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 \end{array}$$

$$-1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 -1 +1 = 0$$

Schritt 0:

$$\begin{array}{cccccccccccccccccccccc} +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 \end{array}$$

$$+1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 = 16$$

Kanalabschätzung (Teil-3)

Schritt +1:

$$\begin{array}{cccccccccccccccccccccc} +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ & \\ & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{array}$$

$$-1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad = \quad 0$$

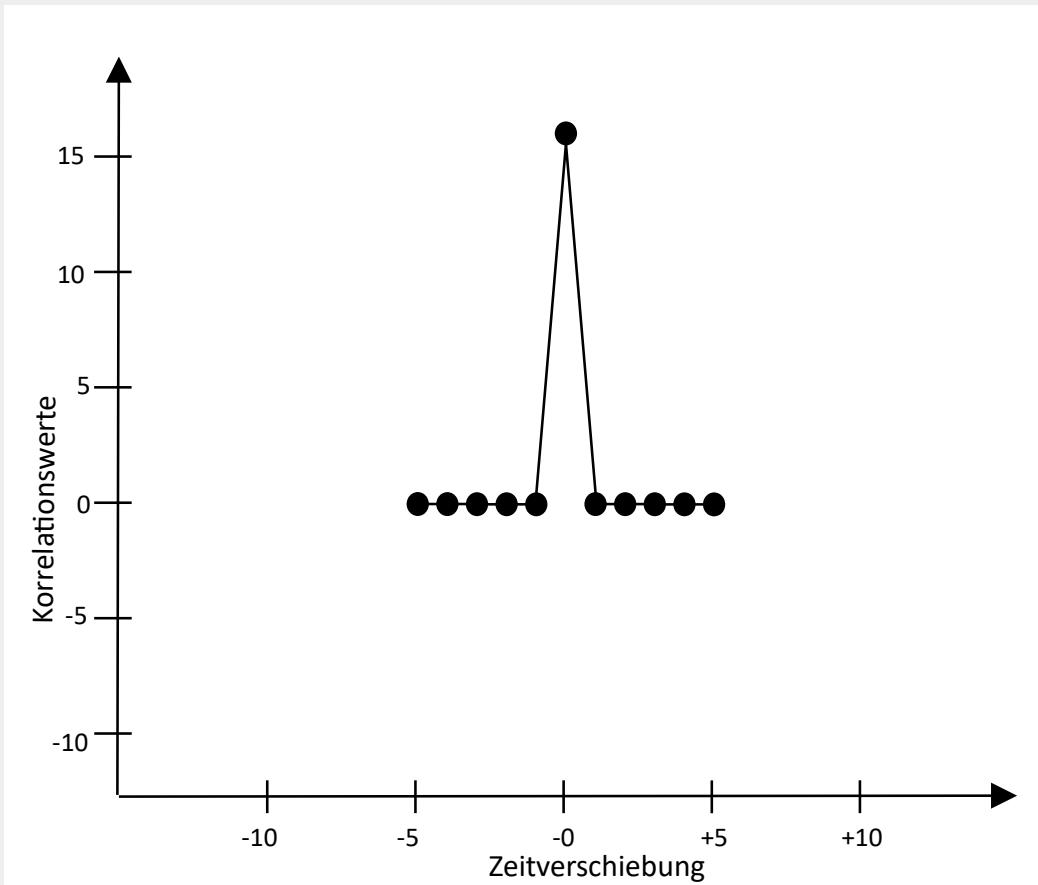
Schritt +2:

c

$$\begin{array}{cccccccccccccccccc} -1 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 \end{array}$$

$$+1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad = \quad 0$$

Kanalabschätzung (Teil-4)



Ermittlung der Dämpfung der einzelnen Pfade der Mehrwegeausbreitung (Teil-1)

Mathematisch kann man die Dämpfung eines Signals mit einer Multiplikation des Signals mit einem Faktor a mit $0 \leq a \leq 1$ darstellen.

$$y_k = s_k + a_1 * s_{k-1} + a_2 * s_{k-2} + a_3 * s_{k-3} + a_4 * s_{k-4}$$

Im folgenden Beispiel wird angenommen, dass es zwei Signale mit einer Verzögerung gibt. Die Faktoren für die Dämpfung sollen $a_1 = \frac{1}{4}$ und $a_2 = \frac{1}{8}$ sein. Beim direkten Signal s_k wird der Faktor = 1 angenommen.

$$y_k = s_k + \frac{1}{4} * s_{k-1} + \frac{1}{8} * s_{k-2}$$

$$(1) \ * \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ \dots$$

$$(\frac{1}{4}) \ * \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ \dots$$

$$(\frac{1}{8}) \ * \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ +1 \ -1 \ +1 \ -1 \ -1 \ +1 \ +1 \ +1 \ +1 \ -1 \ \dots$$

$y_0 \ y_1 \ y_3 \dots$

Ermittlung der Dämpfung der einzelnen Pfade der Mehrwegeausbreitung (Teil-2)

Beginnend mit y_0 empfängt man also:

$-5/8, 7/8, 9/8, -5/8, 7/8, -7/8, -9/8, -11/8, 5/8, 9/8, 11/8, 11/8, -5/8, 7/8, 9/8, 11/8, -5/8, 7/8, 9/8, -5/8, 7/8, -7/8, -9/8, -11/8$

Lässt man der Übersicht halber die Nenner weg entsteht:

$-5, +7, +9, -5, +7, -7, -9, -11, +5, +9, +11, +11, -5, +7, +9, +11, -5, +7, +9, -5, +7, -7, -9, -11$

Schiebt man die bekannte Trainingssequenz daran vorbei und beginnt die Korrelation bei y_0 erhält man:

$$(-1)(-5) + (1)(7) + (-1)(9) + (-1)(-5) + (-1)(7) + (1)(-7) + (1)(-9) + (1)(-11) + (1)(5) + (-1)(9) + (1)(11) + (1)(11) + (1)(-5) + (-1)(7) + (1)(9) + (1)(11)$$

$$= 5 + 7 - 9 + 5 - 7 - 7 - 9 - 11 + 5 - 9 + 11 + 11 - 5 - 7 + 9 + 11 = 0$$

Ermittlung der Dämpfung der einzelnen Pfade der Mehrwegeausbreitung (Teil-3)

Auch wenn man bei y_1 und y_2 beginnt wird das Ergebnis = 0 sein. Beim Start bei y_3 ergibt sich erstmals ein anderes Bild:

$$\begin{array}{r} -5 \quad +7 \quad -7 \quad -9 \quad -11 \quad +5 \quad +9 \quad +11 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \\ -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline +5 \quad +7 \quad +7 \quad +9 \quad +11 \quad +5 \quad +9 \quad +11 \quad +11 \quad +5 \quad +7 \quad +9 \quad +11 \quad +5 \quad +7 \quad +9 = 128 \end{array}$$

Der Wert von 128 geteilt durch 8 ergibt 16. Da dies der Wert ohne Dämpfung sein soll entspricht der ermittelte Wert 16/16. Somit ergibt sich auch der Wert von 16 für die weiteren Nenner bei den Dämpfungsberechnungen.

Beim Start bei y_4 ergibt sich:

$$\begin{array}{r} +7 \quad -7 \quad -9 \quad -11 \quad +5 \quad +9 \quad +11 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \quad -5 \\ -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline -7 \quad -7 \quad +9 \quad +11 \quad -5 \quad +9 \quad +11 \quad +11 \quad -5 \quad -7 \quad +9 \quad +11 \quad -5 \quad -7 \quad +9 \quad -5 = 32 \end{array}$$

Der Wert von 32 geteilt durch 8 ergibt 4, was 4/16 entspricht und bedeutet, dass dieser Pfad mit dem Faktor $\frac{1}{4}$ gedämpft ist.

Beim Start bei y_5 ergibt sich.

$$\begin{array}{r} -7 \quad -9 \quad -11 \quad +5 \quad +9 \quad +11 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \quad -5 \quad +7 \\ -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline +7 \quad -9 \quad +11 \quad -5 \quad -9 \quad +11 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad -9 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad -9 \quad -5 \quad +7 = 16 \end{array}$$

Das Ergebnis von 16 geteilt durch 8 ergibt 2 was 2/16 bedeutet, und dass dieser Pfad mit dem Faktor $\frac{1}{8}$ gedämpft ist.

Ermittlung der Dämpfung der einzelnen Pfade der Mehrwegeausbreitung (Teil-4)

Beim Start bei y_6 ergibt sich.

$$\begin{array}{cccccccccccccccccccc}
 -9 & -11 & +5 & +9 & +11 & +11 & -5 & +7 & +9 & +11 & -5 & +7 & +9 & -5 & +7 & -7 \\
 -1 & +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 \\
 \hline
 +9 & -11 & -5 & -9 & -11 & +11 & -5 & +7 & +9 & -11 & -5 & +7 & +9 & +5 & +7 & -7 = 0
 \end{array}$$

Ab hier ergibt sich also keine Dämpfung mehr.

Kurze Trainingssequenz bei IEEE802.11:

Die kurze Trainingssequenz besteht aus 12 Unterträgern welche mit den Elementen der folgenden Sequenz moduliert werden:

$$S_{-26, 26} = \sqrt{13/6} * \{0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0\}$$

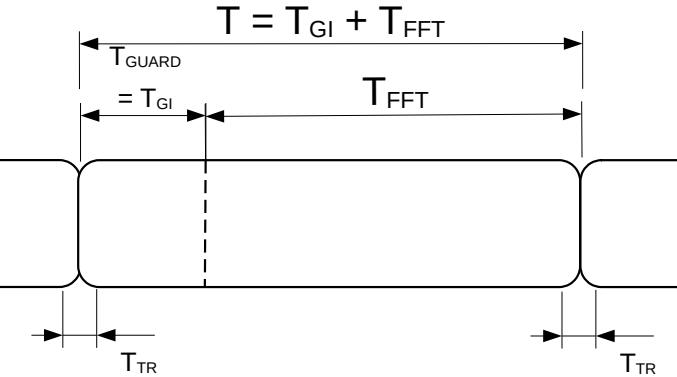
Die Multiplikation mit dem Faktor $\sqrt{13/6}$ dient zur Normalisierung der Leitung des OFDM-Symbols welches 12 von 52 Unterträgern nutzt.

