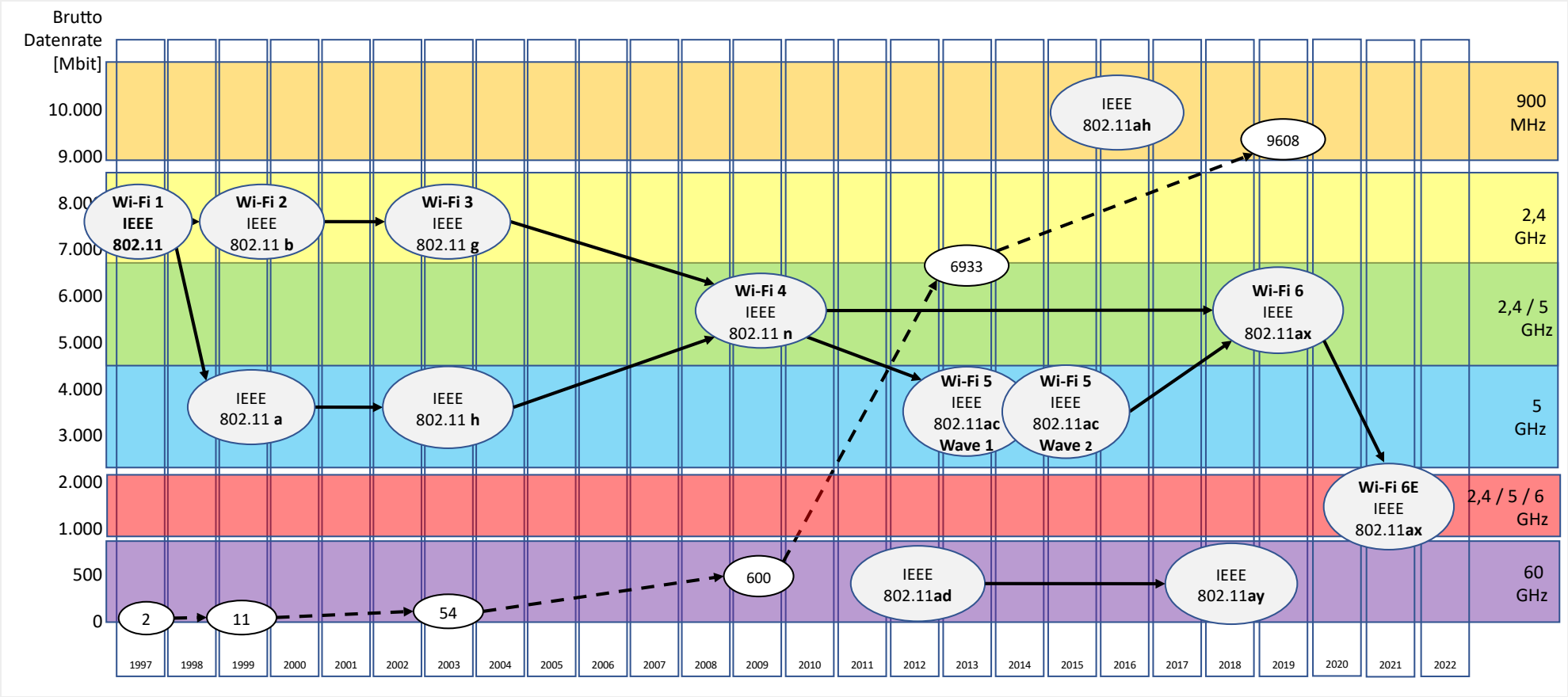


WLAN-Vorlesung

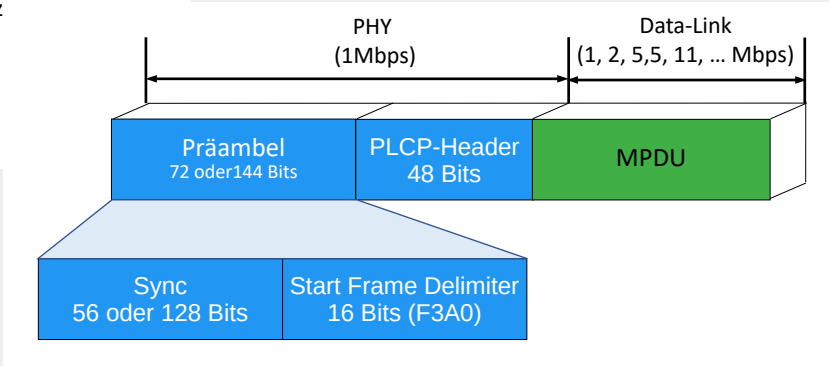
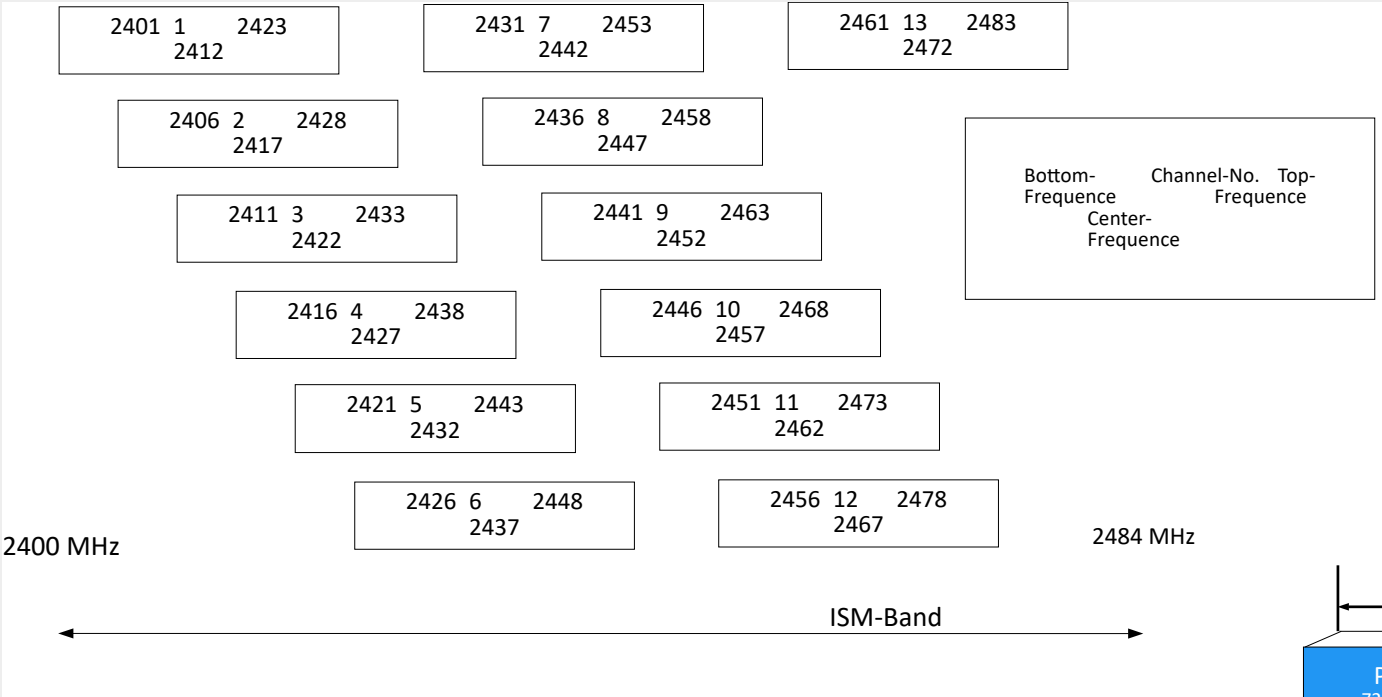
Teil-5

- Übersicht über alle Standards
- Der erste Standard (IEEE-802.11)
- Verbesserungen / Erweiterungen
 - ➔ a/h
 - ➔ b/g
 - ➔ n (HT)
 - ➔ ac (VHT)
 - ➔ ax (HE)
 - ➔ be (EHT)
 - ➔ bn (Ultra High Reliability) 2028

Übersicht IEEE-802.11-Entwicklung



Anfänge



Erste Erweiterungen

2.4GHz-Bereich

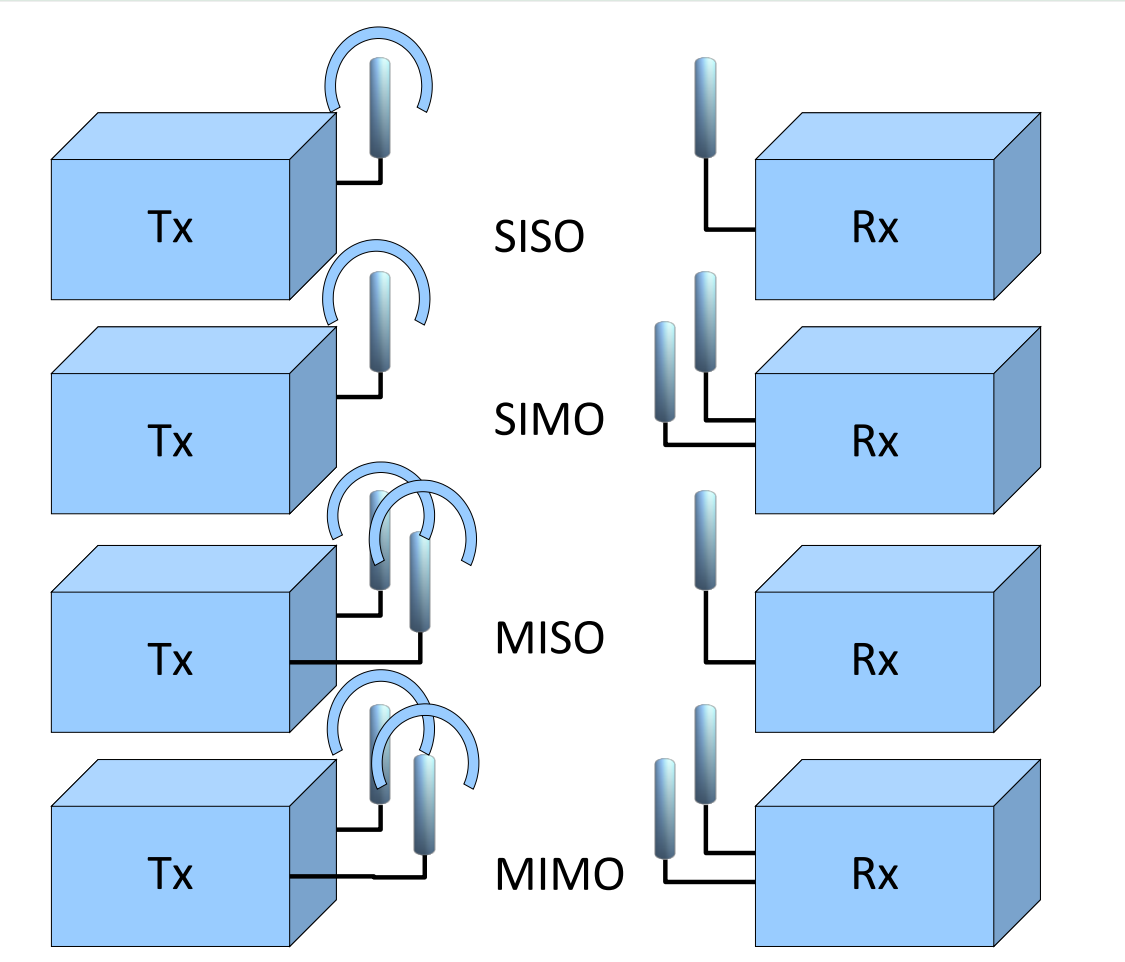
- IEEE802.11b (11Mbps brutto)
+ HR-DSSS , Complementary Code Keying (CCK)

