

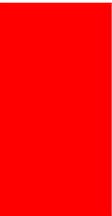


Wi-Fi 6

**WLAN Verbesserungen für mehr Durchsatz und
Betriebssicherheit in kritischen Anwendungsfällen**

Max Riegel

<riegel@max.franken.de>



Wi-Fi 6: WLAN Verbesserungen für mehr Durchsatz und Betriebssicherheit in kritischen Anwendungsfällen

- **Kurzbeschreibung:**

Die neueste Version von Wi-Fi/IEEE802.11 WLAN bringt nur relativ bescheidene Fortschritte in der Spitzengeschwindigkeit, überzeugt aber durch Verbesserungen, die leistungsfähiges WLAN auch in kritischen Anwendungsfällen mit einer hohen Dichte von Endgeräten ermöglichen.

Der Vortrag stellt im Vergleich zu früheren Versionen die technischen Verbesserungen vor, die in die Entwicklung von Wi-Fi 6/IEEE 802.11ax eingeflossen sind, und gibt Hinweise für den sinnvollen Einsatz von Wi-Fi 6(E).

Was ist Wi-Fi 6 ?

- Bislang wurden WLAN Generationen durch den entsprechenden IEEE Standard bezeichnet:
 - 802.11a, 802.11b, 802.11g, 802.11n, 802.11ac
- Führt zu mehr Verwirrung denn Klarheit
- Wunsch nach eingängiger Bezeichnung ähnlich zum Mobilfunk
 - 1G -> 2G -> 3G -> 4G -> 5G
- Wi-Fi Alliance entschied, IEEE 802.11ax wird als 'Wi-Fi 6' bezeichnet
 - Zertifizierte Produkte bekommen das Label: 'Wi-Fi CERTIFIED™ 6'
 - Wi-Fi 6E bezeichnet die Version, die auch im neuen 6 GHz Band arbeitet.



Kennzeichnung der Wi-Fi Generationen

Darstellung auf Endgeräten und Produkten

If the most advanced technology a device supports is ...	Then it shall be identified as generation
802.11ax	Wi-Fi 6
802.11ac	Wi-Fi 5
802.11n	Wi-Fi 4

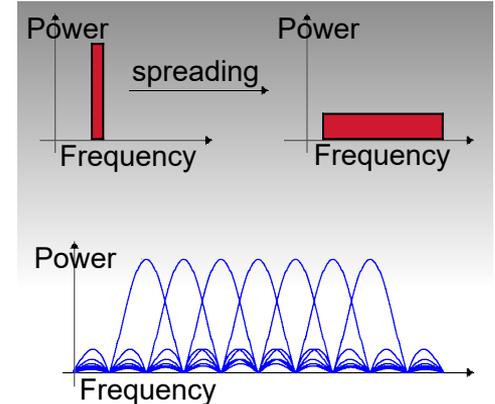


- Eingängige Bezeichnung, für jeden verständlich
 - ... auch in der Hoffnung, dass neue Technik schneller gekauft wird;-).