Lange Trainingssequenz bei IEEE802.11:

Die lange Trainingssequenz besteht aus 53 Unterträgern (mit 0) welche mit den Elementen der folgenden Sequenz moduliert werden:

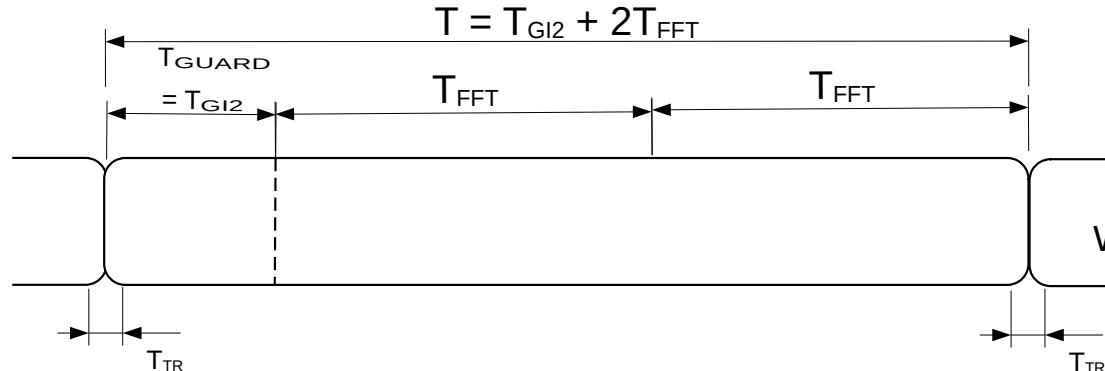
$$L_{-26, 26} = \{1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1\}$$

OFDM: Window-Funktion



Einfache
Window Funktion

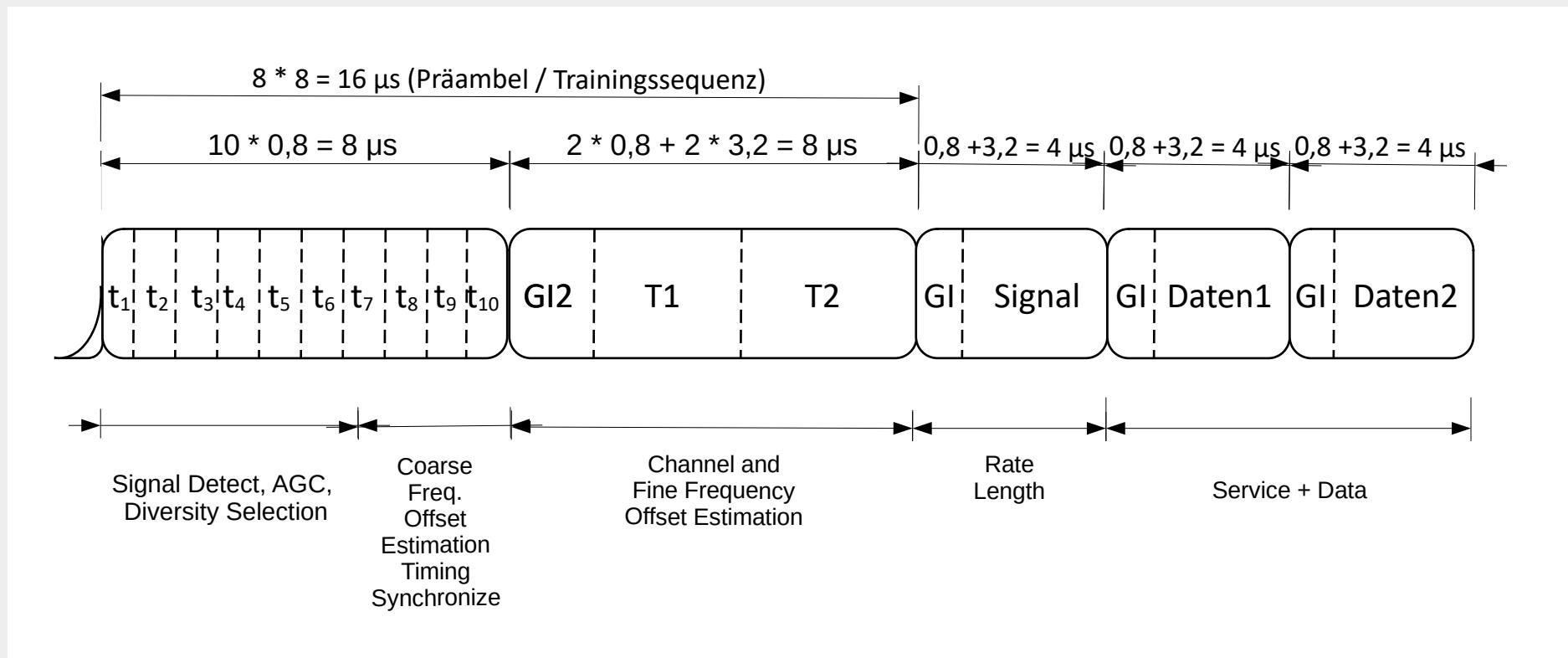
$$r_{\text{SHORT}}(t) = w_{I\text{SHORT}}(t) \sum_{k=-N_{\pi}/2}^{N_{\pi}/2} S_k \exp(j 2\pi k \Delta_F t)$$



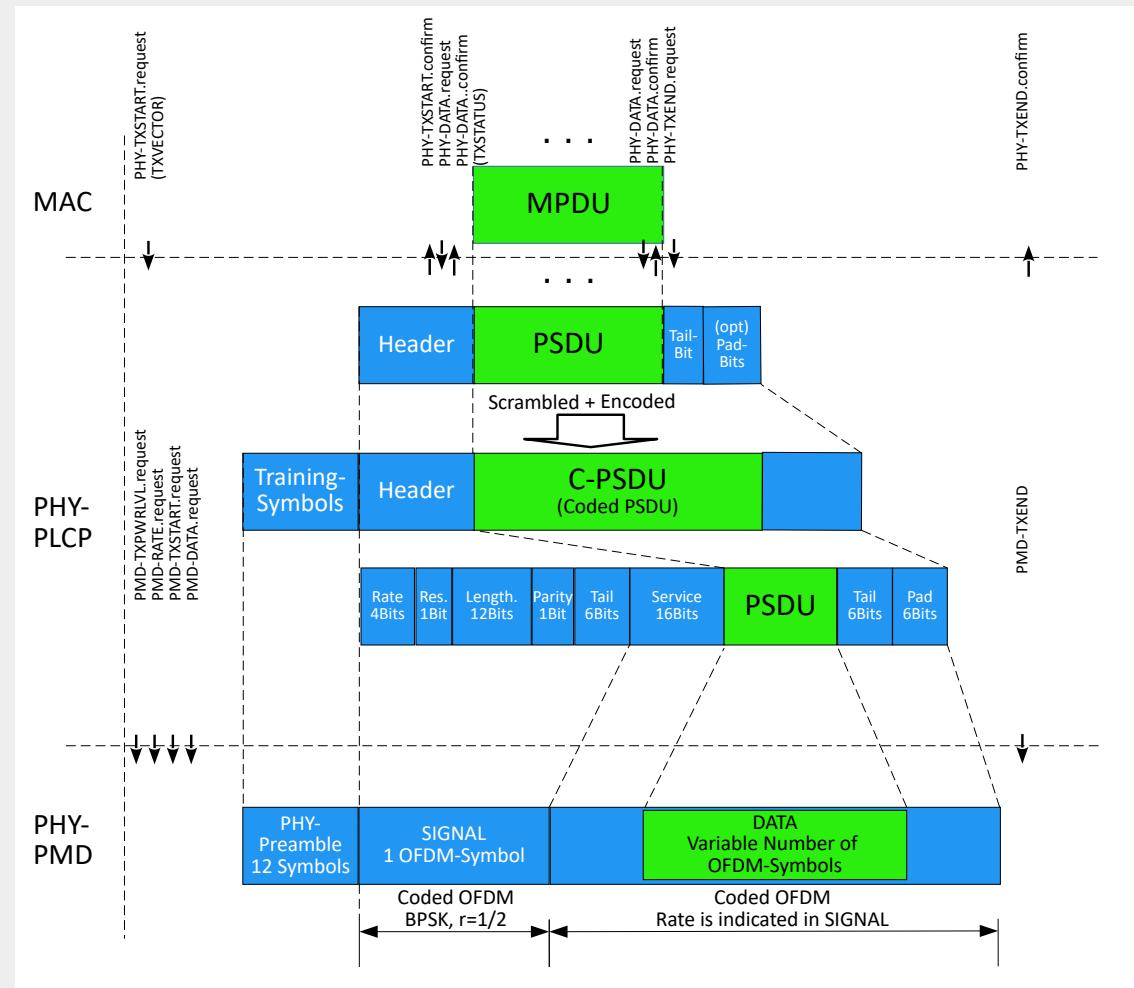
Doppelte
Window Funktion

$$r_{\text{LONG}}(t) = w_{I\text{LONG}}(t) \sum_{k=-N_{\pi}/2}^{N_{\pi}/2} L_k \exp(j 2\pi k \Delta_F (t - t_{\text{GI2}}))$$