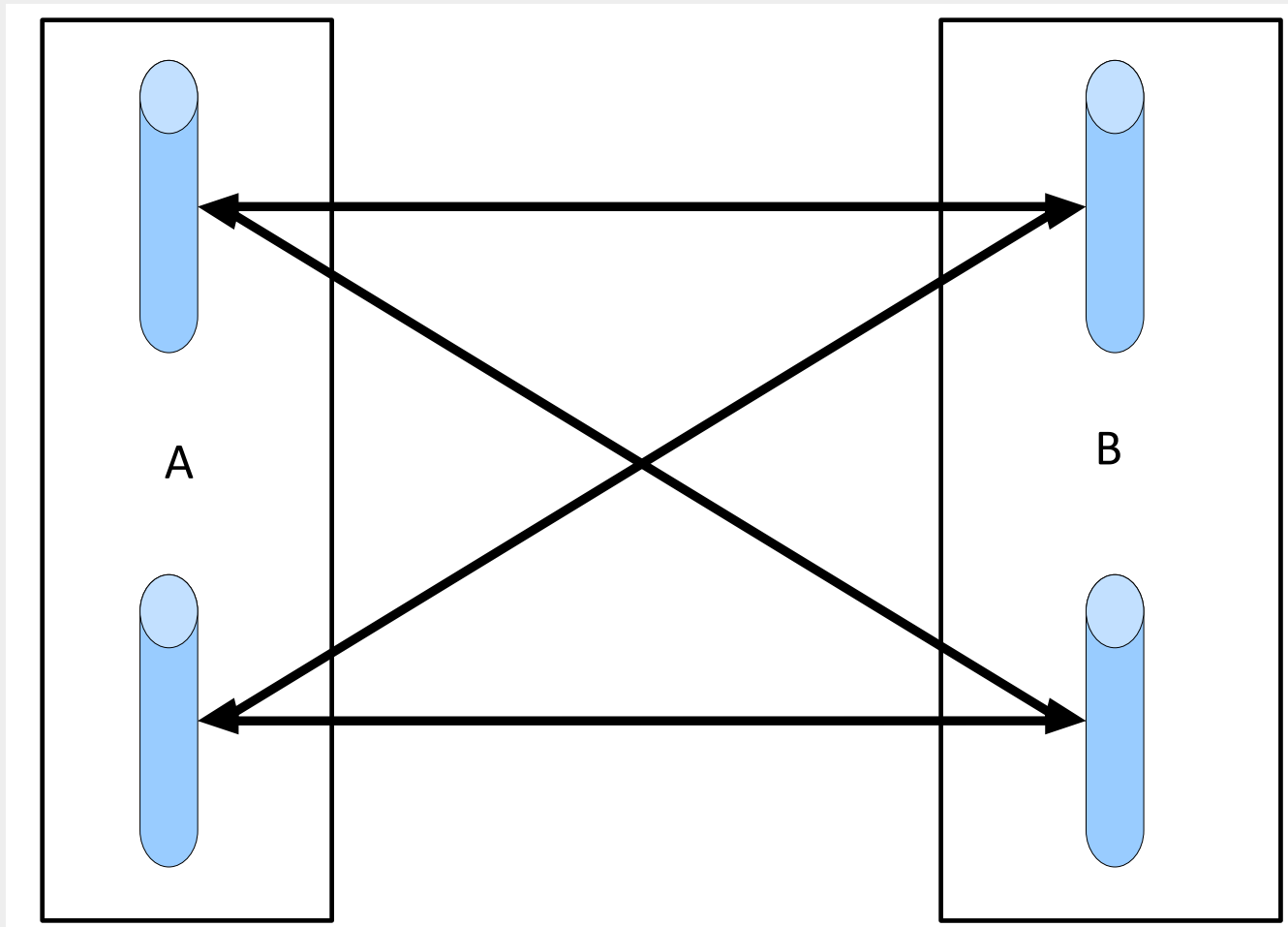
IEEE802.11g (54Mbps brutto)

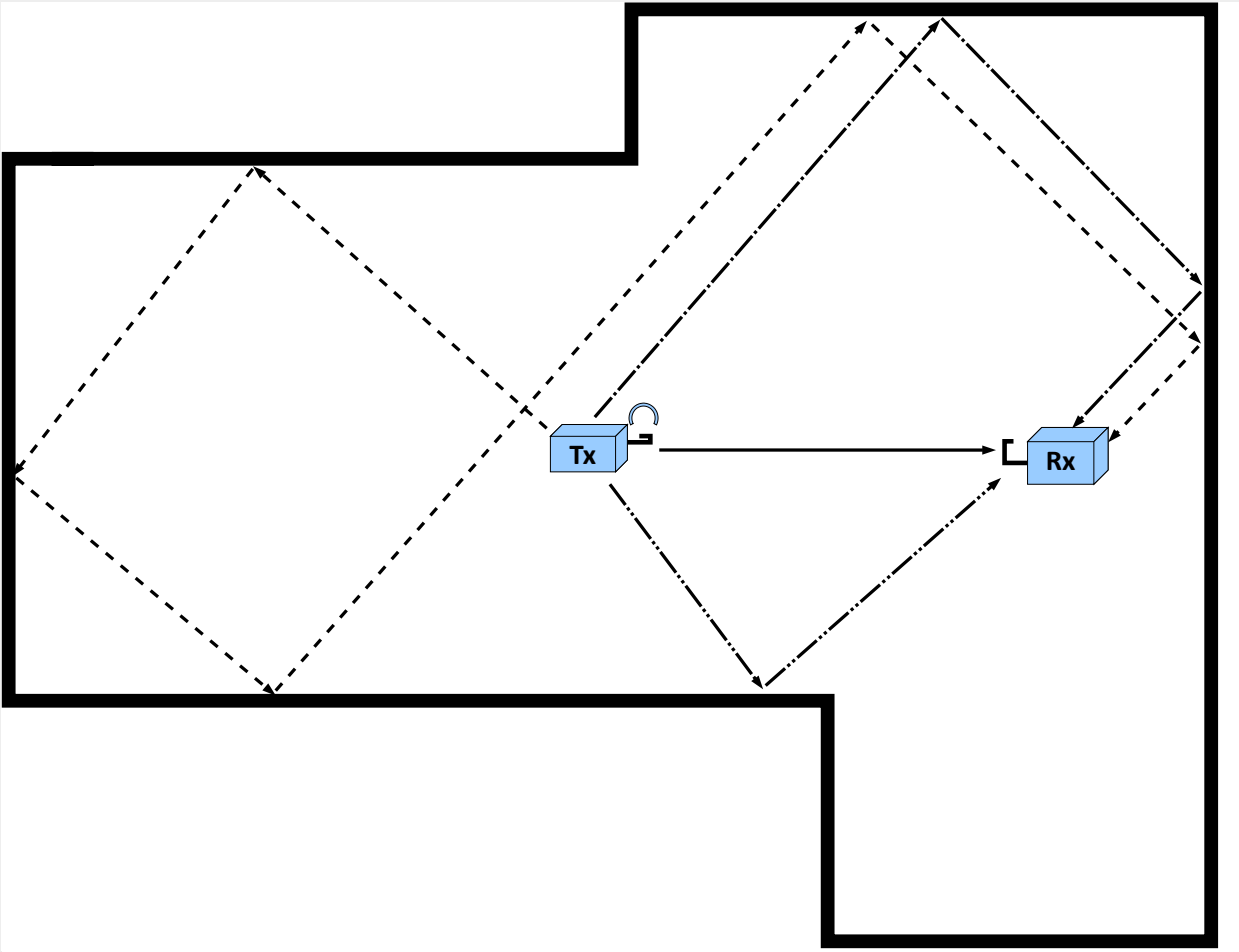
- + OFDM → Protection Mechanismus

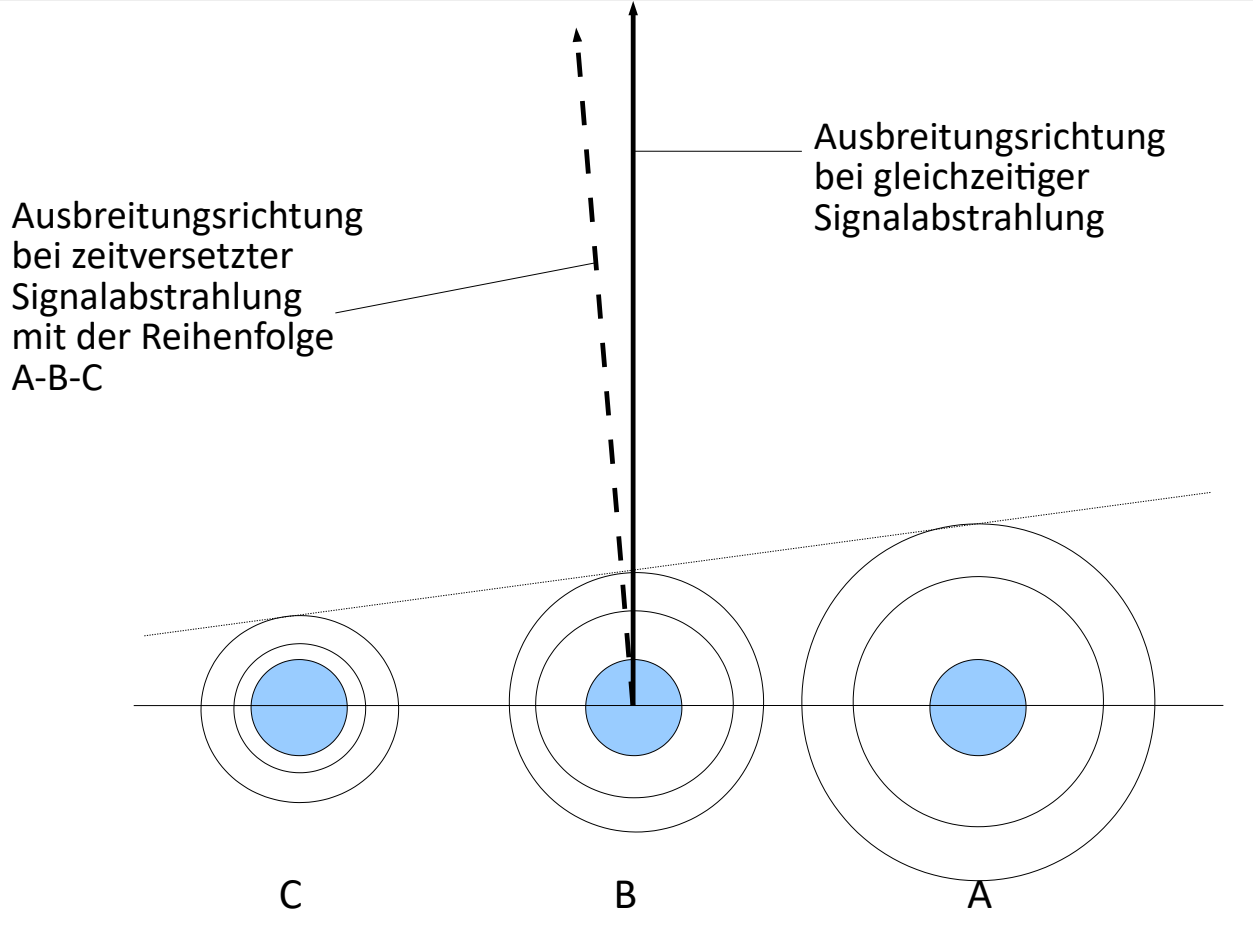
5GHz-Bereich

- IEEE802.11a (11Mbps brutto)
+ 5GHz-Band
- IEEE802.11.h (54Mbps brutto)
- 5GHz-Band
+ Dynamic Frequency Selection (DFS)
+ Transmission Power Control (TPC)

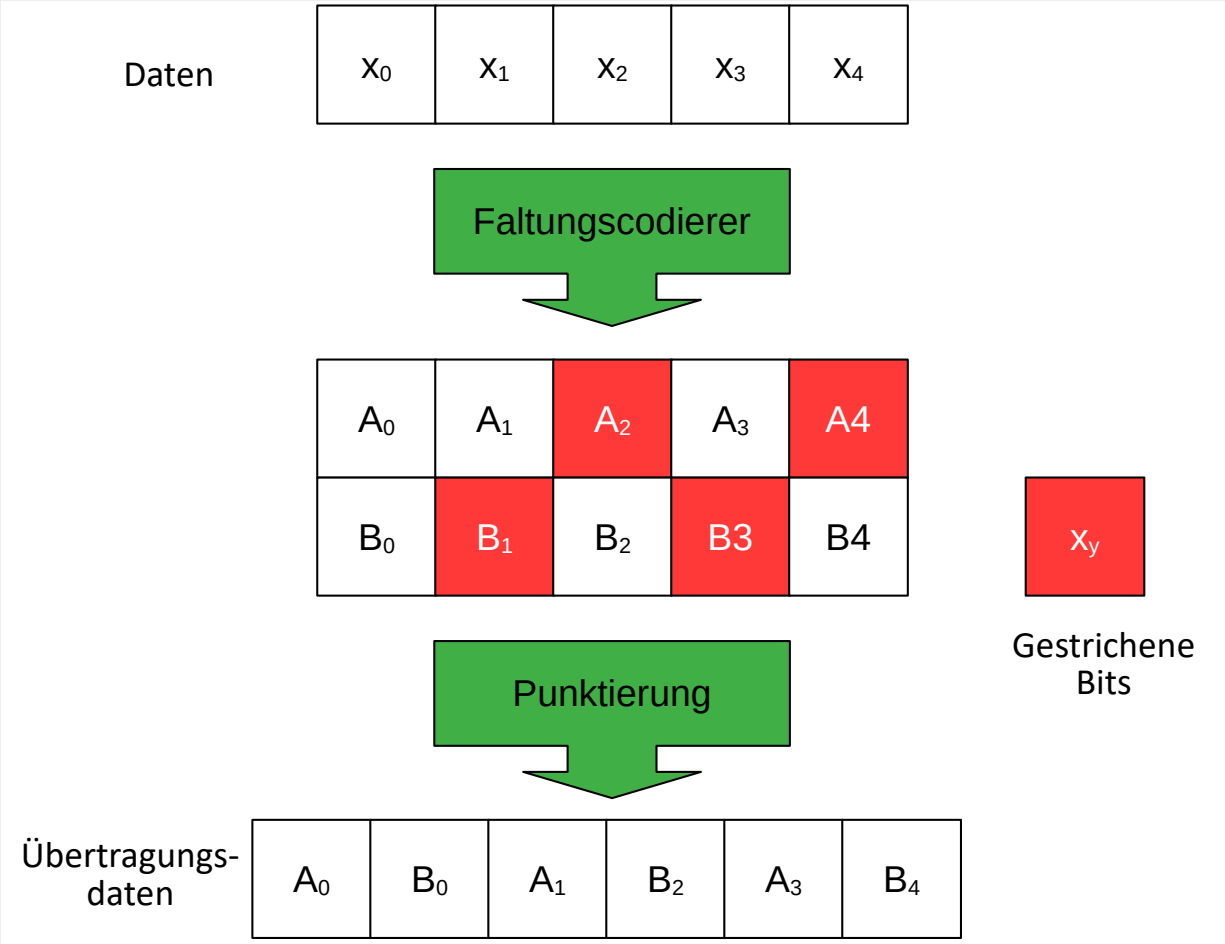








Punktierung mit Coderate 5/6



Low-Density Parity-Check

HT-OFDM bietet anstelle der
Bearbeitung mit Faltungscodierern
den Low-Density-Parity-Check

Dabei werden mit einer linearen
Blockcodierung Parity-Bits hinzugefügt.