Die Evolution von Wi-Fi

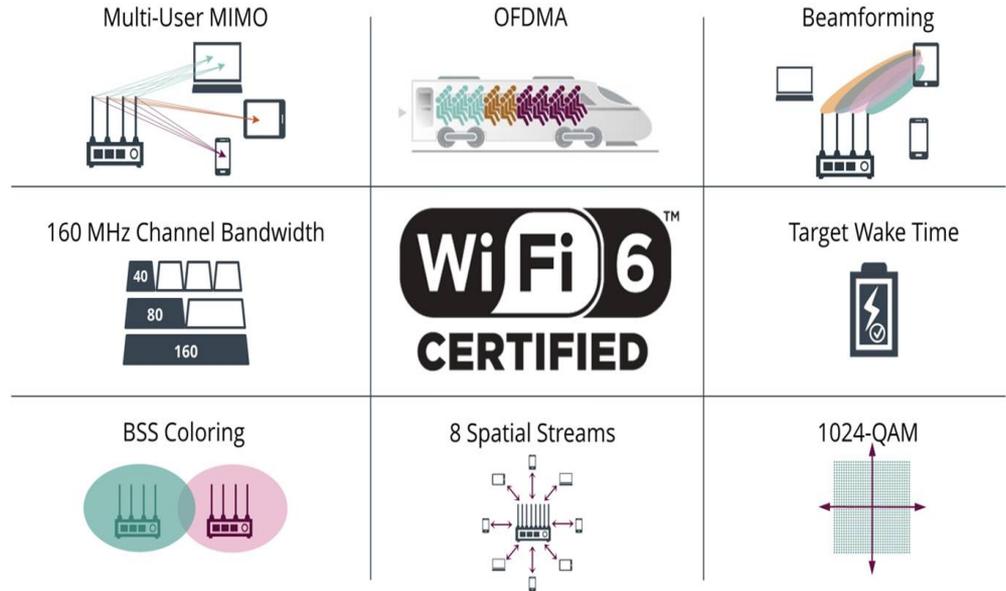
Radiostandards für 2.4 GHz, 5 GHz und 6 GHz

- 2.4 GHz Direct Sequence Spread Spectrum
 - DBPSK/DQPSK für 1/2 Mbit/s
 - Kanalbandbreite: 22 MHz
- 2.4 GHz High Rate DSSS (802.11b – **Wi-Fi 1**)
 - CCK/DQPSK für 5.5/11 Mbit/s
 - Kanalbandbreite: 22 MHz
- 2.4 GHz Extended Rate (802.11g – **Wi-Fi 3**)
 - DSSS für 1/2/5.5/11 Mbit/s
 - OFDM für 6/9/12/18/24/36/48/54 Mbit/s
 - Kanalbandbreite: 22/20 MHz
- 5 GHz Orthogonal Frequency Division Multiplex (802.11a – **Wi-Fi 2**)
 - OFDM für 6/9/12/18/24/36/48/54 Mbit/s
 - Kanalbandbreite: 20 MHz
- 2.4 GHz & 5 GHz High Throughput (802.11n – **Wi-Fi 4**)
 - OFDM mit bis zu 4x4 MIMO für bis zu 600 Mbit/s
 - Kanalbandbreite: 20 MHz & 40 MHz
- 5 GHz Very High Throughput (802.11ac – **Wi-Fi 5**)
 - OFDM mit bis zu 8x8 DL MU-MIMO für bis zu 6900 Mbit/s (3460 Mbit/s pro STA)
 - Kanalbandbreite: 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz
- 1 – 7.125 GHz High Efficiency (802.11ax – **Wi-Fi 6**)
 - OFDM/OFDMA mit bis zu 8x8 MU-MIMO für bis zu 9600 Mbit/s
 - Kanalbandbreite: 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz



Was kann Wi-Fi 6 besser ?

- Wi-Fi Spektrum
 - 2.4, 5, 6 GHz
- Radio
 - Modulation & Kodierung
 - 1024-QAM
 - OFDMA
 - Multiple Input Multiple Output
 - 8 Spatial Streams
 - Beamforming
 - Multi-user MIMO
- Stromsparmmodus
 - Target Wake Time
- Kanalzugriff
 - BSS Coloring