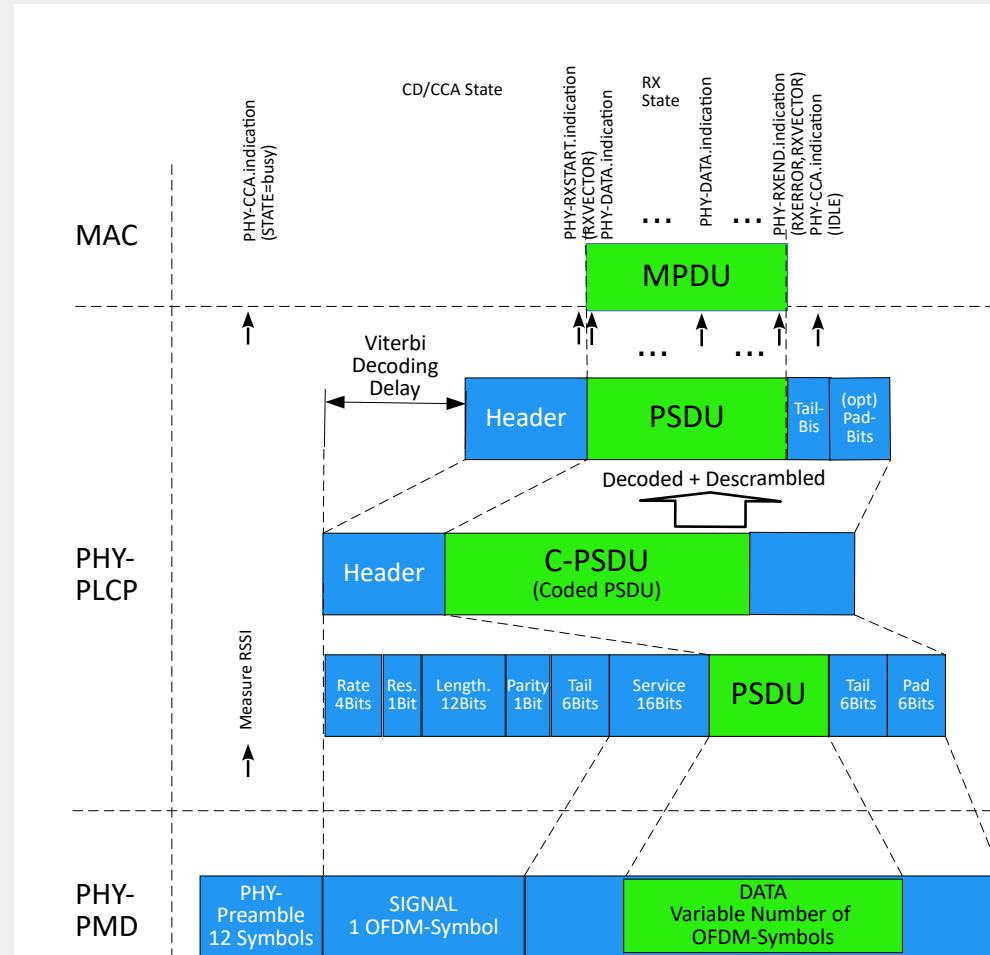
OFDM: Rahmenaufbau



OFDM: Sendeablauf



OFDM: Empfangsablauf

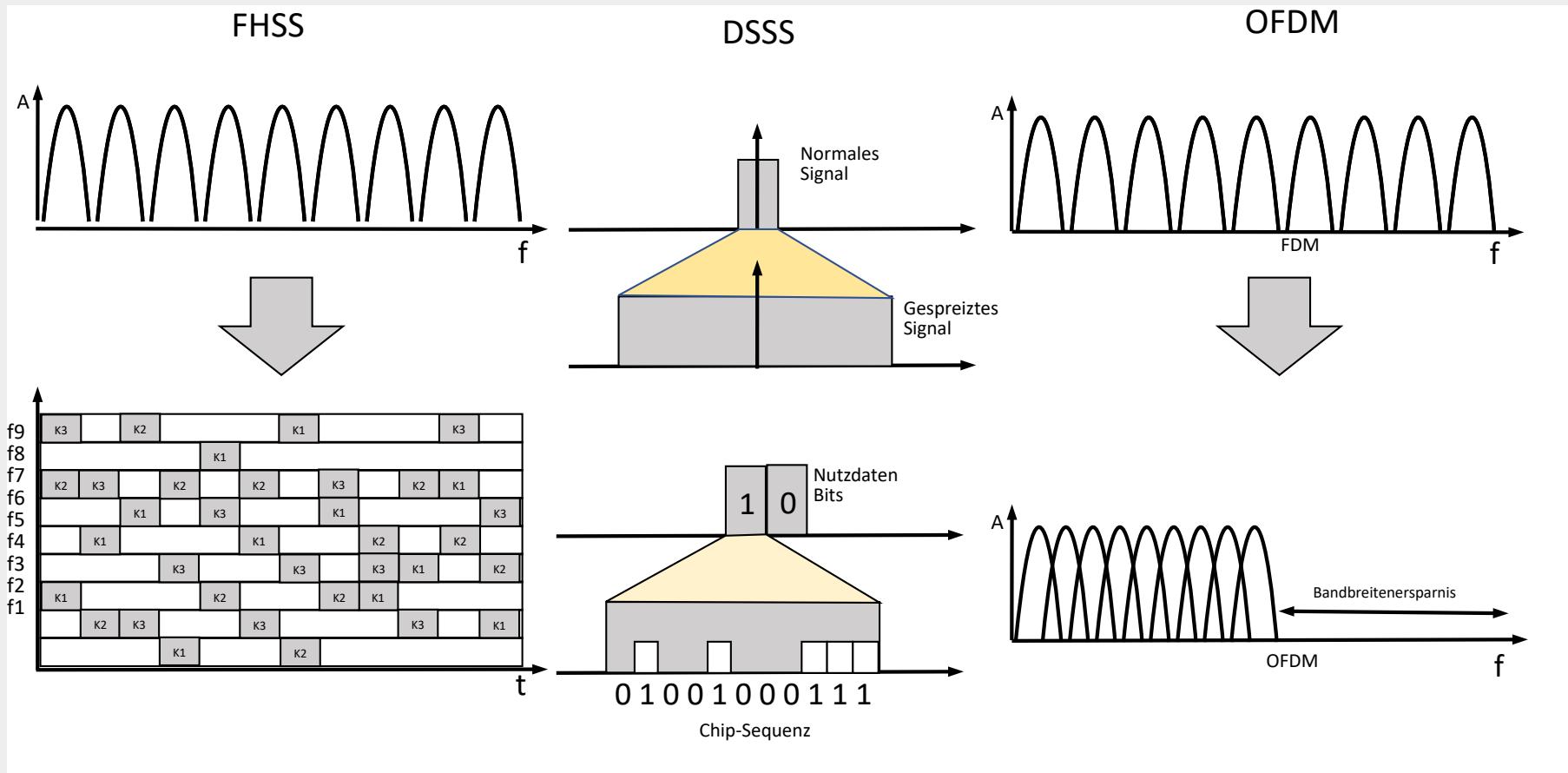


OFDM: Erster Lösungsansatz

Datenrate = Symbolrate * Bits pro Unterkanal(N_{BPSC}) * Anz. der Unterkanäle * Coderate

Datenrate [Mbit/s]	Modulation	Coderate	Codierte Bits pro Unterträger [N_{BPSC}]	Codierte Bits pro OFDM- Symbol [N_{CBPS}]	Daten-Bits pro OFDM-Symbol [N_{DBPS}]
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Vergleich: FHSS / DSSS / OFDM



Inhalt

Signalspreizung

FHSS / DSSS (Rahmenaufbau)

OFDM-Übertragungsverfahren

Sende-Ablauf

Empfangs-Ablauf

Window-Funktion

OFDM-Rahmenaufbau

Trainingssequenz

Vergleich: FHSS, DSSS, OFDM

WLAN-Vorlesung Teil-3

- Signalspreizung
- FHSS / DSSS (Rahmenaufbau)
- OFDM-Übertragungsverfahren
- Sende-Ablauf
- Empfangs-Ablauf
- Window-Funktion
- OFDM-Rahmenaufbau
- Trainingssequenz
- Vergleich: FHSS, DSSS, OFDM

Normierung von:

- FHSS
- DSSS
- Infrarot
- OFDM
- OFDMA

Realisiert wurden:

- FHSS
- DSSS
- OFDM
- OFDMA

Für die Physical Layer (PHY-Layer) wurden bereits einige Lösungen normiert.

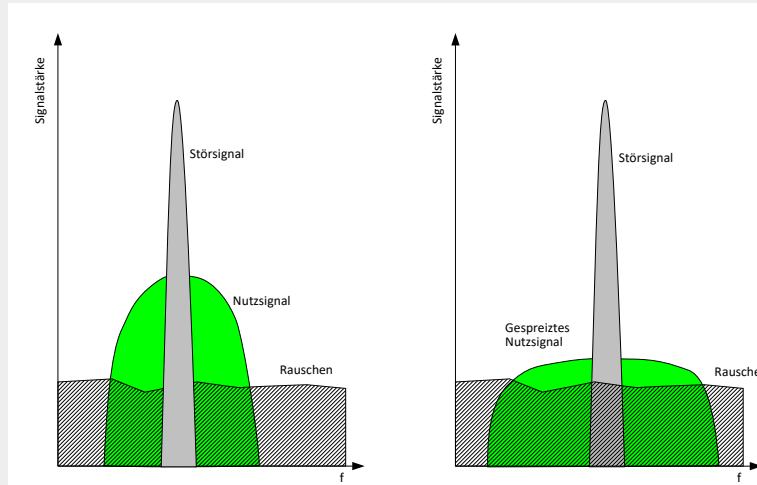
Für Infrarot gab es keine bedeutenden Implementierungen.

Anfänglich wurde nur FHSS und DSSS umgesetzt.

Da diese Verfahren nur maximal 2 MBit/s an Brutto-Datenübertragungsrate haben, wurde mit der Einführung von OFDM ein großer Schritt nach vorne gemacht, der heute noch weiter verfolgt wird.

Mit OFDMA wird im neuesten Standard wieder die Möglichkeit geschaffen eine größere Anzahl von Stationen mit WLAN zu versorgen.

PHY-Layer: Signalspreizung



Die zur Verfügung stehende Kanalkapazität wird berechnet durch:

$$C = B * \log_2 (1 + S/N) \approx B * 1,44 * \ln(1 + S/N)$$

Danach kann bei einem schlechten Störabstand, durch eine große Bandbreite, immer noch ein fehlerfreier Informationsfluss gegeben sein.

Um Funksignale unempfindlicher gegen Störungen zu machen, werden so genannte Bandspreizverfahren angewendet welche die Bandbreite des Signals vergrößern. Allerdings muss die größere Bandbreite dann auch zur Verfügung gestellt werden!

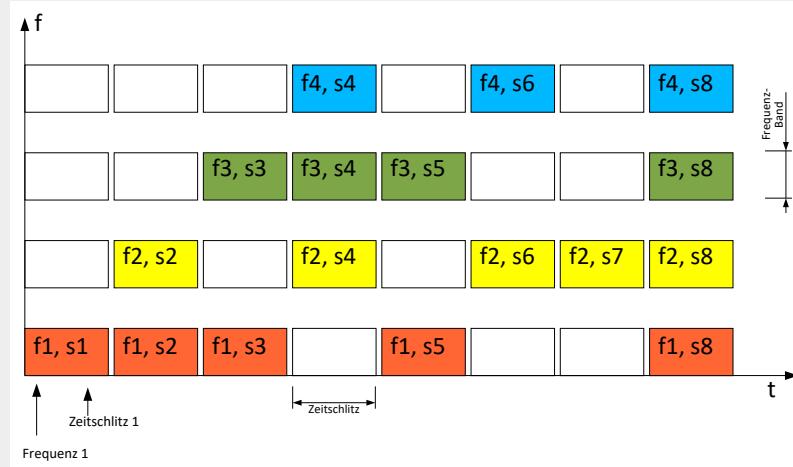
Dies lässt sich so weit treiben, bis das Nutzsignal im Rauschen verschwindet. Im militärischen Bereich wird das auch angewendet um ein Signal zu verstecken.

Bei der Satelliten-Kommunikation wird das Verfahren angewendet, um sehr kleine Nutzsignale von weit entfernten Satelliten aus dem Rauschen zu extrahieren.

Wird das Wechseln der Bänder durch die Codesequenz gesteuert, spricht man von Frequency-Hopping Code Division Multiple Access (CDMA).

Wird auf einer Frequenz das Signal gespreizt spricht man von einer Direct-Sequence CDMA.

PHY-Layer: Signalspreizung TDMA in Kombination mit FDMA

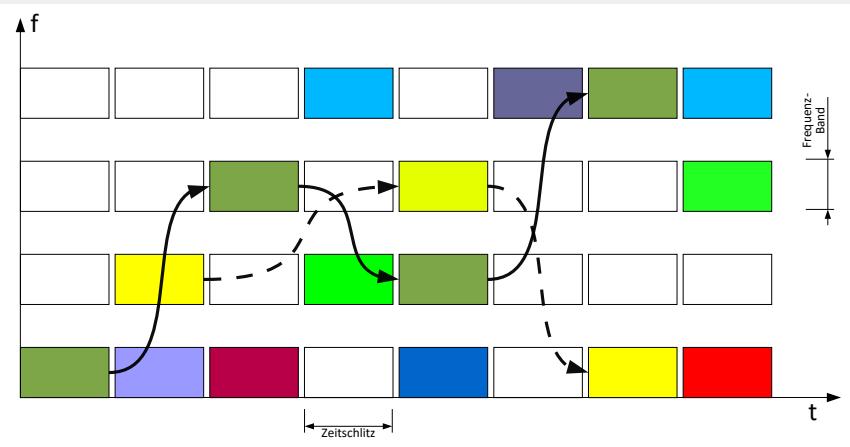


Um Störungen zu begegnen und einer bessere Verteilung der User über die Frequenzbänder zu erreichen wird eine Kombination aus FDMA und TDMA eingeführt.

Dazu werden unterschiedliche Frequenzbänder verwendet. Diese Frequenzbänder werden den Usern für einen bestimmten Zeitraum (Zeitschlitz) zur Verfügung gestellt.

Da Störungen meist auf Frequenzbänder beschränkt sind, wechseln die User die verwendeten Frequenzbänder. Der Wechsel wird in festgelegten Sequenzen geregelt.

PHY-Layer: Signalspreizung Frequency Hopping



Durch den Wechsel von Frequenz nach jedem Zeitschlitz ist die Wahrscheinlichkeit von Störungen gering.

So geht bei einer Störung auf einer Frequenz evtl. ein Frame verloren. Der Frameverlust kann mit entsprechenden Maßnahmen erkannt werden. Der Frame ist dann einfach zu wiederholen

GSM, Bluetooth und IEEE802.11 mit dem Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) Verfahren gehen so vor.