Bei 802.11n gibt es 3 Blockgrößen
648
1296
1944

Siehe auch rechte Tabelle

Coding-Rate [R]	LDPC Informationsblock Länge [Bits]	LDPC Codewortblock Länge [Bits]
1/2	972	1944
1/2	648	1296
1/2	324	648
2/3	1296	1944
2/3	864	1296
2/3	432	648
3/4	1458	1944
3/4	972	1296
3/4	486	648
5/6	1620	1944
5/6	1080	1296
5/6	540	648

Optimierungsmaßnahmen bei 802.11n

	Modulat ion	Code- Rate	Datenrate [MBit/s]				
			OFDM	HT-OFDM			
			48 Unterträger	52 Unterträger GI = 800ns	52 Unterträger GI = 400ns	108 Unterträger GI = 800ns	108 Unterträger GI=400ns
48 → 52 Unterträger	BPSK	1/2	6	6,5	7,2	13,5	15
FEC-Coderate 5/6	QPSK	1/2	12	13	14,4	27	30
Kürzere Guardintervalle	QPSK	3/4	18	19,5	21,7	40,5	45
Kanalbreite 20MHz → 40MHz	16-QAM	1/2	24	26	28,9	54	60
4 Spacial Streams	16-QAM	3/4	36	39	43,3	81	90
	64-QAM	2/3	48	52	57,8	108	120
	64-QAM	3/4	54	58,5	65	121,5	135
	64-QAM	5/6	-	65	72,2	135	150

Modulation Coding Scheme (MCS)

MCS	Modulation	Bits/ Unterkanal (N _{BPCS})	Bits OFDM-Symbol (N _{CBPS})	FEC-Code- Rate (R)	Datenbits/ OFDM-Symbol (N _{DBPS})	Datenrate [MBit/s]	
						GI=800ns	GI=400ns (optional)
0	BPSK	1	52	1/2	26	6,5	7,2
1	QPSK	2	104	1/2	52	13	14,4
2	QPSK	2	104	3/4	78	19,5	21,7
3	16-QAM	4	208	1/2	104	26	27,9
4	16-QAM	4	208	3/4	156	39	43,3
5	64-QAM	6	312	2/3	208	52	57,8
6	64-QAM	6	312	3/4	234	58,5	65
7	64-QAM	6	312	5/6	260	65	72,2

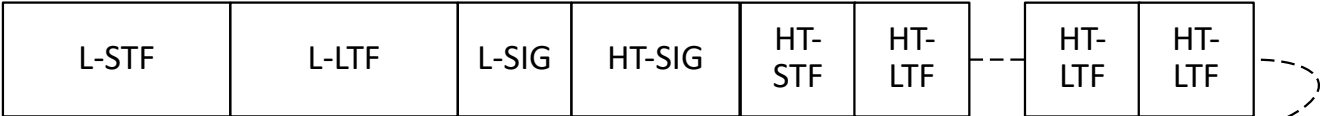
Spektrale Effizienz

PHY	Spektrale Effizienz [Mbps/MHz]
802.11 (FHSS / DSSS)	0,09
802.11b	0,5
802.11a/g	2,7
802.11n (20MHz, MCS15)	6,5
802.11n (40MHz, MCS15)	6,75
802.11ax (8fach MIMO)	30

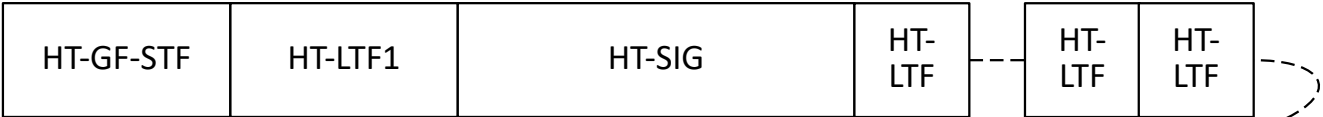
802.11n-Frame-Formate



Non-HT-PPDU-Frame-Format



HT-Mixed-PPDU-Frame-Format



HT-Greenfield-PPDU-Frame-Format



The diagram illustrates the structure of the HT-LTF (High Throughput Long Training Field) and its associated fields. The top part shows the overall frame layout, and the bottom part provides a detailed view of the HT-SIG fields.

Overall Frame Layout:

- HT-GF-STF
- HT-LTF1
- HT-SIG
- HT-LTF
- Daten (Data)

The Daten field is further divided into:

- Service
- PSDU
- Tail-Bits
- Pad-Bits

HT-SIG Fields:

The HT-SIG fields are divided into two parts: HT-SIG₁ and HT-SIG₂.

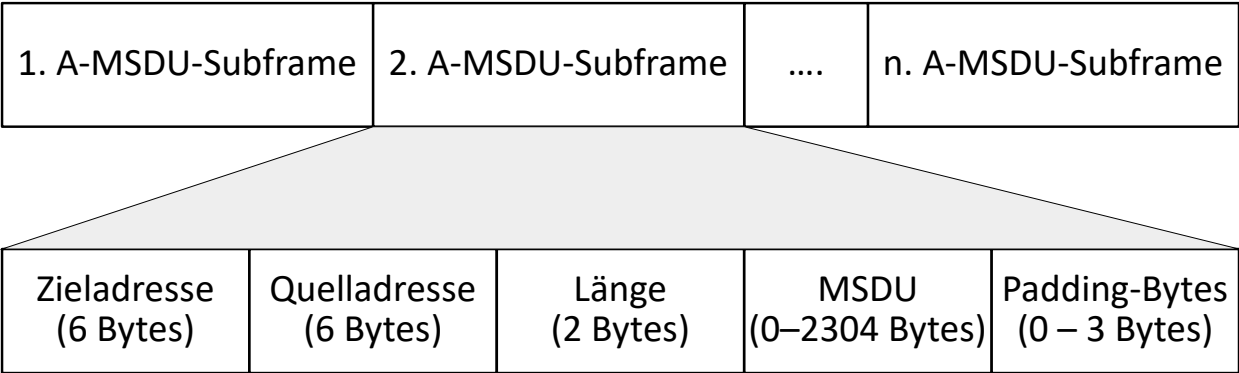
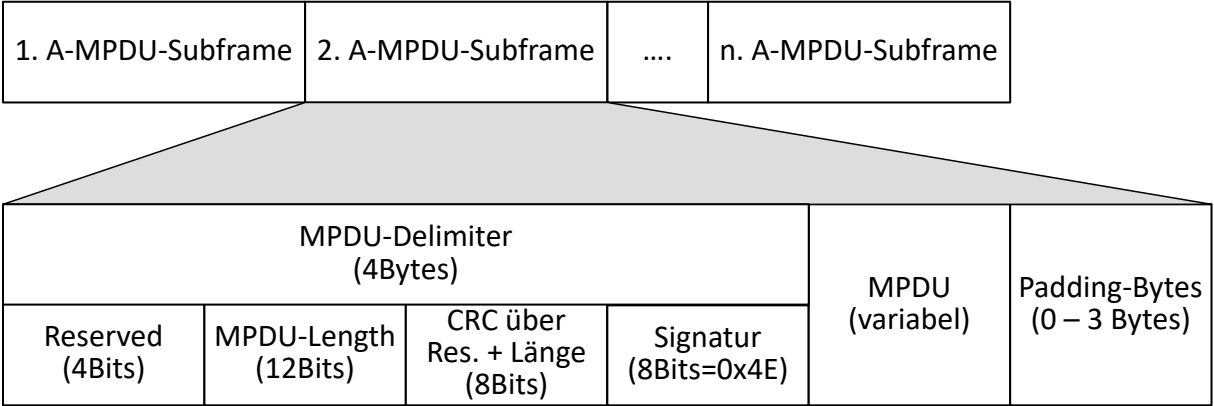
HT-SIG₁ Fields:

- Modulation and Coding Scheme (MCS) (bits 0-6)
- CBW (20/40) (bit 7)
- HT-Length (bits 8-23)

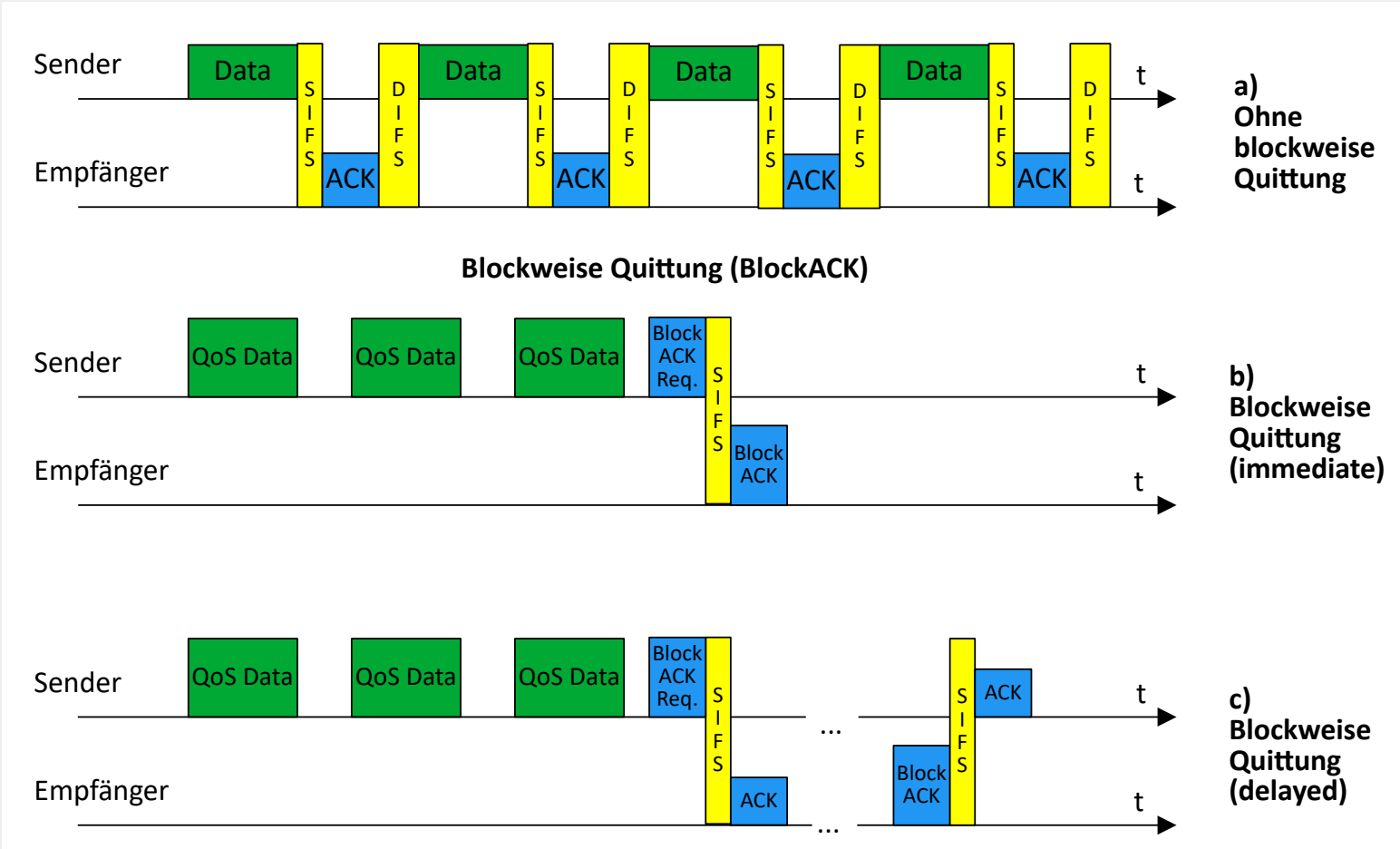
HT-SIG₂ Fields:

- Smoothing (bit 0)
- Not Sounding (bit 1)
- Reserved (bit 2)
- Aggregation (bit 3)
- STBC (bit 4)
- FEC-Coding (bit 5)
- Short GI (bit 6)
- Number of extension Spatial Stream (bits 7-9)
- CRC (bits 10-17)
- Tail-Bits (bits 18-23)

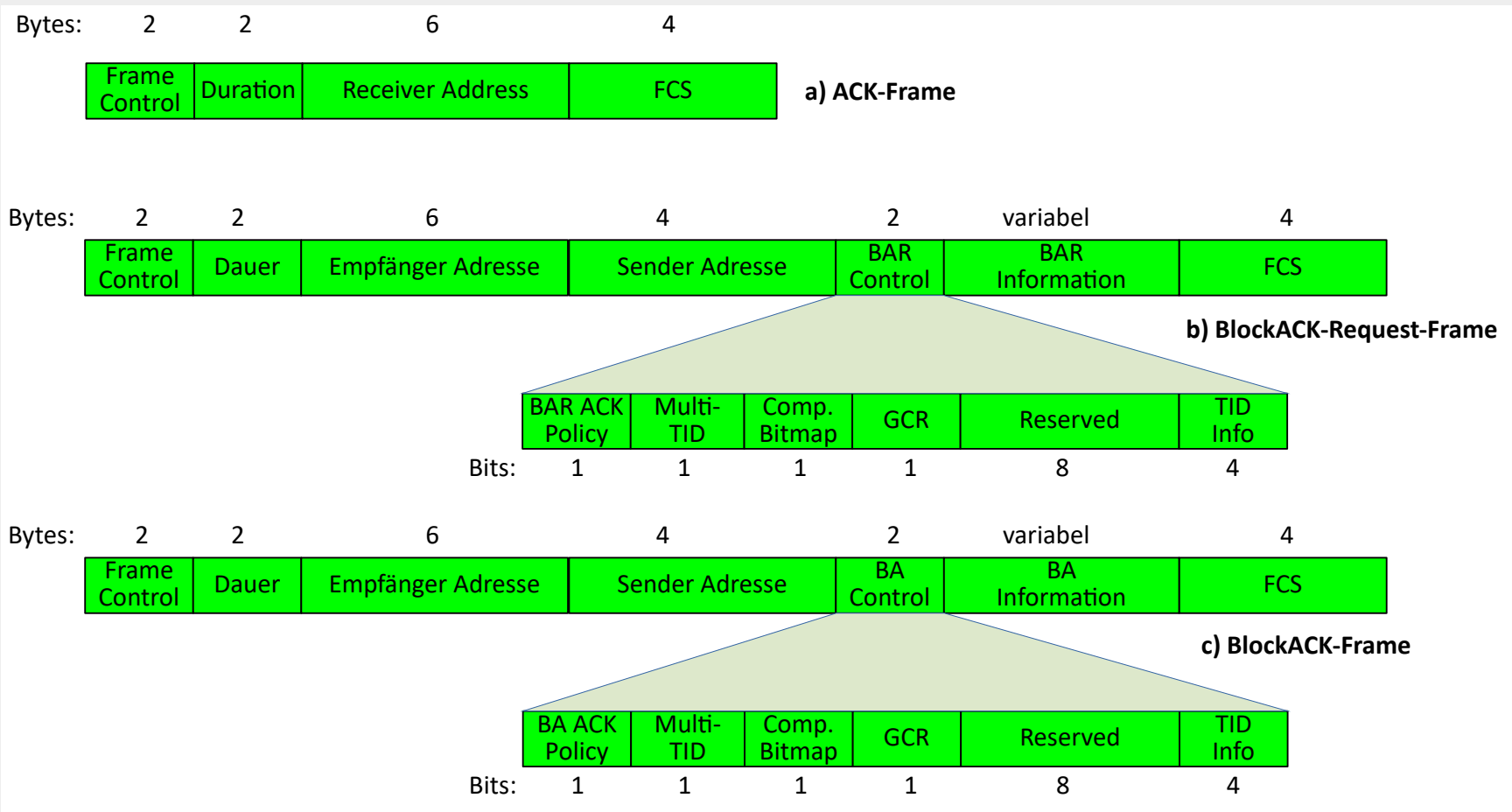
Aggregationsverfahren (A-MPDU / A-MSDU)



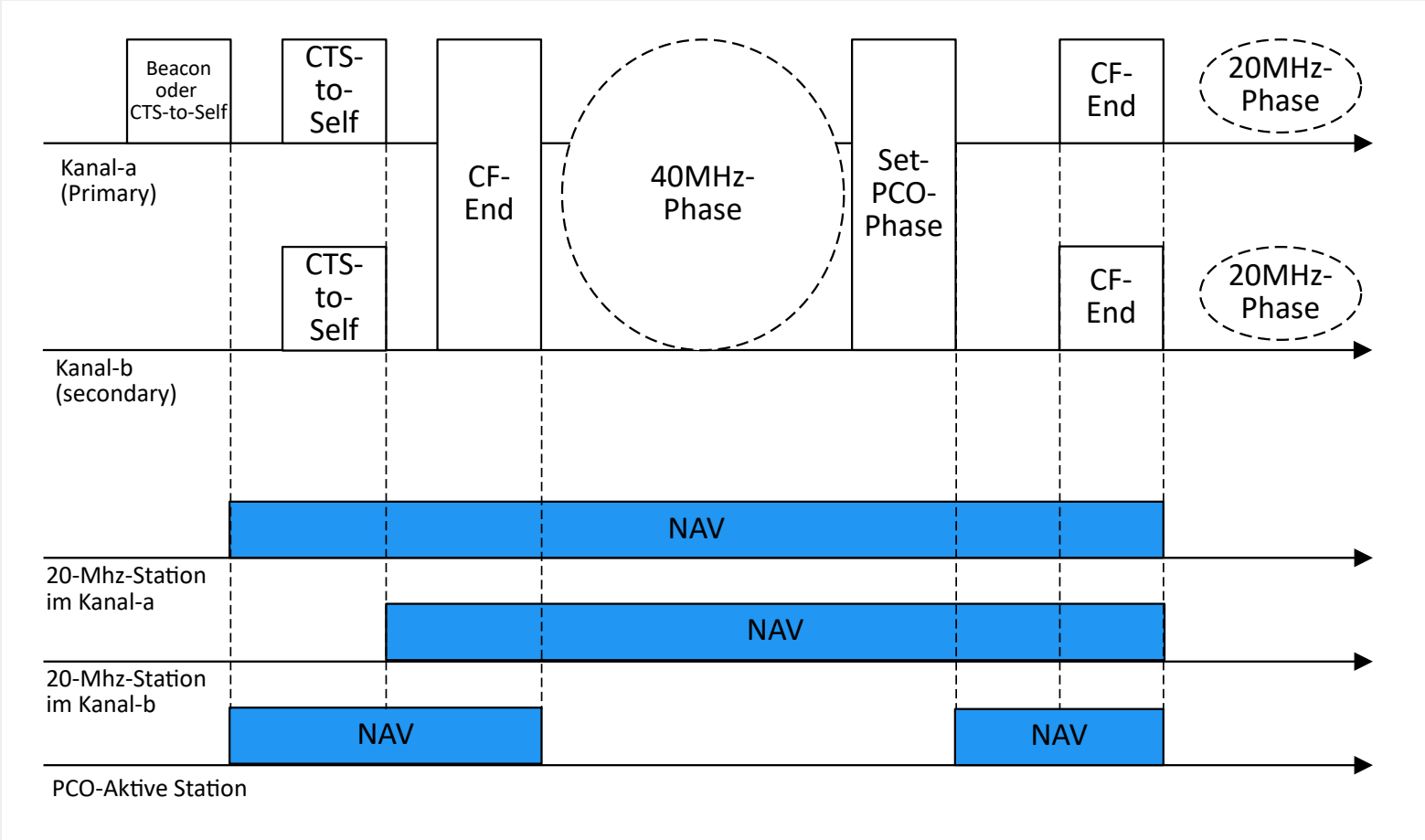
Block-Acknowledgement



Aufbau von ACK und BlockACK



Phased Coexistence



Power-Save-Modus

Bei einer Stromversorgung über PoE kann es zu Einschränkungen kommen:

- Bei IEEE802.3af (PoE mit 12,95W) darf nur eine Antenne betrieben werden.
- Bei IEEE802.3at (PoE+ mit 25,5W) können mehrzügige APs betrieben werden

IEEE802.11ac

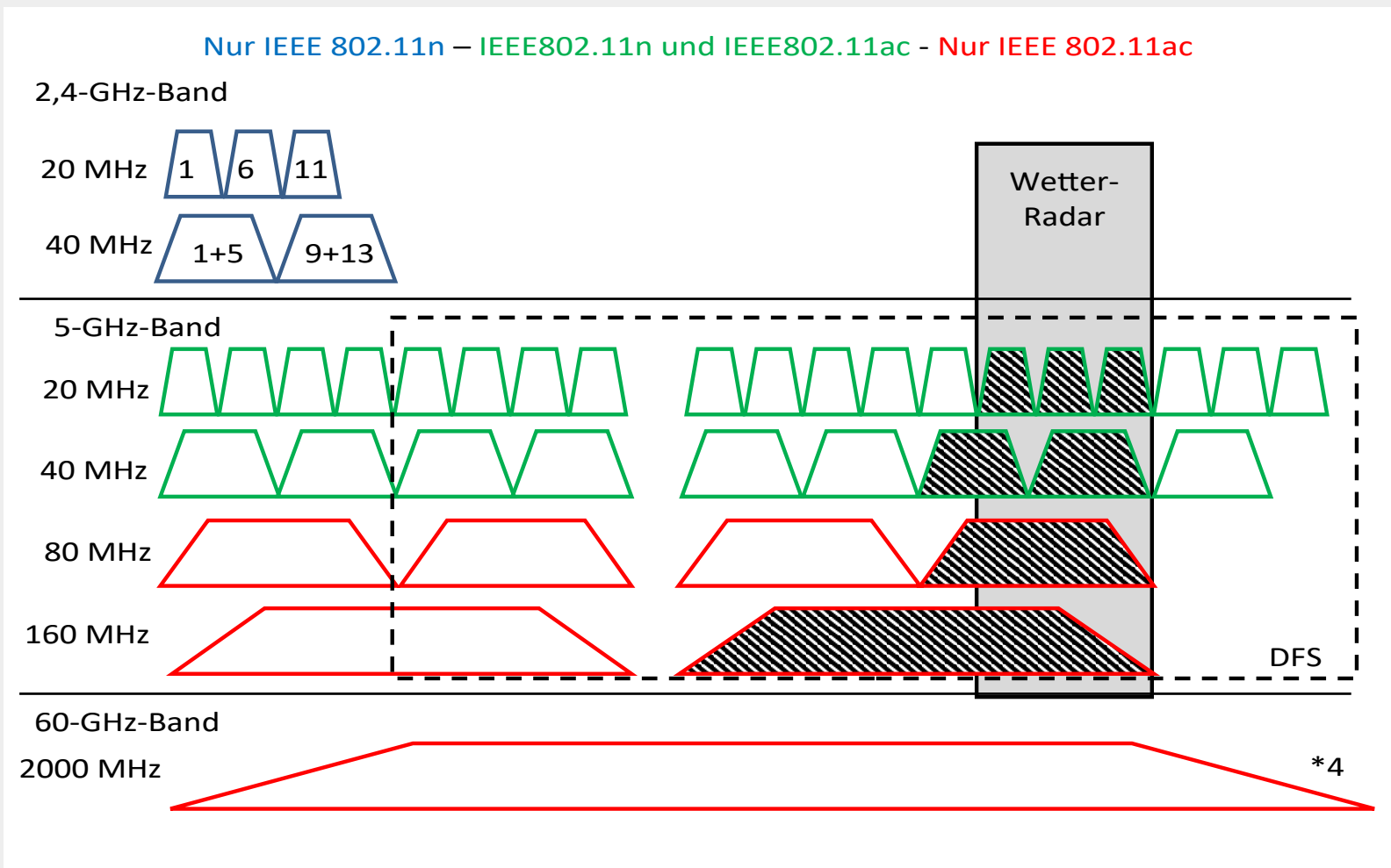
Dieser Standard arbeitet **nur im 5GHz-Bereich**