Wi-Fi 6

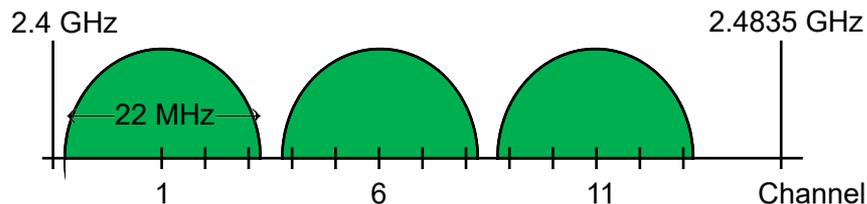
Wi-Fi Spektrum

Wi-Fi im 2.4 GHz ISM Band

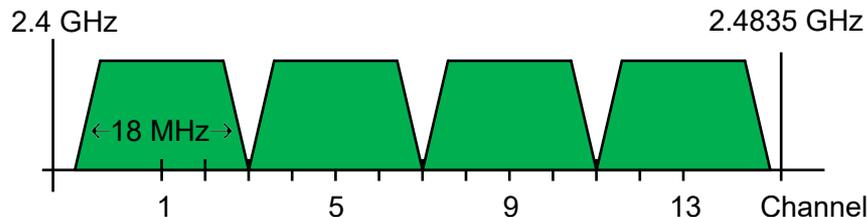
ISM: Freies Spektrum für Industrie, Wissenschaft und Medizin

- Wi-Fi ist immer noch hauptsächlich im 2.4 GHz ISM Band
 - USA erlaubt nur Kanäle 1 – 11.
 - IEEE 802.11b benötigt 22 MHz
 - Deswegen 1 – 6 – 11
 - Neuere Wi-Fi (IEEE 802.11g/n/ax) passt in 20 MHz
 - 1 – 5 – 9 – 13: (33% mehr Kapazität)
 - Empfehlung: In der Spur bleiben und Kollisionen vermeiden
 - Deswegen häufig immer noch 1 - 6 - 11
- Regulierung in Europa:
 - max Sendeleistung: 100 mW EIRP
 - gleichmäßig verteilt (Spread Spectrum)
 - Spezifikation: ETSI EN 300 328

IEEE 802.11b braucht 22 MHz Kanäle

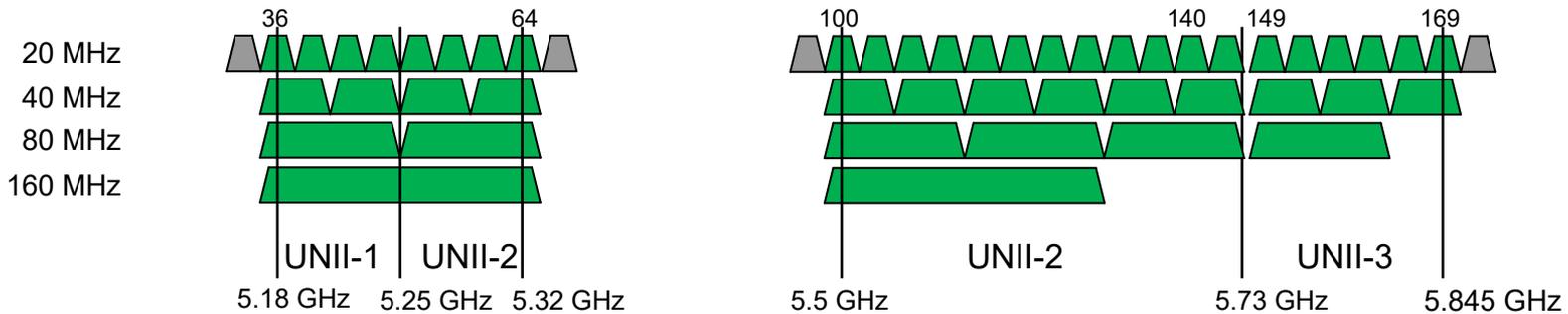
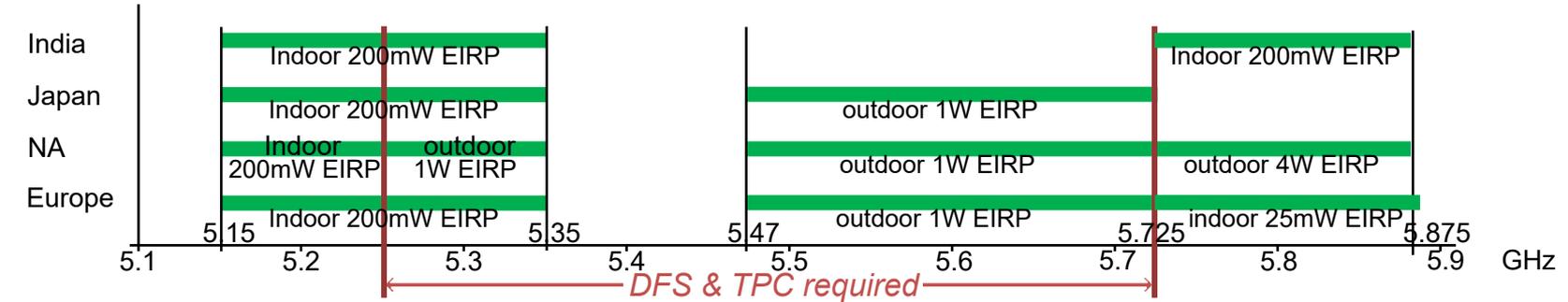