Die Bandbreite von 2,4000 GHz bis 2,4835GHz wird in 79 Frequenzunterbänder mit je 1 MHz aufgeteilt.
Aus einem Set von 3 unterschiedlichen Sequenzen wird ein Set ausgewählt
Sender und Empfänger wechseln alle 400ms den Kanal, was alle 2,4S einen Wechsel bedeutet

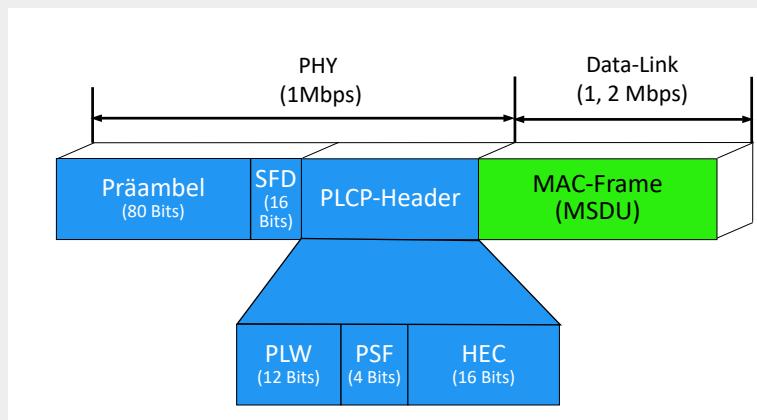
1. Set: $x = \{0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 75\}$
2. Set: $x = \{1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 52, 55, 58, 61, 64, 67, 70, 73, 76\}$
3. Set: $x = \{2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 56, 59, 62, 65, 68, 71, 74, 77\}$

Da bei diesem Verfahren mehrere Frequenzbänder verwendet werden findet automatisch eine Signalspreizung statt.

Umgesetzt wird das bei WLANs mit 3 Hoppingsequenzen.
Beim Verbindungsauflauf zwischen zwei Stationen wird eine davon ausgehandelt.

Beim FHSS wird als Modulationsverfahren das 2-Level-Gaussian Frequency-Shift-Keying (2GFSK) für eine Datenrate von 1MBit/s, oder das 4-Level-Gaussian-Frequency Shift-Keying (4GFSK) für eine Datenrate von 2MBit/s

Beim Gaussian-Frequency Shift-Keying werden beide Seitenbänder verwendet. Damit ist die benötigte Bandbreite relativ groß.



Die Präambel besteht aus einem 80 Bit langen String mit abwechselnd 0 und 1, beginnend mit 0.

Der 16 Bit lange Start-Frame-Delimiter (SFD) hat das Bitmuster 0000 1100 1011 1101 beginnend mit 0.

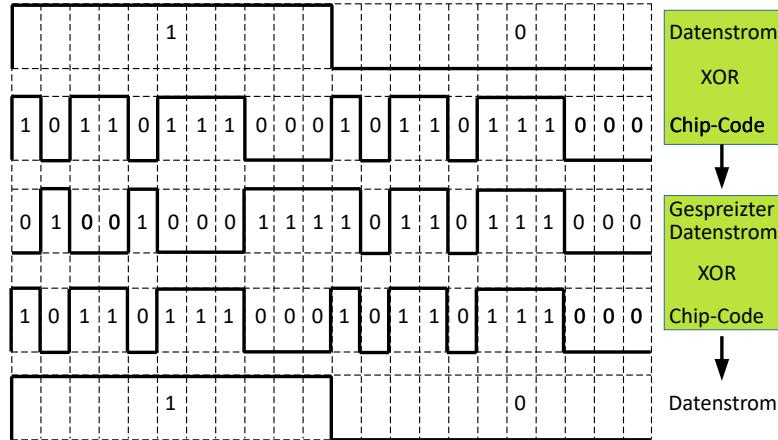
Das PSDU Length Word (**PLW**) ist 12 Bit lang und legt die Länge des MAC-Frames in Bytes fest.

Das PLCP Signaling Field (**PSF**) ist 4 Bit lang und legt die Datenrate des Frames fest. Obwohl der Standard Datenraten von 1 bis 4,5 Mbps vorsieht, wurden nur Datenraten von 1 Mbps oder 2 Mbps realisiert.

Das 16 Bit lange Header Error Control Feld (**HEC**) ist ein CRC-16 Test für den PLCP-Header. Damit können Fehler im PLW und PSF erkannt werden.

Vor dem Senden werden die Daten noch gescrambelt und 32/33 Codiert

DSSS - Signalspreizung



Beim Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) wird die Bandspreizung mit einem Barker-Chip-Code (mit 11Bits) durchgeführt.

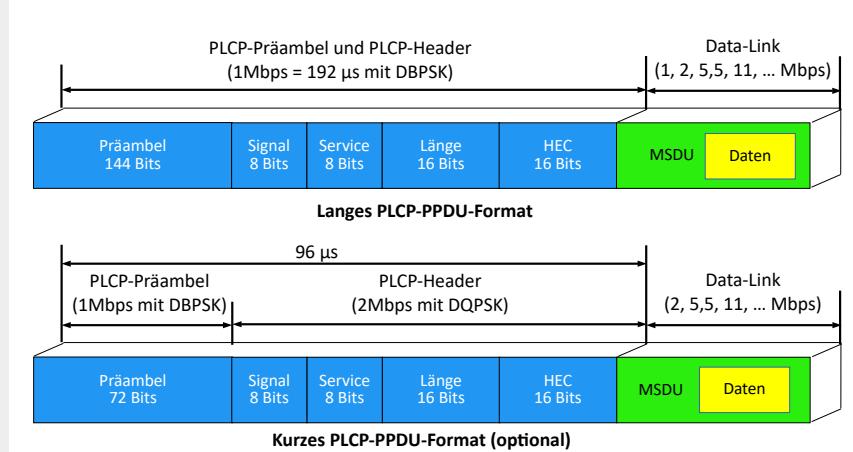
Der Datenstrom des Nutzsignals wird mit einem Chip-Code XOR verknüpft.

Das Ergebnis ist ein gepreizter Datenstrom.

Auf der Empfängerseite wird die gleiche XOR-Operation durchgeführt.

Das Ergebnis ist dann wieder der Datenstrom des Nutzsignals.

DSSS-Frameformat



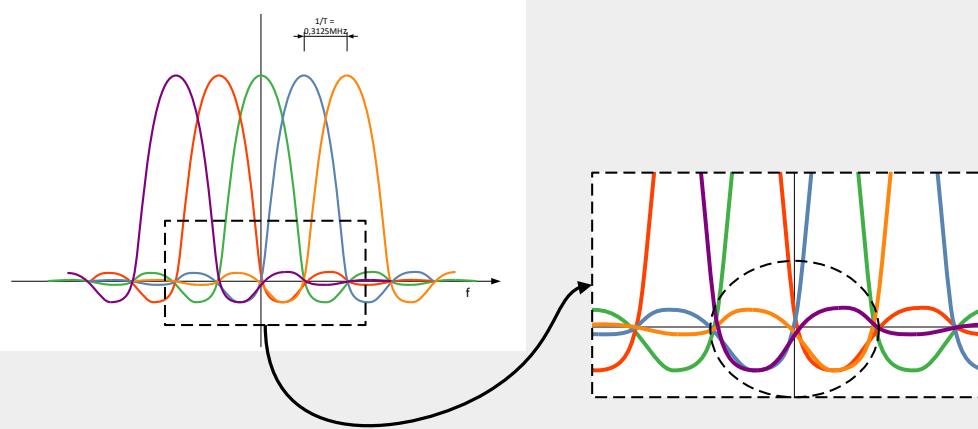
In der allerersten Version konnte mit dem DSSS-Verfahren nur 2 Mbit/s Brutto übertragen werden.

Mit der Einführung von IEEE802.11b konnten bis zu 11 MBit/s übertragen werden.

Eine weitere Tuning-Maßnahme war die Einführung der verkürzten Präambel (die allerdings immer noch mit 1MBit/s übertragen wird)

Bei der langen Form wird der PLCP-Header mit 1Mbps übertragen.
Bei der kurzen Variante wird der PLCP-Header mit 2Mbps übertragen.

Die Daten können dann mit einer größeren Daten Übertragungsrate übertragen werden. Deshalb ist die Netto-Datenübertragungsrate immer größer als die Brutto-Datenübertragungsrate.



Mittlerweile verwenden moderne Übertragungsverfahren das Orthogonale Frequency Division Multiplexing (OFDM)

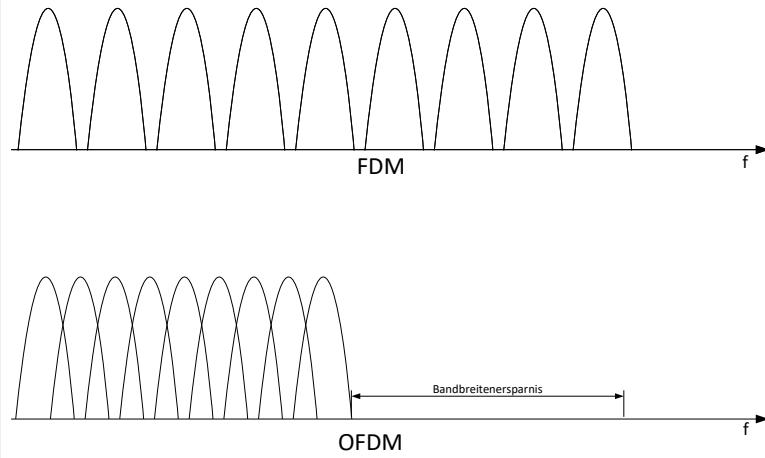
OFDM war von ETSI für Hiperlan/2 entwickelt worden.

Beim OFDM werden die Unterträger (Subcarrier) so weit zusammen geschoben, bis sie orthogonal nebeneinander stehen.

Im Detailausschnitt ist zu sehen, dass, da wo das grüne Signal sein Maximum hat, die beiden benachbarten Signale (rot und blau) ihr Minimum haben. Damit beeinflussen sich die benachbarten Signale nicht.

Dieses Verhalten wird als orthogonal bezeichnet.

OFDM: Bandbreitenersparnis



Durch das Zusammenschieben der Unterträger wird Bandbreite eingespart, die wiederum für weitere Unterträger genutzt werden kann.

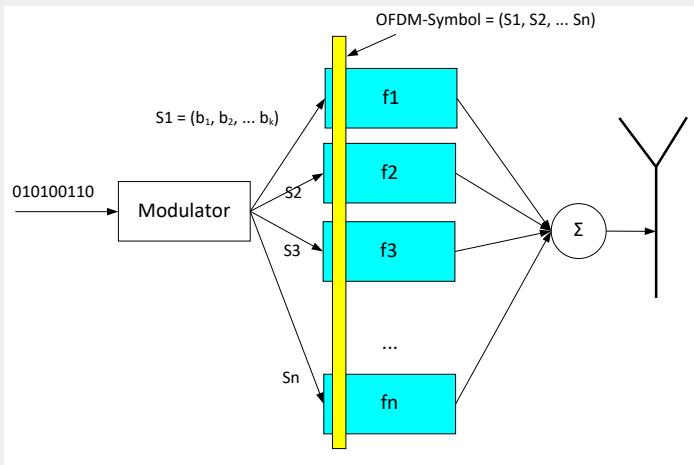
Bei OFDM im 5GHz-Band kommen so insgesamt 53 Unterträger zusammen.

Nicht alle Unterträger können für den Datentransport verwendet werden.

Die Kanäle -21, -7, 7 und 21 werden als Pilotkanäle verwendet. Auf ihnen werden definierte Signale gesendet, damit die Empfänger die Amplituden- und Phasenverschiebungen über alle Unterträger hinweg ermitteln können. Der Kanal 0 wird ebenfalls nicht genutzt.

Somit stehen für die Datenübertragung 48 Unterträger zur Verfügung.