Die entsprechenden Parametern werden gekennzeichnet indem **VHT** (Very High Throughput) vorangestellt wird

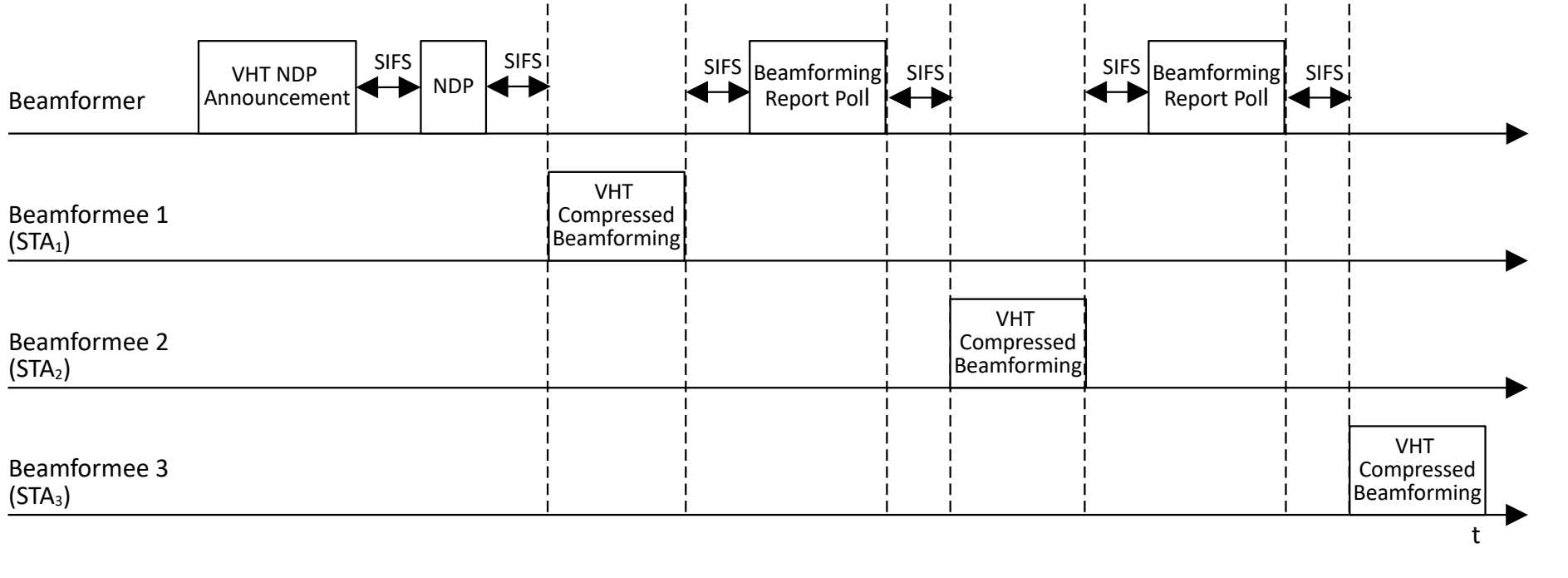
Neuerungen:

- Kanalbandbreiten bis 160MHz
- Multi-User MIMO (MU-MIMO)
- 256-QAM-Modulation
- 2 neue MCSs
- Erhöhung der Antennenanzahl was bis zu 8 Spatial Streams ermöglicht

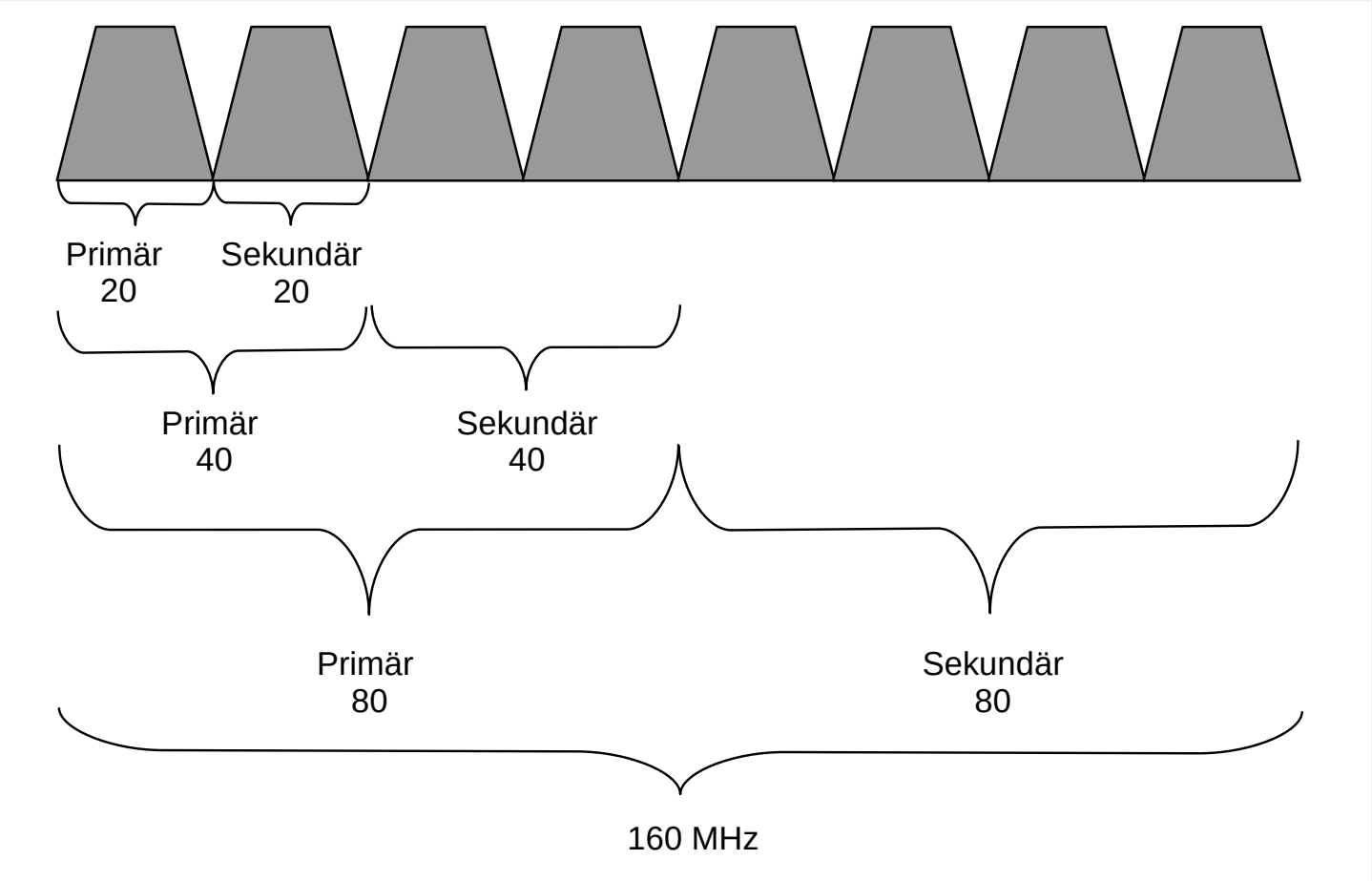
802.11ac Bandbreiten



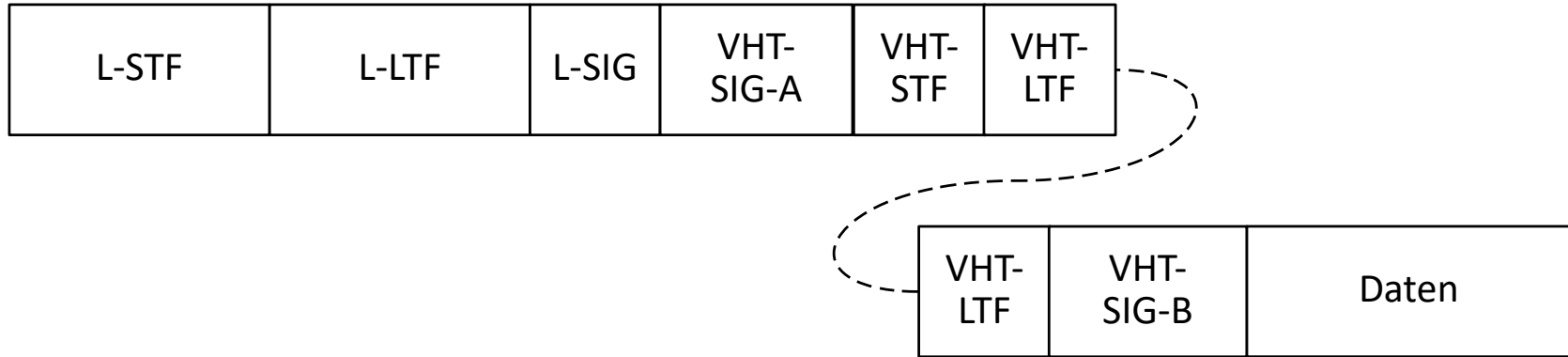
VHT-Beamforming



Erweiterte Kanalbandbreiten



IEEE-802.11ac-Frame-Aufbau



Inhalt

- Übersicht über alle Standards
- Der erste Standard (IEEE-802.11)
- Verbesserungen / Erweiterungen
 - a/h
 - b/g
 - n (HT)
 - von SISO zu MIMO
 - Beamforming
 - Spatial Streams
 - MCSs
 - Aggregationsverfahren
 - Phased Coexistence
 - Vergrößerung der Bandbreite
 - ac (VHT)
 - Kanalbandbreiten bis 160MHz
 - Multi-User MIMO (MU-MIMO) → VHT-Beamforming
 - 256-QAM-Modulation
 - 2 neue MCSs
 - Bis zu 8 Spatial Streams

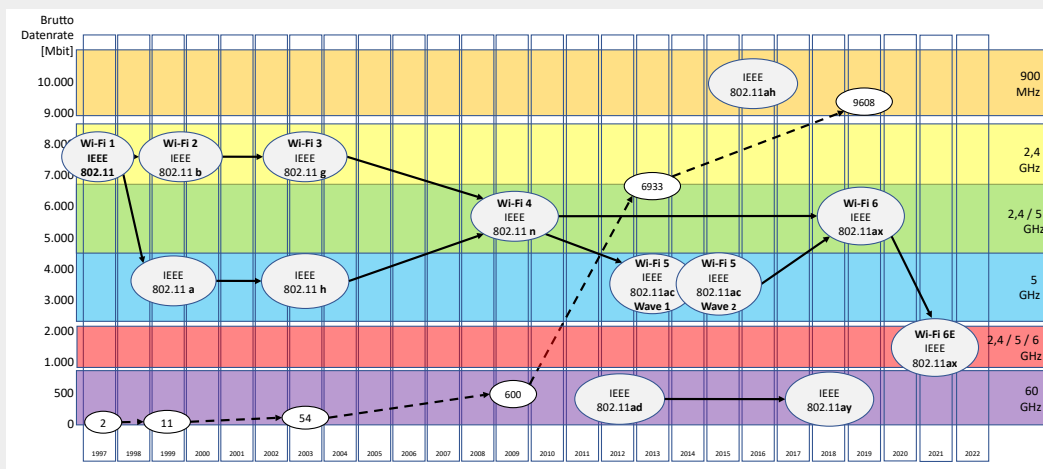
WLAN-Vorlesung Teil-5

- Übersicht über alle Standards
- Der erste Standard (IEEE-802.11)
- Verbesserungen / Erweiterungen
 - a/h
 - b/g
 - n (HT)
 - ac (VHT)
 - ax (HE)
 - be (EHT)
 - bn (Ultra High Reliability) 2028

Um bei den Erweiterungen 802.11 und 802.11ac zu kennzeichnen, dass ein erhöhter Datendurchsatz erreicht wird, wurden die Variablen mit einem Präfix gekennzeichnet.

HT	= High Throughput
VHT	= Very High Throughput
HE	= High Efficiency (.ax)
EHT	= Extremely High Throughput (Der Standard ist für Mitte 2024 geplant)
UHR	= Ultra High Reliability (Der Standard ist für 2028 geplant)

Übersicht IEEE-802.11-Entwicklung



In der Folie ist die Entwicklung der WLANS vom ersten Standard bis zur heutigen Ausprägung dargestellt.

Die gestrichelte Linie zeigt die Brutto-Datenrate an die mit den jeweiligen Erweiterungen ermöglicht wurden.

Zusätzlich ist zu sehen in welchen Bändern die Standards agieren.