IEEE 802.11g/n/ax passt in 20 MHz Kanäle



Wi-Fi im 5 GHz Band

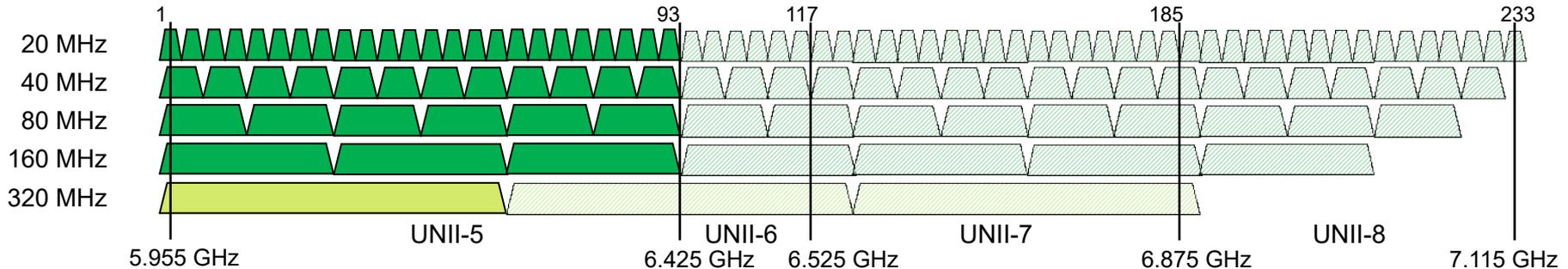
455 MHz für nachrangige lizenzfreie Nutzung



Neu: Wi-Fi im 6 GHz Band

Derzeit nur vorgesehen für Wi-Fi 6 (Wi-Fi 6E)

- Neue Frequenzzuweisung für nachrangigen lizenzfreien Betrieb im 6 GHz Band (5925 – 6425 – 7125 MHz)
 - Komplettes 1.2 GHz Band erlaubt in USA und vielen anderen Ländern
 - In Europa (zunächst ?) 'nur' 5925 – 6425 MHz nachrangige lizenzfreie Nutzung
 - Verschiedene Nutzungsszenarien
 - Very Low Power (~ 25 mW EIRP) für Innen und Außen
 - Low Power (~ 200 mW EIRP) nur für Innen
 - Standard Power (up to 4W EIRP), derzeit nur USA mit AFC (automatic frequency control)
- Breitere Funkkanäle (320 MHz) und Wi-Fi 6 Betrieb ohne Altlast