OFDM: Verteilung der Symbole auf die Unterträger

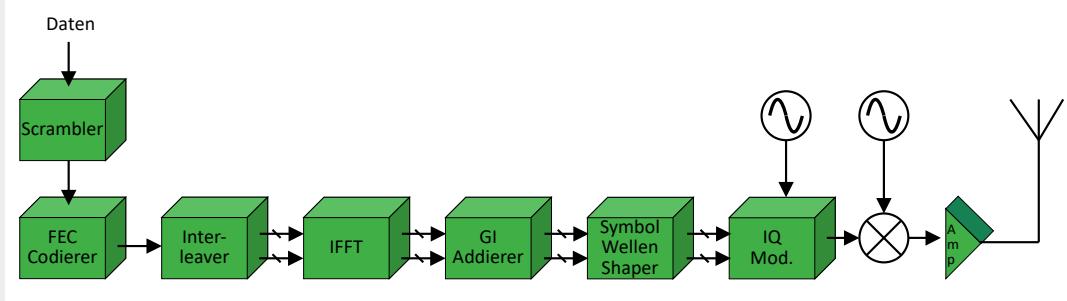


Die einzelnen Unterträger werden nicht für unterschiedliche Stationen verwendet, sondern die Bits der Symbole einer Station werden auf die Unterträger verteilt.

Bevor ein Signal moduliert wird, wird es auf die Unterträger der Frequenzbänder aufgeteilt. Damit verteilt sich ein Symbol bei der Übertragung über die gesamte zur Verfügung stehende Menge von Unterträgern. Auf diese Weise kann die Datenrate drastisch erhöht werden.

Allerdings ist erst einmal nur die Übertragung für eine Station möglich.

Bei neueren Standards wird es mit OFDMA wieder möglich gemacht, mehrere Stationen gleichzeitig zu bedienen!



Betrachtet man das Blockschaltbild des Senders von links nach rechts, sieht man als erste Einheit den **Scrambler**, der dafür sorgt, dass es keine langen Einser- oder Null-Folgen gibt.

Der folgende **Faltungscodierer** fügt redundanten Bits ein, um den Faltungscode für die Forward Error Correction (FEC) zu erzeugen.

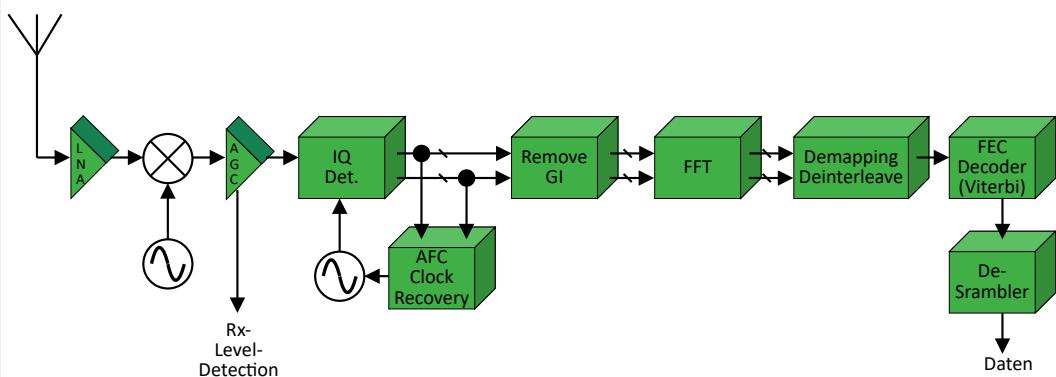
Der folgende **Interleaver** verteilt die Daten so, dass auf der Empfängerseite Burst-Störungen zu korrigierbaren Einzelfehlern gemacht werden können.

Ab dem Interleaver werden die Daten für jeden Unterträger getrennt bearbeitet.

Im Anschluss folgt die **Inverse-Fast-Fourier-Transformation** (IFFT) um für jeden Unterträger ein Ausgangssignal zu synthetisieren. Die IFFT liefert Koeffizienten, aus denen sich das Subframe mit der Dauer T_{FFT} zusammensetzt. Die Koeffizienten stellen die Spektrallinien dar, die den Daten, Pilotträgern und Trainingssymbolen entsprechen.

Danach werden die **Guard-Intervalle** in den Datenfluss eingefügt.

Vor der IQ-Modulation werden die Signalwellen mittels eines **Symbol Wellen Shapers** in eine optimale Form gebracht.



Beim Empfänger durchlaufen die Informationen die Blöcke in umgekehrter Reihenfolge als beim Senden.

Zuerst werden jedoch die **Signale verstärkt** und auf eine Zwischenfrequenz gemischt.

Danach kommt ein Verstärker mit **automatischer Verstärkungssteuerung** (Automatic Gain Control). An dieser Stelle wird auch die Information für die Signalstärke abgeleitet.

Der folgende IQ-Diskriminator wird mit einer steuerbaren Zwischenfrequenz aus der AFC-Baugruppe (Automatic Frequency Control) gemischt. Gleichzeitig wird der **Takt** aus dem Signal gewonnen.

Die nächste Baugruppe entfernt das **Guard-Intervall**.

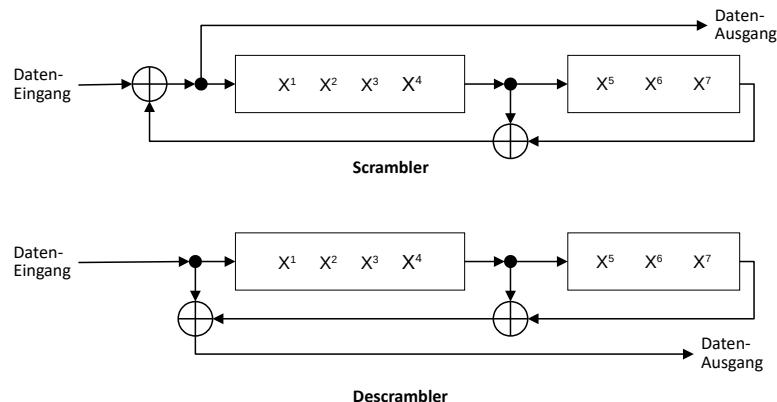
Danach kann die **Fast-Fourier-Transformation** aus dem zusammenhängenden Signal ein Spektrum von Einzelsignalen erzeugen, die den Informationen der OFDM Unterträger entsprechen.

Der **Deinterleaver** bringt die Informationen in die richtige Reihenfolge.

Der **FEC-Decoder** arbeitet mit einem **Viterbi-Algorithmus**. Er nähert die Information an das bestmögliche Ergebnis an und entfernt die redundanten Datenbits.

Als Letztes werden im Descrambler eventuelle lange Null- oder Einser Folgen wieder hergestellt.

OFDM: Scrambler



Mit dem Scrambler wird sicher gestellt, dass es keine langen Nullen- oder Einsen-Folgen gibt. Es handelt sich um selbst synchronisierende (multiplikative) Scrambler.

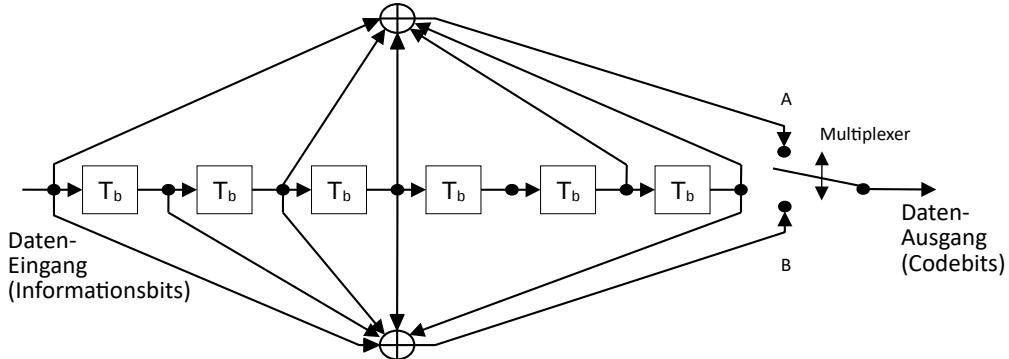
Es wird das Generatorpolynom $S(x) = x^7 + x^4 + 1$ verwendet.

Auf der Empfängerseite wird die umkehrende Funktion mit dem selben Generatorpolynom durchgeführt.

Erreicht wird die Synchronität dadurch, dass die Nutzdatenfolge direkt auf den Inhalt des linear rückgekoppelten Schieberegisters (LFSR) einwirkt.

.

OFDM: Faltungscodierer



Nach dem Scrambler folgt ein nicht rekursiver Faltungscodierer. Er fügt der Information Bits hinzu, um auf der Empfängerseite Fehler erkennen und beheben zu

können. Da die Informationen vor der Übertragung bearbeitet werden, spricht man von einer Vorwärts-Fehlerkorrektur (Forward Error Correction = FEC)

Bei IEEE802.11 hat man sich auf einen Faltungscodierer mit 6 Schieberegistern geeinigt. Für die Initialisierung werden die 6 Tail-Bits aus dem Header verwendet. Normalerweise werden dafür Nullen übertragen.

Als Generatorpolynom werden nach dem ESA-NASA-Satellite-Standard-Code $g_0=133_{(8)}$ und $g_1=171_{(8)}$ verwendet.

$$= g_0=1011011_{(2)} \text{ und } g_1=1111001_{(2)}$$

$$= g_0 = 1 + x^2 + x^3 + x^5 + x^6 \text{ und } g_1 = 1 + x + x^2 + x^3 + x^6.$$

Am Ende wird mit dem Multiplexer aus dem A- und B-Ausgang die Codebits abwechselnd übernommen.

Die Coderate (R) eines Faltungscodierers errechnet sich aus:

$$R = \text{Anzahl der Informationsbits (K)} / \text{Anzahl der erstellten Codebits (N)}$$

$$= \text{Netto-Bits} / \text{Brutto-Bits} = K / N$$

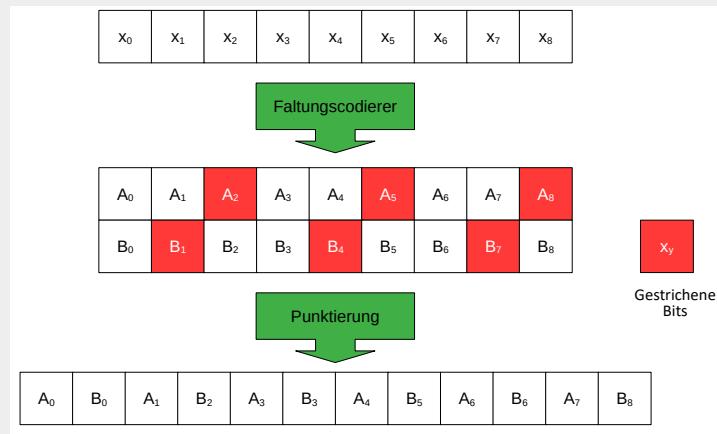
Eine Coderate von $1 / 2$ entspricht einer Übertragung der Datenbits + 100% Redundanz-Bits. Das entspricht einer Verdopplung der zu übertragenden Daten.

Die Symbolspeichertiefe (M) entspricht der Anzahl der Speicherelemente (in diesem Fall = 6)

Das Codewort am Ausgang wird von 7 Bits ($M + 1$) beeinflusst, da bereits vor den Schieberegistern Information für die Modulo2-Addierer verwendet wird.

Auf der Empfängerseite gibt es kein direktes Gegenstück dafür. Dort wird mit einem Viterbi Algorithmus das bestmögliche Ergebnis geschätzt!

OFDM: Punktierung



Bei einer 1/2-Codierung wird also die zu übertragende Datenmenge verdoppelt. Das ist nicht überall notwendig, weshalb die erzeugte Datenmenge wieder reduziert wird.

Soll die Menge der Redundanzbits reduziert werden, kann mit einem Entfernen von diversen Redundanzbits eine optimierte Coderate erzeugt werden.

Dabei ist darauf zu achten, dass nur redundante Information entfernt wird. Das streichen von A₃ und B₃ wäre somit falsch.

Im obigen Beispiel wurde der Faltungscodierer mit den Datenbits (X₀ bis X₈) versorgt. Daraus macht er die codierten Bits A₀ bis A₈ und B₀ bis B₈. Von diesen Bits werden 6 Bits entfernt. Damit entstehen am Ausgang 12 Bits. Setzt man die Eingangsbits mit den Ausgangsbits ins Verhältnis erhält man 9 / 12, was gekürzt 3 / 4 entspricht.