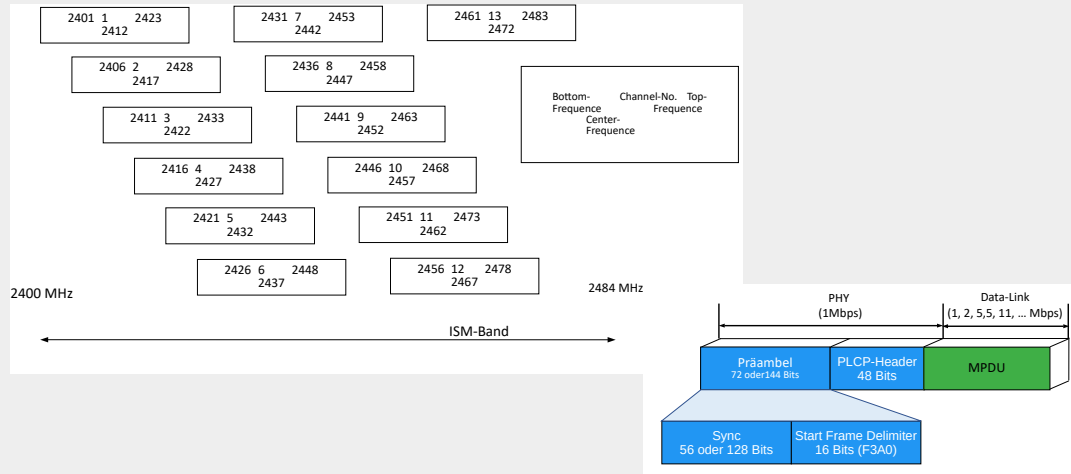
Bei der Namensgebung wurden die Standard-Namen vereinfacht. Nachdem mehrere Innovationszyklen die Normen etwas unübersichtlich gemacht hatten, einigte man sich im Jahre 2018 auf eine Vereinfachung bei der die Generationen von WLAN-Standards durchnummeriert werden. So wurde aus dem ersten Standard (IEEE802.11) die Bezeichnung Wi-Fi-1, bis man für IEEE802.11ax bei Wi-Fi-6E ankommt.

Die Endung 6E war fällig geworden, nachdem das 6GHz-Banz für WLANS freigegeben wurde. Da keine neue Funktionalität jedoch weitere möglichen Unterträger zur Verfügung standen wurde Wi-Fi-6 zu Wi-Fi-6E.

Wi-Fi-7 steht vor der Verabschiedung. Die maximale Brutto Datenübertragungsrate soll bei 46Gbps liegen (netto ca. 30Gbps) (u. a. Parallelbetrieb in verschiedenen Frequenzbändern)

Ab ca. 2/3 der maximalen Datenübertragungsrate ist die Netto Datenübertragungsrate OK.

Anfänge



Der erste Standard war im 2,4GHz-Band angesiedelt und konnte dort 3 überschneidungsfreie Bänder nutzen.

Die ersten Erweiterungen boten bei IEEE802.11b Datenraten von maximal 11MBit/s

Wichtig ist an der Stelle nochmals zu erkennen, dass die Datenraten für Header und Datenteil unterschiedlich sind.

Das bedeutet, dass es eine Brutto-Datenübertragungsrate und eine Netto Datenübertragungsrate gibt.

Hersteller geben gerne die Brutto-Datenübertragungsrate an, mit welcher die Daten übertragen werden. Das ist, an der gegebenen Stelle, die technisch maximal realisierbare Datenübertragungsrate.

Allerdings werden die Header mit einer robusteren Modulation und damit mit einer geringeren Datenübertragungsrate übertragen.

Header und Datenteil werden also mit unterschiedlichen Datenübertragungsraten übertragen, die in Summe die niedrigere Netto-Datenübertragungsrate ergeben.

Erste Erweiterungen

2.4GHz-Bereich

- IEEE802.11b (11Mbps brutto)
 - + HR-DSSS , Complementary Code Keying (CCK)
- IEEE802.11g (54Mbps brutto)
 - + OFDM → Protection Mechanismus

5GHz-Bereich

- IEEE802.11a (11Mbps brutto)
 - + 5GHz-Band
- IEEE802.11h (54Mbps brutto)
 - 5GHz-Band
 - + Dynamic Frequency Selection (DFS)
 - + Transmission Power Control (TPC)

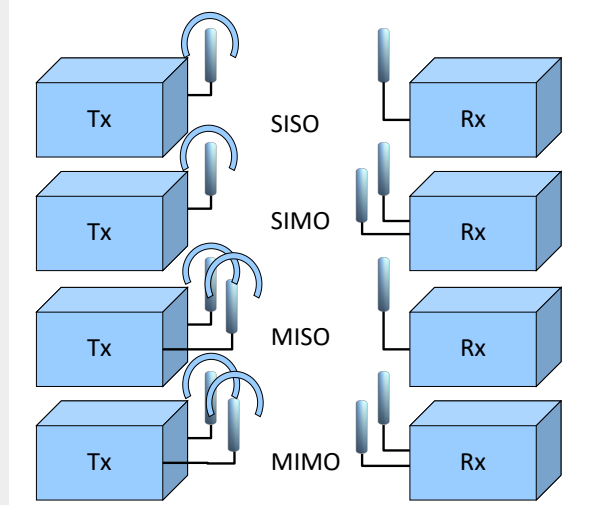
Erste Erweiterungen waren mit anderen Modulationsverfahren erzielt worden und in weiteren Frequenzbändern angesiedelt.

IEEE802.11a hat sich nicht am Markt etabliert, weil die Nutzung des 5GHz-Bandes als Sekundäruser nicht automatisiert war.

Erst durch Einführung von DFS und TPC mit IEEE802.11h war der Betrieb automatisiert und der 5GHz-Bereich konnte genutzt werden.

OFDM hat sich als Modulationsverfahren durchgesetzt.

Von SISO zu MIMO



Als wichtige Evolutionsstufe hat sich der IEEE802.11n erwiesen, der einige neue Eigenschaften mitbrachte.

Eine davon ist die Ausnutzung von mehreren Antennen für unterschiedliche Spatial Streams (SS).

Dabei handelt es sich um ein so genanntes Raum-Zeit-Multiplex-Verfahren.

Die Verfahren betrachten den Eingang und den Ausgang des Funkkanals

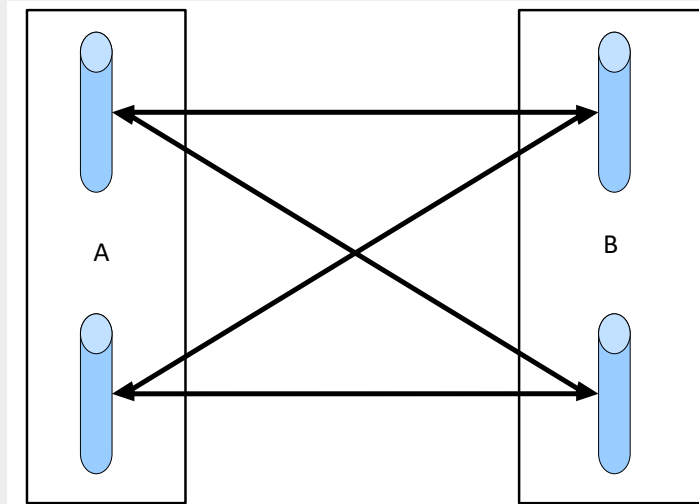
S = Single
M = Multiple
I = Input
O = Output

Die Abkürzung bezieht sich auf den Übertragungskanal, also die Funkübertragung

Je nach verwendeter Antennenanzahl gibt es eine unterschiedliche Anzahl an Spatial Streams.

In der maximalen Ausbaustufe spricht man von MIMO (Multiple Input Multiple Output)

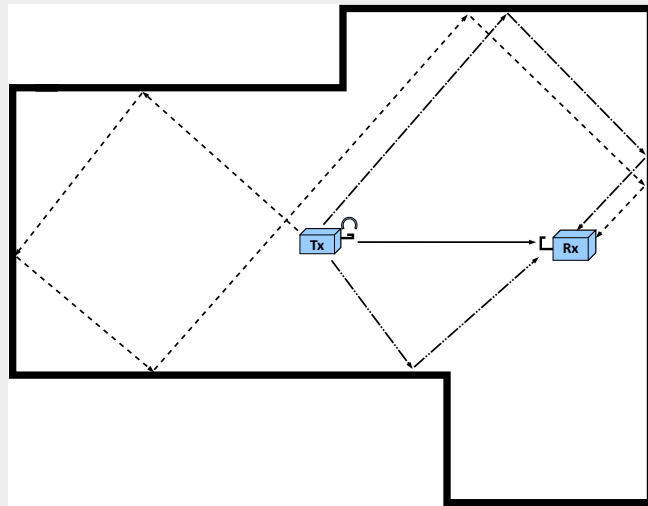
MIMO



Über mehrere Antennen können auch unterschiedliche Datenströme realisiert werden die zur Erhöhung der Datenrate genutzt werden können.

Je nach Sender kann es 1, 2, 4 oder 8 Spatial Streams geben. Bei 802.11n sind maximal 4 und bei 802.11ac sind maximal 8 SS spezifiziert, jedoch selten realisiert.

Mehrwegeausbreitung (Spacial Streams)

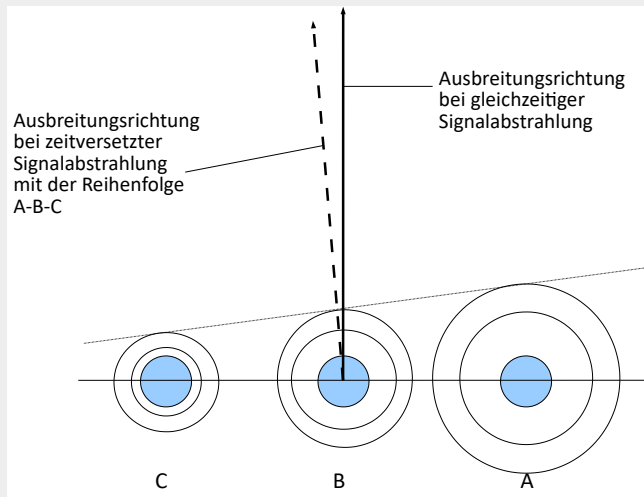


War es bisher ein Problem mit der Mehrwegeausbreitung von Signalen zurechtzukommen, können die unterschiedlichen Laufzeiten genutzt werden um eine erhöhte Resistenz gegen Interferenzen zu erzielen.

Dazu wird beim Space-Time-Block-Coding (STBC) mit aufeinander folgenden Raum-Zeit-Codes aufeinanderfolgende Symbole nach bestimmten Regeln auf die Sendeantennen verteilt.

Diese Technik kann z. B. bei unsymmetrischen Systemen angewandt werden, bei denen der Sender mehr Antennen als der Empfänger hat. Ein Beispiel hierzu ist ein AP mit mehreren Antenne und ein Smartphone mit nur einer Antenne.

Beamforming



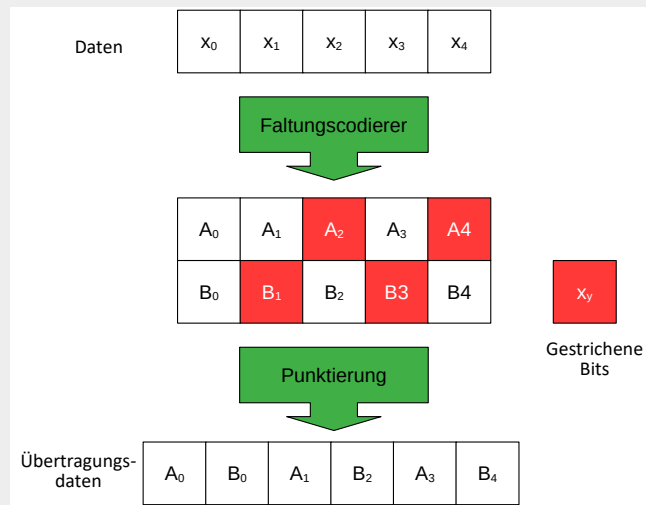
Um die Signalstärke beim Empfang zu erhöhen und damit das SNR zu verbessern, kann die Ausrichtung der Antenne durchgeführt werden.

Dazu sind mehrere Antennen erforderlich, die einzeln angesteuert werden können.

Um bewegte Stationen zu verfolgen, sind ständige Überprüfungen erforderlich. Dazu dienen spezielle „Sounding-Tests“

Diese Funktion kann natürlich nur für Unicasts angewandt werden!

Punktierung mit Coderate 5/6



Wurde zu viel redundante Information hinzugefügt, kann durch Punktieren ein Teil der redundanten Information entfernt werden.

Bei IEEE802.11n wurde eine Optimierung in Form der Coderate $r = 5/6$ eingeführt.

Low-Density Parity-Check

HT-OFDM bietet anstelle der Bearbeitung mit Faltungscodierern den Low-Density-Parity-Check

Dabei werden mit einer linearen Blockcodierung Parity-Bits hinzugefügt.