Beispiel Faltungscodierer und Punktierung

Datenbitfolge: $D_0=1, D_1=1, D_2=0, D_3=1, D_4=1, D_5=1, D_6=0, D_7=1; D_8=0$

i	D_i	D_{i-1}	D_{i-2}	D_{i-3}	D_{i-4}	D_{i-5}	D_{i-6}	A=Modulo-2
0	1	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	1
2	0	1	1	0	0	0	0	1
3	1	0	1	1	0	0	0	1
4	1	1	0	1	1	0	0	0
5	1	1	1	0	1	1	0	1
6	0	1	1	1	0	1	1	0
7	1	0	1	1	1	0	1	0
8	0	1	0	1	1	1	0	0

i	D_i	D_{i-1}	D_{i-2}	D_{i-3}	D_{i-4}	D_{i-5}	D_{i-6}	$B_i=\text{Modulo-2}$
0	1	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	0	0
3	1	0	1	1	0	0	0	1
4	1	1	0	1	1	0	0	1
5	1	1	1	0	1	1	0	1
6	0	1	1	1	1	0	1	0
7	1	0	1	1	1	1	0	0
8	0	1	0	1	1	1	0	0

I	0	1	2	3	4	5	6	7	8
A	1	1	1	1	0	1	0	0	0
B	1	0	0	0	1	1	0	0	0

Der codierte Datenstrom am Ausgang ergibt sich damit ist 11-10-11-01-00-00.

Mit dem Faltungscodierer aus Folie 18 ergibt sich bei einer Eingangsbitfolge von 1-1-0-1-1-1-0-1-0 der folgende Zusammenhang.

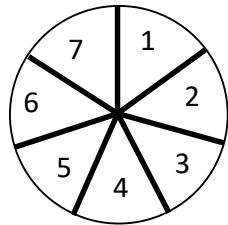
Die Bits werden durch das Schieberegister geschoben.
Nach jedem Takt wird das Ergebnis am Ausgang Modulo2 addiert, wobei die roten Spalten nicht mitzählen.

In der unteren Tabelle werden die Werte für A und B übereinander dargestellt.

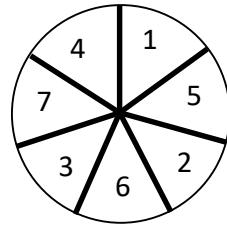
Ergebnis: 11-10-10-11-01-11-00-00-00

Um die Redundanz etwas zu reduzieren, erfolgt noch eine Punktierung.
Dabei werden die rot markierten Teile entfernt.

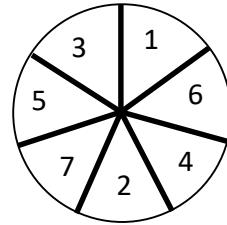
Ergebnis: 11-10-11-01-00-00



Nicht interleaved
(interleaved mit Faktor 1)



Interleaved
mit Faktor 2



Interleaved
mit Faktor 3

Interleaving wurde ursprünglich für das Schreiben von Festplatten genutzt, da sich dort die Platte schneller unter dem Schreib-Lesekopf gedreht hatte, als dass die Daten geschrieben werden konnten.

Dazu muss z. B., bei einem Interleaving-Faktor von 2, sich die Platte 2 Mal drehen bis die Daten geschrieben sind.

Im Fall von WLAN will man mit dem Interleaving Burst-Fehler (mehrere Fehler im Block hintereinander) in den Griff bekommen indem man versucht mehrere Einzelfehler daraus zu machen.

OFDM: (Beispiel ohne Interleaving)

Daten:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Senden
ohne
Interleaving:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Störung:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Empfangene
Daten:

a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4	c1	c2	c3	c4	d1	d2	d3	d4	e1	e2	e3	e4	f1	f2	f3	f4	g1	g2	g3	g4
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Ein Beispiel von zu übertragenden Daten:

a1a2a3a4b1b2b3b4c1c2c3c4d1d2d3d4e1e2e3e4f1f2f3f4g1g2g3g4

Bei einer Übertragung ohne Interleaving wird folgendes übertragen:

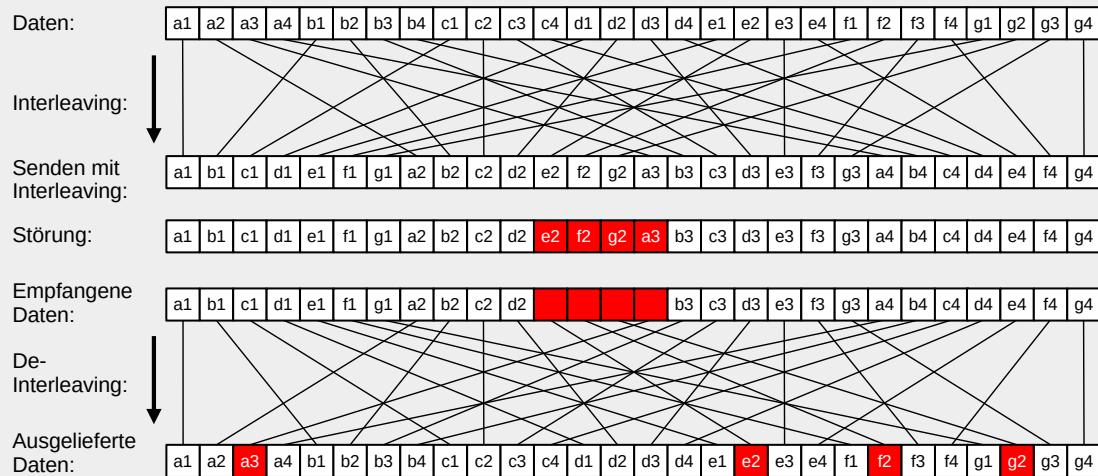
a1a2a3a4b1b2b3b4c1c2c3c4d1d2d3d4e1e2e3e4f1f2f3f4g1g2g3g4

Tritt nun ein Burst-Fehler auf, kann das Ergebnis folgendermaßen aussehen:

a1a2a3a4b1b2b3b4c1c2c3??????d4e1e2e3e4f1f2f3f4g1g2g3gg4

Auf der Empfängerseite wird ein großer Block ausgeliefert der nur schwer zu rekonstruieren ist.

OFDM: (Beispiel mit Interleaving)



Bei Interleaving werden die Daten folgendermaßen umgestellt:

a1b1c1d1e1f1g1a2b2c2d2e2f2g2a3b3c3d3e3f3g3a4b4c4d4e4f4g4

Tritt bei der Datenübertragung der gleiche Burstfehler auf, sieht die Information so aus:

a1b1c1d1e1f1g1a2b2c2d2??????b3c3d3e3f3g3a4b4c4d4e4f4g4

Nach einem De-Interleaving auf der Empfängerseite sieht die Information so aus:

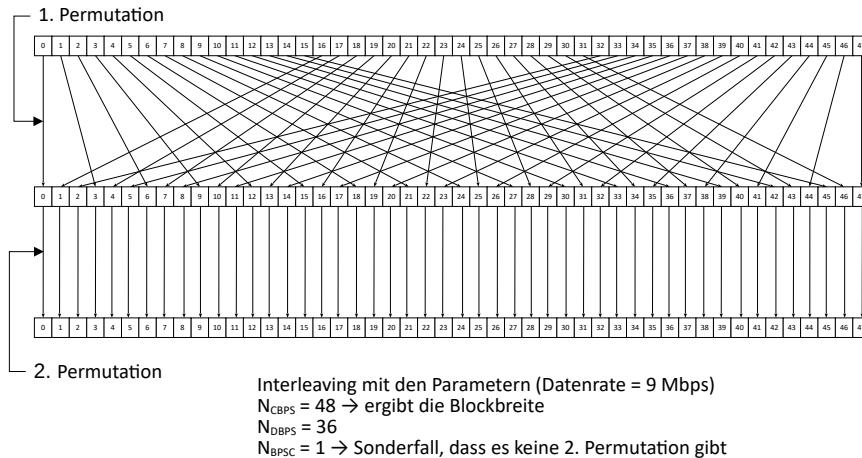
a1a1??a4b1b2b3b4c1c2c3c4d1d2d3d4e1??e3e4f1??f3f4g1??g3g4

Damit wurde ein Burst-Fehler af der Empfängerseite in 4 Einzelfehler umgesetzt.

Die

Einzelfehler sind einfach zu rekonstruieren.

OFDM: Interleaving bei WLAN



Bei OFDM wird das Interleaving in einer zweistufigen Permutation durchgeführt. In der ersten Permutation werden Blöcke der Größe N_{CBPS} (Bits pro OFDM-Symbol) verschachtelt.

Die Ableitung erfolgt durch:

$$i = (N_{CBPS} / 16) * (k \bmod 16) + \text{floor}(k / 16)$$

Wobei gilt:

$$k = 0, 1, \dots, N_{CBPS} - 1$$

N_{CBPS} ist die Anzahl der codierten Bits pro OFDM-Symbol.

Mögliche Werte sind 48, 96, 192, 288.

Die floor-Funktion bildet eine reelle Zahl (R) auf die nächst kleiner Ganzzahl (Z) ab. Z. B. $Z = \text{floor}(3,6) = 3$ oder $Z = \text{floor}(-3,6) = -4$

Die zweite Permutation wird folgendermaßen abgeleitet:

$$j = s * \text{floor}(i / s) + [i + N_{CBPS} - \text{floor}(16 * i / N_{CBPS})] \bmod s$$

Wobei gilt:

$$i = 0, 1, \dots, N_{CBPS}$$

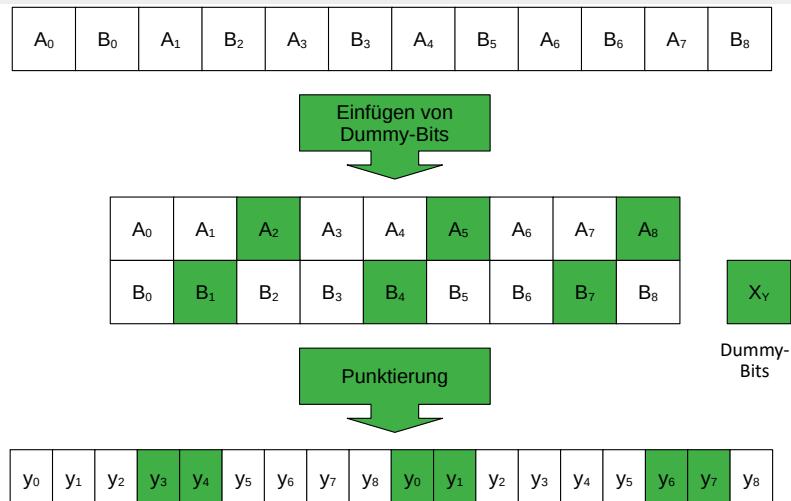
$$s = \max(N_{BPSC} / 2, 1)$$

N_{BPSC} ist die Anzahl der Bits pro Subcarrier. Mögliche Werte sind 1, 2, 4, 6.

Die max-Funktion ermittelt den maximalen Wert von zwei Werten.

Danach wird an der Anzahl und der Reihenfolge der Bits nichts mehr geändert.