Bei 802.11n gibt es 3 Blockgrößen
648
1296
1944

Siehe auch rechte Tabelle

Coding-Rate [R]	LDPC Informationsblock Länge [Bits]	LDPC Codewortblock Länge [Bits]
1/2	972	1944
1/2	648	1296
1/2	324	648
2/3	1296	1944
2/3	864	1296
2/3	432	648
3/4	1458	1944
3/4	972	1296
3/4	486	648
5/6	1620	1944
5/6	1080	1296
5/6	540	648

Mit IEEE802.11n kam noch ein **optionales** Verfahren, der Low Density Parity Check (LDPC), um die Parity-Information einzufügen hinzu.

Dabei werden mit drei unterschiedlichen Blockgrößen Parity-Bits eingefügt.

Damit lassen sich unterschiedliche Coderaten erzeugen.

LDPC wird unter anderem auch bei DVB-S2, IEEE802.16e (WIMAX) und IEEE802.3an (Ethernet) angewandt.

Optimierungsmaßnahmen bei 802.11n

	Modulation	Code-Rate	Datenrate [MBit/s]				
			OFDM	HT-OFDM			
			48 Unterträger	52 Unterträger GI = 800ns	52 Unterträger GI = 400ns	108 Unterträger GI = 800ns	108 Unterträger GI=400ns
48 → 52 Unterträger	BPSK	1/2	6	6,5	7,2	13,5	15
FEC-Coderate 5/6	QPSK	1/2	12	13	14,4	27	30
Kürzere Guardintervalle	QPSK	3/4	18	19,5	21,7	40,5	45
Kanalbreite 20MHz → 40MHz	16-QAM	1/2	24	26	28,9	54	60
4 Spatial Streams	16-QAM	3/4	36	39	43,3	81	90
	64-QAM	2/3	48	52	57,8	108	120
	64-QAM	3/4	54	58,5	65	121,5	135
	64-QAM	5/6	-	65	72,2	135	150

Als Folge von vielen Neuerungen wurde die Datenrate stark erhöht.

Wichtigste Änderungen:

- Erhöhung der Anzahl der Unterträger
- Optimierte Coderate bei der FEC
- Kürzere Guard-Intervalle
- Breitere Kanäle 20MHz → 40MHz

Modulation Coding Scheme (MCS)

MCS	Modulation	Bits/ Unterkanal (N_{BPSK})	Bits OFDM- Symbol (N_{CBPS})	FEC-Code- Rate (R)	Datenbits/ OFDM-Symbol (N_{DBPS})	Datenrate [MBit/s]	
						GI=800ns	GI=400ns (optional)
0	BPSK	1	52	1/2	26	6,5	7,2
1	QPSK	2	104	1/2	52	13	14,4
2	QPSK	2	104	3/4	78	19,5	21,7
3	16-QAM	4	208	1/2	104	26	27,9
4	16-QAM	4	208	3/4	156	39	43,3
5	64-QAM	6	312	2/3	208	52	57,8
6	64-QAM	6	312	3/4	234	58,5	65
7	64-QAM	6	312	5/6	260	65	72,2

Mit Einführung der Modulation und Coding Schemes (MCS) werden die möglichen Datenraten ausgewiesen.

Der obige Ausschnitt aus einem MCS zeigt die Zusammenhänge von

- Modulation
- Bits pro Unterkanal
- Code-Rate

Daraus ergeben sich die Datenbits eines OFDM-Symbols und letztendlich die Datenrate (Je nach Größe des Guard-Intervalls (GI)).

IEEE802.11n hat 77MCSs.

Je nach Kanalqualität wird der verwendete MCS angepasst.

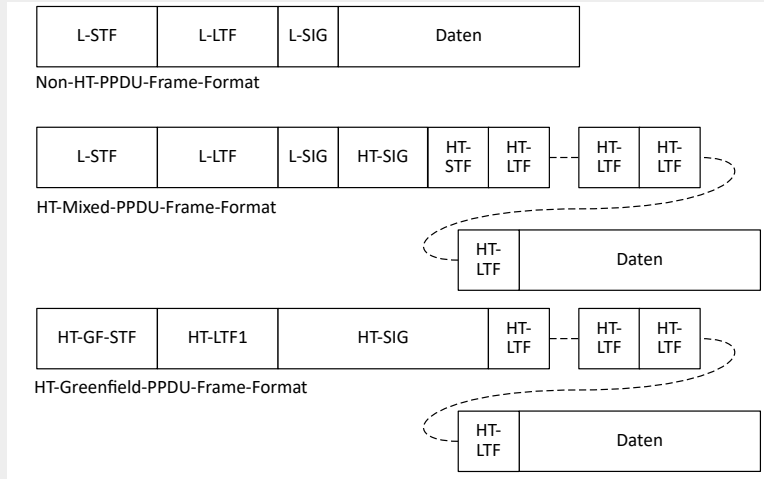
Spektrale Effizienz

PHY	Spektrale Effizienz [Mbps/MHz]
802.11 (FHSS / DSSS)	0,09
802.11b	0,5
802.11a/g	2,7
802.11n (20MHz, MCS15)	6,5
802.11n (40MHz, MCS15)	6,75
802.11ax (8fach MIMO)	30

Die Ausnutzung der Kanäle, auch spektrale Effizienz (auch Bandbreiteneffizienz) genannt, hat sich stetig weiter entwickelt.

Je mehr man die spektrale Effizienz bei gegebenen Signalrauschen erhöht, umso aufwändiger muss die FEC gemacht werden.

802.11n-Frame-Formate

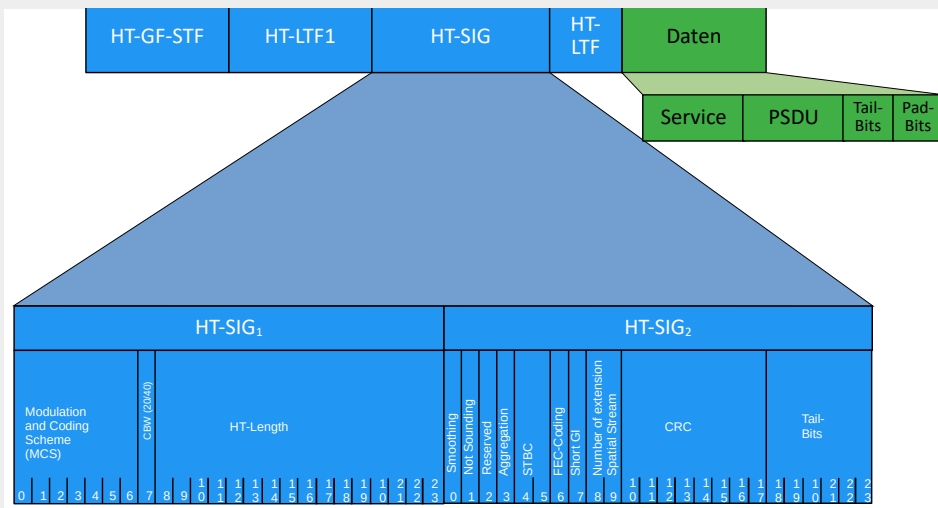


Im Zuge von IEEE802.11n wurden die HT-Test-Felder in kurzer und langer Form eingeführt. Je nachdem in welchem Mode gearbeitet wird.

Die 3 möglichen Modi sind:

- Legacy-Mode (Nur alte Geräte, die kein 802.11n beherrschen)
- Mixed-Mode (Mischung alter und neuer Geräte)
- Greenfield-Mode (nur 802.11n-Geräte)

HT-SIGNAL-Felder



Die Neuerungen mussten im Signalfeld untergebracht werden
z. B. CBW (Channel-Bandwidth) im Bit-7

Beim Smoothing wird die empfohlene Kanalabschätzung angezeigt.
0 = Jeder Unterträger wird getrennt abgeschätzt.
1 = Die Abschätzung erfolgt über den gesamten Kanal

Mit dem Sounding-Flag wird angezeigt, ob es sich um ein Sounding Frame handelt, mit dem das Testen für das Beamforming abgehandelt wird.

STBC Unterschied zwischen Raum-Zeit-Strömen und Sender- und Empfängerzügen falls nicht = 00)

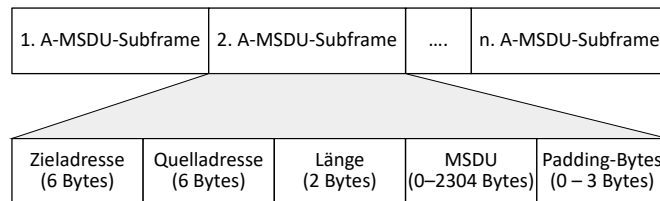
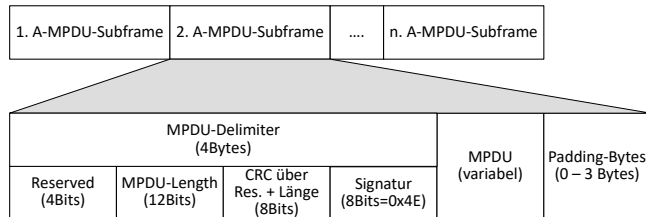
FEC-Coding (0= BCC-FEC / 1 = LDPC-FEC)

Short GI 1 = Nach HT-Trainingsintervalle folgen kurze Guard Intervalle)

Number of extension Spatial Streams (2 Bits für Anzahl der erweiterten Sender- und Empfängerzüge)

Die Tail-Bits sind immer noch reserviert für die Initialisierung des Faltungscodierers

Aggregationsverfahren (A-MPDU / A-MSDU)



Durch den Wegfall von Präambeln kann der Header-Anteil reduziert werden. Es gibt zwei Aggregationsverfahren

- A-MPDU
- A-MSDU

Dabei werden mehrere Header zusammengefasst und im Block quittiert. Voraussetzung ist, dass alle Frames die selbe Empfängerstation haben und die selbe QoS-Klasse angewendet wird. Außerdem muss der Kanal eine bestimmte Qualität haben.

A-MPDU

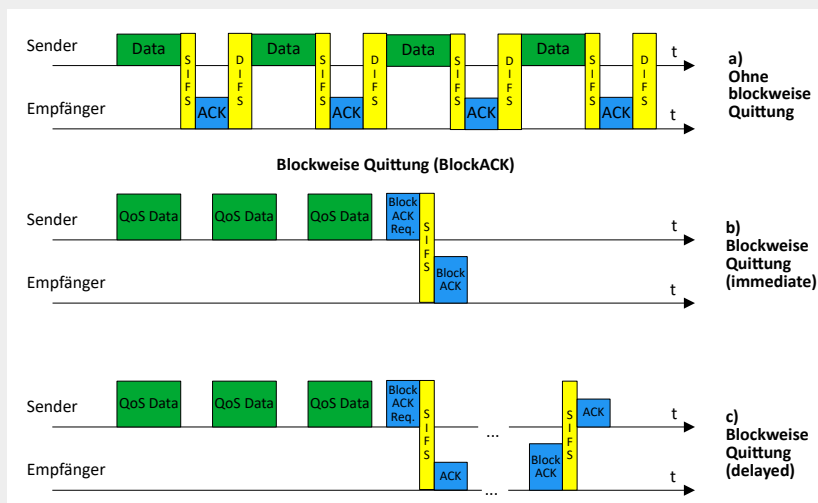
Bei den MPDUs handelt es sich um Daten die von der MAC-Ebene an den PLCP übergeben werden. Das sind komplette Frames inklusive MAC Header. Damit wird bei der A-MPDU komplette Frames aneinandergereiht und übertragen. Eine A-MPDU enthält einen oder mehrere Subframes. Die Gesamtlänge eines A-MPDUs darf bis zu 65535 Bytes entsprechen.

A-MSDU

Bei den MSDUs handelt es sich um den Datenteil eines MAC-Frames. Mit einer A-MSDU werden mehrere MSDUs als Subframes zusammengefasst und übertragen.

Vergleicht man A-MPDU und A-MSDU miteinander, ist das A-MSDU Verfahren effektiver da die MAC-Header in den Subframes sich negativer auswirken. Durch Verschlüsselung wird das Missverhältnis sogar noch verschärft.

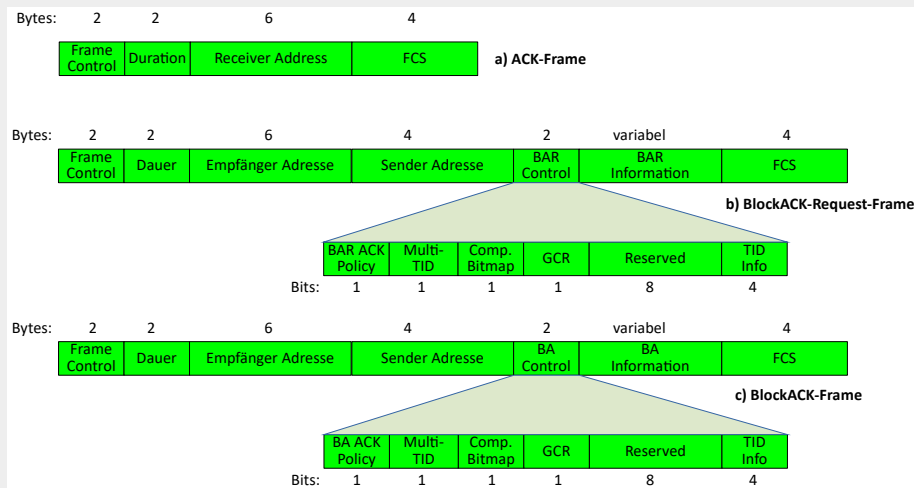
Block-Acknowledgement



Beim BlockACK-Verfahren gibt es zwei Varianten. (immediate / delayed)

- Beim Immediate BlockACK wird sofort nach einem SIFS quittiert.
- Beim Delayed BlockACK wird nur die Aufforderung zur Quittierung nach einem SIFS quittiert. Der eigentliche Block-ACK erfolgt dann später.