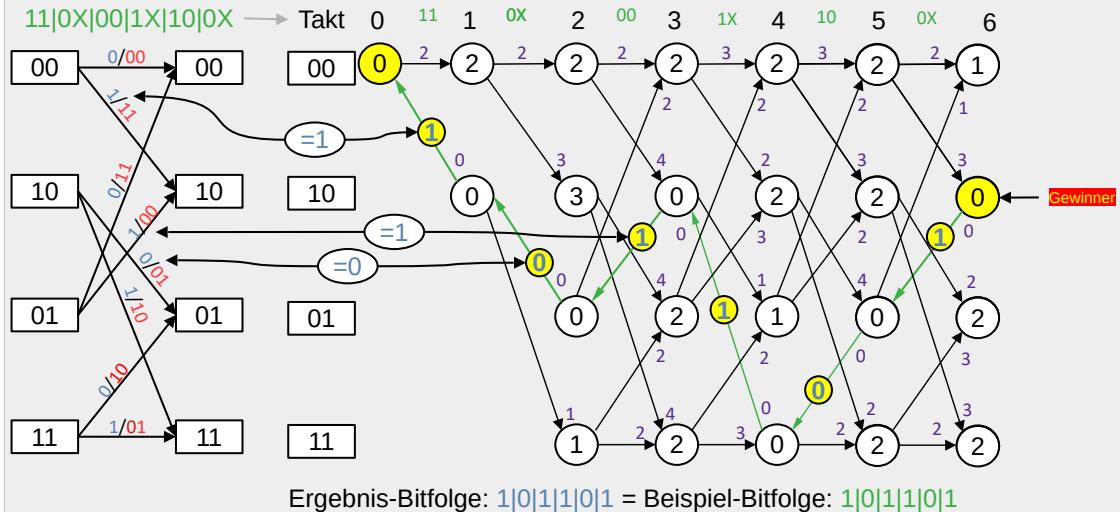
OFDM: Punktierung



Auf der Empfängerseite muss zuerst mit einem Deinterleaver die Bitreihenfolge in den ursprünglichen Zustand zurückgeführt werden.

Danach müssen die punktierten Bits wieder aufgefüllt werden.

OFDM: Viterbi-Algorithmus

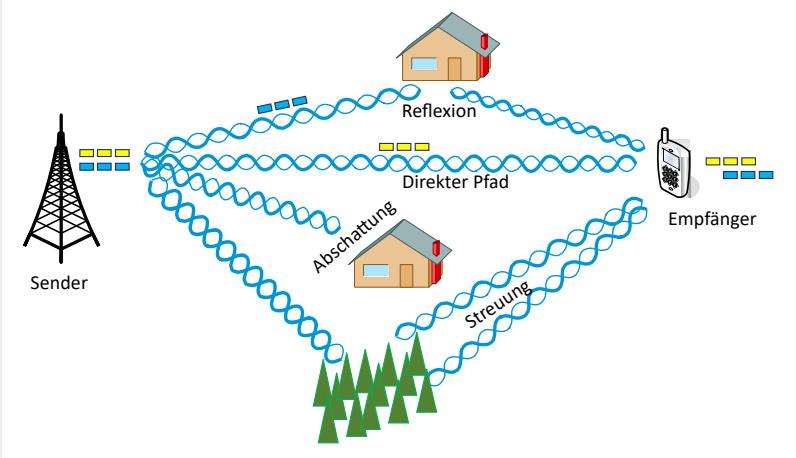


Im nächsten Schritt werden mit einem Viterbi-Algorithmus die ursprünglichen Daten geschätzt.

Als Beispiel siehe eigene Präsentation.

Am Ende erfolgt noch das Descrambeln.

Problem der Mehrwegeausbreitung



Bei der drahtlosen Übertragung von Daten über eine Funkstrecke breiten sich die Funkwellen in allen Richtungen aus.

Dabei gibt es eine direkte Verbindung, die so genannte Line of Sight (LOS), zwischen Sender und Empfänger und weitere Ausbreitungswege, die über Reflexionen und Streuungen auch zum Empfänger führen.

Allerdings haben die Reflexionen und Streuungen einen weiteren Weg zurückzulegen und kommen damit später beim Empfänger an.

Außerdem werden sie durch den längeren Weg auch mehr gedämpft, als bei der direkten Verbindung.

Es gilt also die Anzahl der Pfade, die unterschiedlichen zeitversetzten Symbole und die Dämpfung der Symbole zu ermitteln. Dazu muss der Kanal abgeschätzt werden. Um einen Kanal abzuschätzen, muss beim Senden ein Teil der Nachricht dem Empfänger schon bekannt sein. Diesen Teil der Nachricht nennt man Trainingssequenzen. Mit den beim Empfänger bekannten Trainingssequenzen, kann eine Kanalabschätzung für jeden Frame gemacht werden und so bei einem bewegten Sender oder Empfänger die Kanaleigenschaften ständig angepasst werden.

Trainingssequenz:

(**-1, +1, -1, -1, -1, +1, +1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, +1, +1, +1**)

Erweiterung der Trainingssequenz:

+1, +1, -1, +1, +1, -1, +1, -1, -1, +1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, +1, -1, -1

Schritt -5:

+1 +1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1
-1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1

-1 +1 +1 -1 -1 +1 -1 +1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 = 0

Schritt -4:

+1 +1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 -1 -1 -1
-1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1

-1 -1 -1 -1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 +1 = 0

Die Trainingssequenz ist ein Beispiel des Mobilfunk-Standards GSM, wo es 8 Trainingssequenzen gibt.

Zuerst werden Nullen und Einsen codiert:

0 = -1

1 = +1

Als mathematische Grundlage gelten folgende Modulationsbeziehungen.

$$\begin{aligned}-1 * -1 &= +1 \\-1 * +1 &= -1 \\+1 * -1 &= -1 \\+1 * +1 &= +1\end{aligned}$$

Zuerst wird die Trainingssequenz um 10 Bit erweitert. Vorne werden die letzten 5 Bits vorangestellt. Hinten werden die ersten 5 Bits angehängt.

Die erweiterte Trainingssequenz wird gesendet.

Beim Empfang werden die erweiterten Trainingssequenzen mit der ursprünglichen Trainingssequenz korreliert.

Kanalabschätzung (Teil-2)

Schritt -3:

$$\begin{array}{r} +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \\ +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad = 0 \end{array}$$

Schritt -2:

$$\begin{array}{r} +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \\ +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad = 0 \end{array}$$

Schritt -1:

$$\begin{array}{r} +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \\ +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad = 0 \end{array}$$

Schritt 0:

$$\begin{array}{r} +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \\ +1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline +1 \quad = 16 \end{array}$$

Die empfangenen Trainingssequenz wird an der ursprünglichen Trainingssequenz vorbeigeschoben . Bei jedem Schritt wird bitweise die Korrelationsverknüpfung durchgeführt und am Ende die Summe gebildet.

Da, wo beide Trainingssequenzen ungleich sind, ist das Ergebnis = 0.

Da, wo beide Trainingssequenzen gleich sind, ergibt die Korrelation ein Ergebnis von 16.

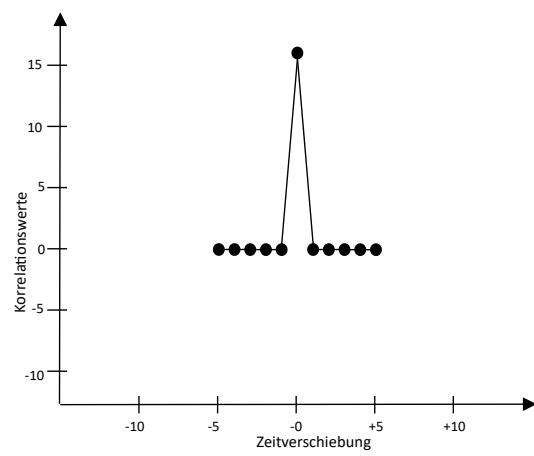
Kanalabschätzung (Teil-3)

Schritt +1:
$$\begin{array}{r} +1 \ 1 + -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 -1 -1 \\ -1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 \\ \hline -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 = 0 \end{array}$$

Schritt +2:
$$\begin{array}{r} c \\ -1 +1 -1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 \\ \hline +1 -1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 +1 -1 +1 = 0 \end{array}$$

Die weiteren Korrelationen ergeben wieder den Wert = 0.

Kanalabschätzung (Teil-4)



Da, wo keine Zeitverschiebung auftritt, ergibt die Korrelation einen Wert > 0 .

Mathematisch kann man die Dämpfung eines Signals mit einer Multiplikation des Signals mit einem Faktor a mit $0 \leq a \leq 1$ darstellen.

$$y_k = s_k + a_1 * s_{k-1} + a_2 * s_{k-2} + a_3 * s_{k-3} + a_4 * s_{k-4}$$

Im folgenden Beispiel wird angenommen, dass es zwei Signale mit einer Verzögerung gibt. Die Faktoren für die Dämpfung sollen $a_1 = \frac{1}{4}$ und $a_2 = \frac{1}{8}$ sein. Beim direkten Signal s_k wird der Faktor = 1 angenommen.

$$y_k = s_k + \frac{1}{4} * s_{k-1} + \frac{1}{8} * s_{k-2}$$

$$\begin{array}{l} (1) * +1 +1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 \dots \\ (\frac{1}{4}) * +1 +1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 \dots \\ (\frac{1}{8}) * +1 +1 -1 +1 +1 -1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 +1 -1 +1 \dots \end{array}$$

 $y_0 \quad y_1 \quad y_2 \dots$

Betrachtung der Dämpfung unterschiedlicher Pfade:

Pfade mit einer längeren Laufzeit haben aufgrund der Freiraumdämpfung eine größere Dämpfung.

Um die Dämpfung zu ermitteln kann jeder Pfad mit einem Faktor multipliziert werden.

Im Beispiel:

$$\begin{aligned} S_K * 1 &= 8/8 \\ S_{K-1} * \frac{1}{4} &= 2/8 \\ S_{K-2} * \frac{1}{8} &= 1/8 \end{aligned}$$

Beginnend mit y_0 empfängt man also:

$-5/8, 7/8, 9/8, -5/8, 7/8, -7/8, -9/8, -11/8, 5/8, 9/8, 11/8, 11/8, -5/8, 7/8, 9/8, 11/8, -5/8, 7/8, 9/8, -5/8, 7/8, -7/8, -9/8, -11/8$

Lässt man der Übersicht halber die Nenner weg entsteht:

$-5, +7, +9, -5, +7, -7, -9, -11, +5, +9, +11, +11, -5, +7, +9, +11, -5, +7, -7, -9, -11$

Schiebt man die bekannte Trainingssequenz daran vorbei und beginnt die Korrelation bei y_0 erhält man:

$(-1)(-5) + (1)(7) + (-1)(9) + (-1)(-5) + (-1)(7) + (1)(-7) + (1)(-9) + (1)(-11) + (1)(5) + (-1)(9) + (1)(11) + (1)(11) + (1)(-5) + (-1)(7) + (1)(9) + (1)(11)$

$$= 5 + 7 - 9 + 5 - 7 - 9 - 11 + 5 - 9 + 11 + 11 - 5 - 7 + 9 + 11 = 0$$

Ermittlung der Dämpfung der einzelnen Pfade der Mehrwegeausbreitung (Teil-3)

Auch wenn man bei y_1 und y_2 beginnt wird das Ergebnis = 0 sein. Beim Start bei y_3 ergibt sich erstmals ein anderes Bild:

$$\begin{array}{r} -5 +7 -7 -9 -11 +5 +9 +11 +11 -5 +7 +9 +11 -5 +7 +9 \\ -1 +1 -1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 \\ \hline +5 +7 +7 +9 +11 +5 +9 +11 +11 +5 +7 +9 +11 +5 +7 +9 = 128 \end{array}$$

Der Wert von 128 geteilt durch 8 ergibt 16. Da dies der Wert ohne Dämpfung sein soll entspricht der ermittelte Wert 16/16. Somit ergibt sich auch der Wert von 16 für die weiteren Nenner bei den Dämpfungsberechnungen.

Beim Start bei y_4 ergibt sich:

$$\begin{array}{r} +7 -7 -9 -11 +5 +9 +11 +11 -5 +7 +9 +11 -5 +7 +9 -5 \\ -1 +1 -1 -1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 \\ \hline -7 -7 +9 +11 -5 +9 +11 +11 -5 -7 +9 +11 -5 -7 +9 -5 = 32 \end{array}$$

Der Wert von 32 geteilt durch 8 ergibt 4, was 4/16 entspricht und bedeutet, dass dieser Pfad mit dem Faktor $\frac{1}{4}$ gedämpft ist.

Beim Start bei y_5 ergibt sich:

$$\begin{array}{r} -7 -9 -11 +5 +9 +11 +11 -5 +7 +9 +11 -5 +7 +9 -5 +7 \\ -1 +1 -1 -1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 +1 -1 +1 +1 \\ \hline +7 -9 +11 -5 -9 +11 +11 -5 +7 -9 +11 -5 +7 -9 -5 +7 = 16 \end{array}$$

Das Ergebnis von 16 geteilt durch 8 ergibt 2 was 2/16 bedeutet, und dass dieser Pfad mit dem Faktor $\frac{1}{8}$ gedämpft ist.

Ermittlung der Dämpfung der einzelnen Pfade der Mehrwegeausbreitung (Teil-4)

Beim Start bei y_6 ergibt sich.

$$\begin{array}{r} -9 \quad -11 \quad +5 \quad +9 \quad +11 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \quad -5 \quad +7 \quad -7 \\ -1 \quad +1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad -1 \quad +1 \quad +1 \quad +1 \\ \hline +9 \quad -11 \quad -5 \quad -9 \quad -11 \quad +11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \quad -11 \quad -5 \quad +7 \quad +9 \quad +5 \quad +7 \quad -7 = 0 \end{array}$$

Ab hier ergibt sich also keine Dämpfung mehr.

Kurze Trainingssequenz bei IEEE802.11:

Die kurze Trainingssequenz besteht aus 12 Unterträgern welche mit den Elementen der folgenden Sequenz moduliert werden:

$$S_{26,26} = \sqrt{13/6} * \{0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1-j, 0, 0, -1-j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0, 0, 1+j, 0, 0\}$$

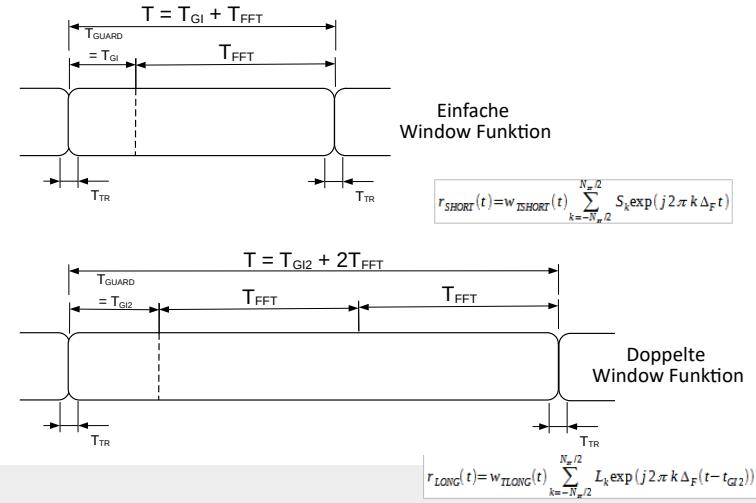
Die Multiplikation mit dem Faktor $\sqrt{13/6}$ dient zur Normalisierung der Leitung des OFDM-Symbols welches 12 von 52 Unterträgern nutzt.

Lange Trainingssequenz bei IEEE802.11:

Die lange Trainingssequenz besteht aus 53 Unterträgern (mit 0) welche mit den Elementen der folgenden Sequenz moduliert werden:

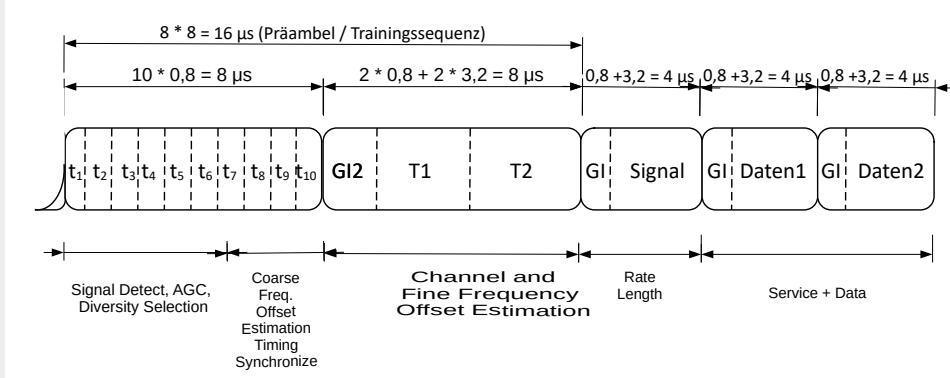
$$L_{26,26} = \{1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, 1, -1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$$

OFDM: Window-Funktion



$$r_{\text{Packet}}(t) = r_{\text{Preamble}}(t) + r_{\text{Signal}}(t - t_{\text{Signal}}) + r_{\text{Data}}(t - t_{\text{Data}})$$

OFDM: Rahmenaufbau

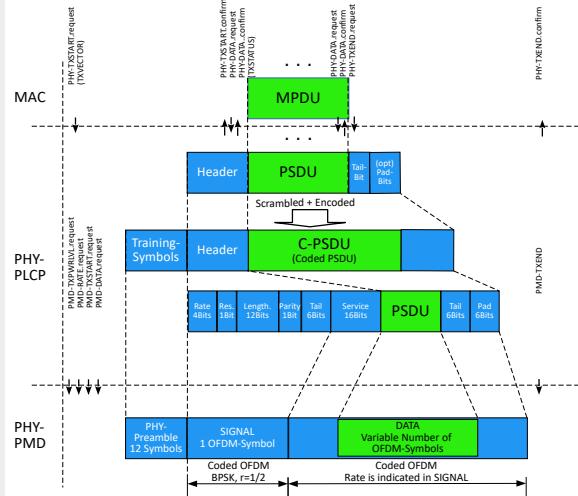


Die PLCP-Präambel besteht aus 10 kurzen Symbolen und zwei langen Trainingssymbolen.

Mit dem Signal-Feld wird die Datenrate und die Framelänge übertragen.

Danach folgen die zu übertragenden Daten.

OFDM: Sendeablauf



Hier sind OSI-Ebenen, ihre Funktionen und die zugehörigen Aufrufe / Primitive mit ihrem zeitlichen Ablauf für einen Daten-Sendevorgang dargestellt.

Im Vorfeld ist sicher zu stellen, dass der Kanal frei ist.

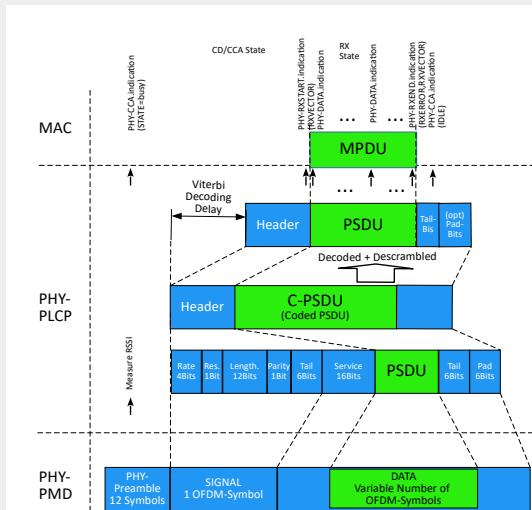
Das wird durch die MAC-Ebene mit einem TXSTART initiiert.

Die Daten, die von der MAC-Ebene mit der MAC-Ebene beim Empfänger auf Protokoll-Ebene ausgetauscht werden ist die MAC-Protocol-Data-Unit (MPDU)

Die Daten die von der MAC-Ebene an die unterlagerte Schicht übergeben werden ist die Physical-Service-Data-Unit (PSDU)

Die PLCP-Subebene ergänzt die Daten mit Header und Tail-Informationen und übergibt das Paket der Physical-Medium-Dependent Subebene zum Senden.

OFDM: Empfangsablauf



Hier sind Ebenen, ihre Funktionen und die zugehörigen Aufrufe / Primitive mit ihrem zeitlichen Ablauf für einen Daten-Empfangsvorgang dargestellt.

Mit der Indication, die durch das Clear Channel Assessment (CCA) erzeugt wird, wird der Ablauf angestoßen.

Durch die Bearbeitung des Viterbi-Algoritmus tritt eine kleine Zeitverzögerung in der Bearbeitung ein.

Datenrate = Symbolrate * Bits pro Unterkanal(N_{BPSC}) * Anz. der Unterkanäle * Coderate

Datenrate [Mbit/s]	Modulation	Coderate	Codierte Bits pro Unterträger [N_{BPSC}]	Codierte Bits pro OFDM-Symbol [N_{CBPS}]	Daten-Bits pro OFDM-Symbol [N_{DBPS}]
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Symbolrate:

Ist die Rate in der die Symbole erzeugt werden. Bei OFDM ist das 0,25 MSymbole/s

Bits pro Unterkanal (N_{BPSC} = Number Bits Per Sub Carrier):

Bei 64-QAM sind das z. B. 6 Bits

Anzahl der Unterkanäle:

Bei OFDM stehen 48 Unterkanäle für die Datenübertragung zur Verfügung

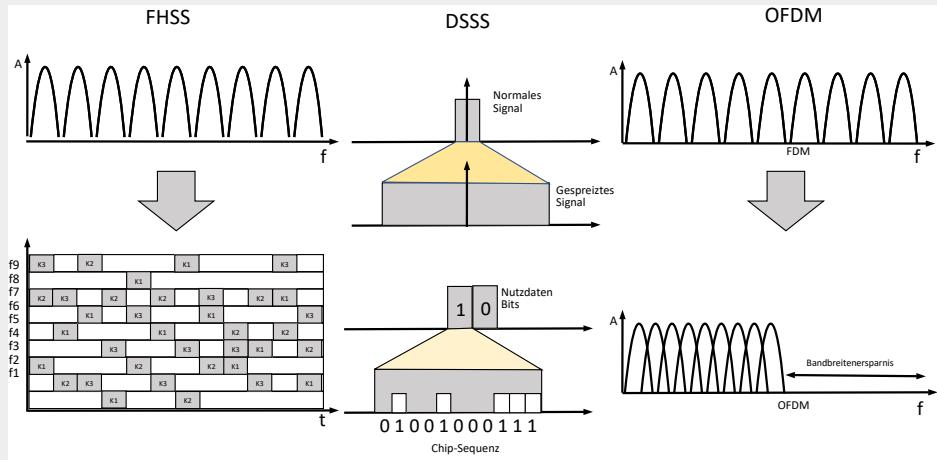
Coderate:

Die Coderate gibt das Verhältnis von Daten-Bits pro Symbol zu codierten Bits pro Symbol an

Beispiel:

Die Datenrate von 48 Mbit/s errechnet sich mit:
0,25MSymbole/s * 6 Bits / Unterkanal * 48 Unterkanäle * 2/3

Vergleich: FHSS / DSSS / OFDM



Der verschwenderische Umgang mit der Bandbreite hat das FHSS- und DSSS-Verfahren auf das Abstellgleis befördert.

- Signalspreizung
- FHSS / DSSS (Rahmenaufbau)
- OFDM-Übertragungsverfahren
 - Sende-Ablauf
 - Empfangs-Ablauf
 - Window-Funktion
 - OFDM-Rahmenaufbau
 - Trainingssequenz
- Vergleich: FHSS, DSSS, OFDM