Aufbau von ACK und BlockACK



Block-Quittungen werden nur auf Anforderung (Block ACK Request = BAR) gesendet.

IM BAR-Control-Feld wird die verwendete Varianten festgelegt:

BAR-ACK-Policy (0 = Kein Immediate BlockACK gewünscht → Delayed BlockACK / 1 = Immediate ACK gewünscht)

Die nächsten drei Bits wählen die Block-ACK-Request-Variante aus:

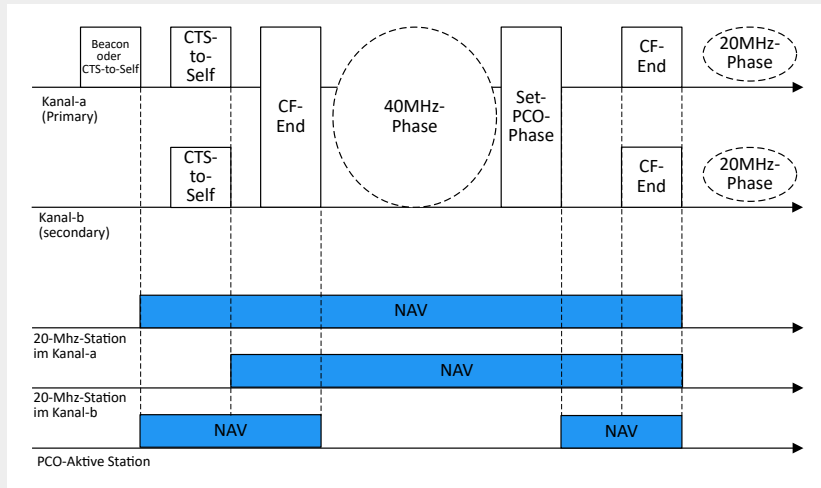
- Basic BlockAckReq (obsolet)
- Compressed BlockAckReq
- Extended Compressed BlockAckReq
- Multi-TID BlockAckReq
- GCR BlockAckReq (GCR = groupcast with Retries)

Das TID-Info-Sub-Feld im BAR-Control-Feld enthält die TID, für das der BlockACK-Frame angefordert wird.

TID steht für **Traffic Identifier**. Es gibt 16 Werte:

- 8 identifizieren **Traffic Categories (TCs)**
- 8 identifizieren einen konfigurierten Traffic Stream (TS)

Phased Coexistence



Anfänglich gab es ein aufwändiges Koexistenz-Verfahren um unterschiedliche Bandbreiten zu verwenden.

Dabei wird Clear To Send to self (CTS to self) eingesetzt.

Das verfahren ist mittlerweile obsolet.

Power-Save-Modus

Bei einer Stromversorgung über PoE kann es zu Einschränkungen kommen:

- Bei IEEE802.3af (PoE mit 12,95W) darf nur eine Antenne betrieben werden.
- Bei IEEE802.3at (PoE+ mit 25,5W) können mehrzügige APs betrieben werden

Der Betrieb mehrerer Antennen erfordert entweder einen eigene Stromversorgung der APs, oder den neuesten PoE-Standard

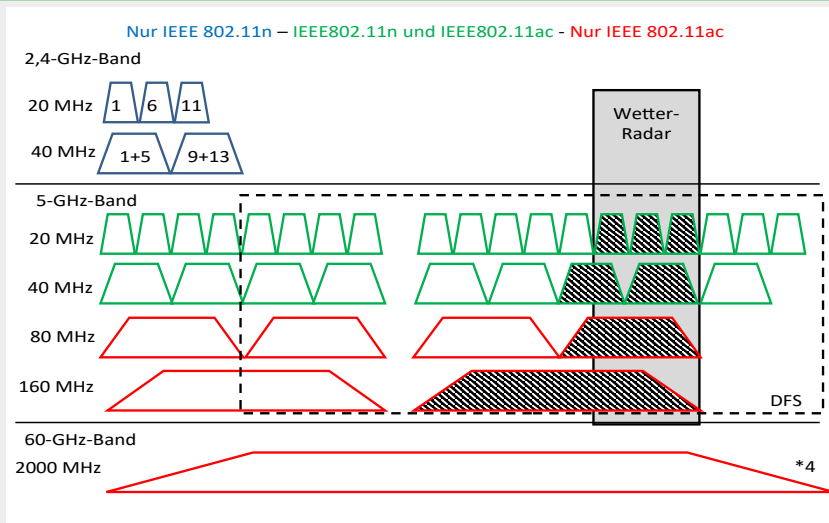
Dieser Standard arbeitet **nur im 5GHz-Bereich**

Die entsprechenden Parametern werden gekennzeichnet indem **VHT** (Very High Throughput) vorangestellt wird

Neuerungen:

- Kanalbandbreiten bis 160MHz
- Multi-User MIMO (MU-MIMO)
- 256-QAM-Modulation
- 2 neue MCSs
- Erhöhung der Antennenanzahl was bis zu 8 Spatial Streams ermöglicht

802.11ac Bandbreiten



Mit IEEE802.11n (Wi-Fi-4) wurden Bandbreiten von 40 MHz eingeführt.

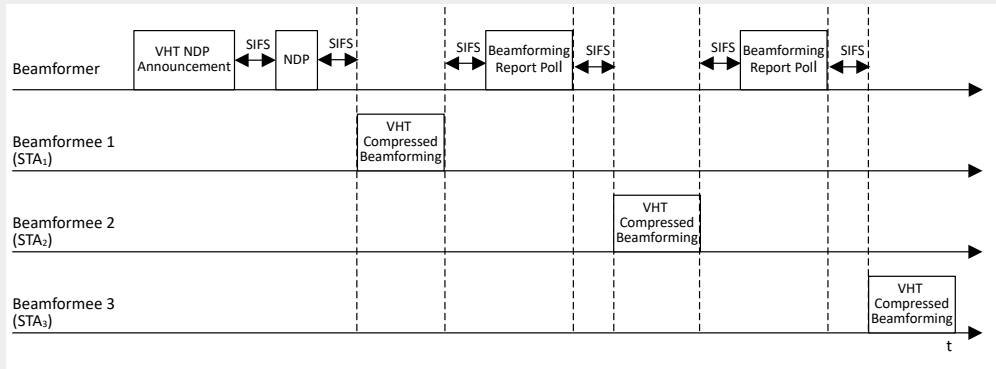
Das gilt sowohl für den 2,4GHz-Bereich als auch für den 5MHz-Bereich.

Im 5MHz-Bereich muss eine Kollision mit dem Wetterradar und Flugzeugen vermieden werden.

Anmerkung:

Erst mit dem IEEE802.11ac-Standard (Wi-Fi-5) wurden die Bandbreiten noch auf 80MHz und 160MHz ausgeweitet.

VHT-Beamforming



Beim 802.11n-Standard, wurde das noch optionale Beamforming, mit dem Single Sounding also 1:1 abgehandelt. D. h. Es wurden regelmäßig Beamforming-Frames an die Stationen ausgesendet, die von den einzelnen Stationen mit Beamforming-Response-Frames beantwortet wurden.

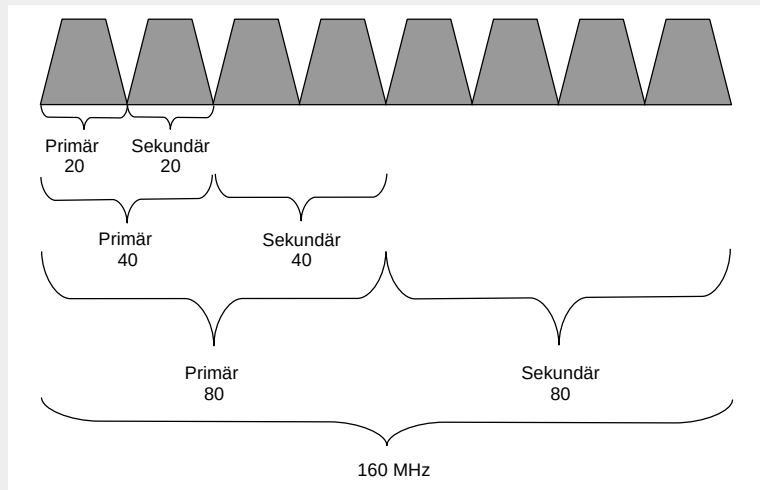
Mit dem 802.11ac-Standard wurde das Multi-Sounding und Feedback Beamforming eingeführt. (VHT-Sounding Protocol) Dabei werden die Beamforming Informationen mit mehreren Stationen ausgetauscht, um das auszusendende Signal weiter zu optimieren.

Dies war durch die Einführung von Multi-User-MIMO (MU-MIMO) erforderlich geworden.

Für die Erstellung der Steuerungsmatrix wird mit einem VHT NDP (Null Data-Packet) Announcement eine Sounding-Feedback-Sequenz initiiert. Innerhalb dieses Frames sind alle Stationen aufgelistet mit denen die Steuerungsmatrix abgeglichen werden soll. Von diesen Stationen erwartet der Sender, dass sie einen VHT-Compressed-Beamforming Response-Frame vorbereiten.

Nach Ablauf eines SIFS und dem Senden eines NDP antwortet die erste Station mit ihrem VHT-Compressed-Beamforming-Response-Frame. Nach einem weiteren SIFS wird im folgenden Beamforming-Report-Poll Frame die nächste Station aufgefordert zu antworten, was sie dann auch tut. Dies wird so lange wiederholt, bis alle Stationen abgearbeitet sind.

Erweiterte Kanalbandbreiten



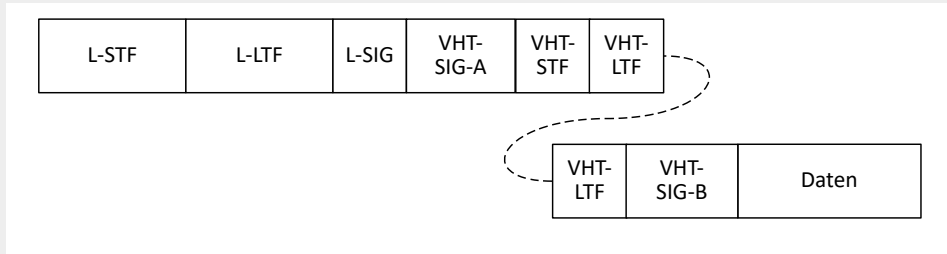
Werden die Bandbreiten vergrößert, müssen die genutzten Bänder direkt neben einander liegen.
Damit kann vor oder nach dem primären Band ein sekundäres Band hinzukommen.

Für die Nutzung entscheidend ist der Inhalt des **Secondary-Channel Offset-Feldes**.

Mit dem Wert 3 wird angezeigt, dass der davor liegende Kanal als zweiter Kanal genutzt wird. Ein Wert von 1 zeigt an, dass der darauf folgende Kanal, als zweiter Kanal genutzt wird. Ein Wert von 0 zeigt an, dass nur 20MHz genutzt werden.

- 0 → Nur 20MHz-Kanal
- 1 → Nächster Kanal ist 2. Kanal
- 3 → Voriger Kanal ist 2. Kanal

IEEE-802.11ac-Frame-Aufbau



Der Frameaufbau ähnelt dem von IEEE802.11n im Mixed-Mode.

Beachtenswert sind die drei Signalisierungs-Felder:

- L-SIG
- VHT-SIG-A
- VHT-SIG-B

Die Felder werden benötigt um alle möglichen Parameter abzudecken.

Inhalt

- Übersicht über alle Standards
- Der erste Standard (IEEE-802.11)
- Verbesserungen / Erweiterungen
 - a/h
 - b/g
 - n (HT)
 - von SISO zu MIMO
 - Beamforming
 - Spatial Streams
 - MCSs
 - Aggregationsverfahren
 - Phased Coexistence
 - Vergrößerung der Bandbreite
 - ac (VHT)
 - Kanalbandbreiten bis 160MHz
 - Multi-User MIMO (MU-MIMO) → VHT-Beamforming
 - 256-QAM-Modulation
 - 2 neue MCSs
 - Bis zu 8 Spatial Streams