Wi-Fi 6

Wi-Fi Radio Evolution

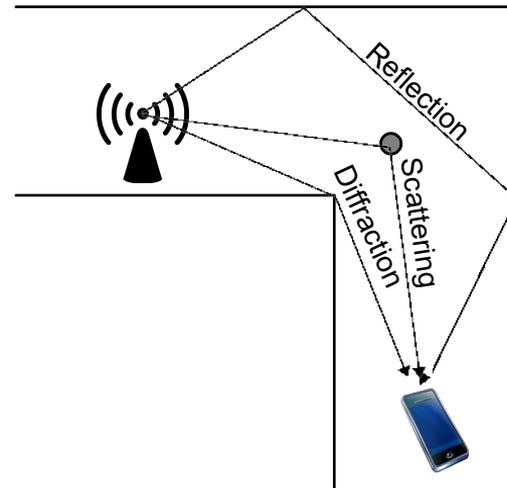
Radio-Ausbreitung

Elektromagnetische Wellen kommen selten ungehindert ans Ziel

- Path loss (Dämpfung)
 - Abhängig von Abstand und Frequenz
- Reflection (Reflexion)
 - Oberflächen, sehr viel größer als Wellenlänge
- Diffraction (Beugung)
 - feste Ecken, sehr viel größer als Wellenlänge
- Scattering (Streuung)
 - Hindernisse in der Größe der Wellenlänge

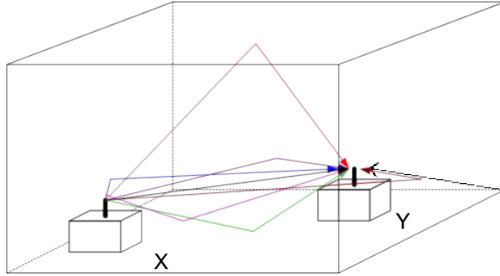
Dominierende Effekte:

- Line-of-sight: Reflexionen
- Non-line-of-sight: Beugung und Streuung



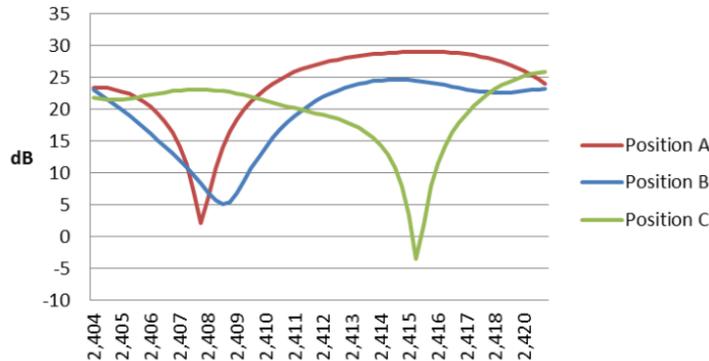
Frequenzverhalten durch Laufzeitvariation

Innenräume verhalten sich wenig vorherbestimmbar.



- Reference doc.: IEEE 802.11-13/0416r5
 - Simulation der Laufzeiten und Wege
- Szenario
 - Raum 100 ft by 70 ft (x, y)
 - Deckenhöhe 20 ft
 - RX Position (65, 44, 3ft über Boden)
 - 10dB Dämpfung für direkte Wellen

Relative Selective Fading

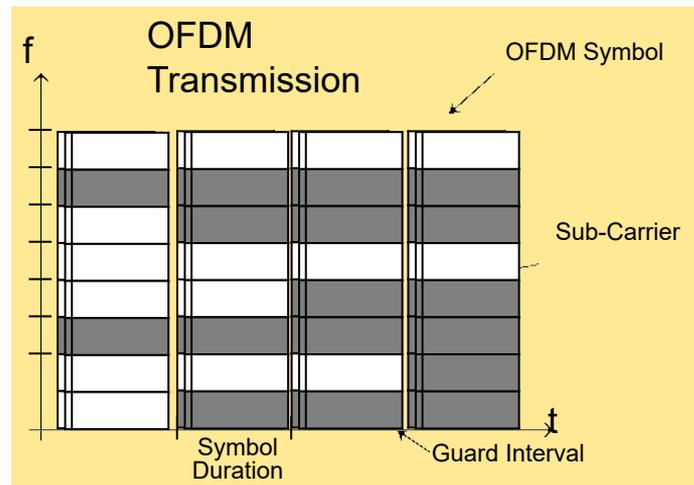


- Übertragungsverhalten ermittelt für
 - Position A (21, 45) (delays 23 - 100 ns)
 - Position B (30, 45) (delays 27 - 102 ns)
 - Position C (13, 45) (delays 21 - 99 ns)
- **Dämpfungsvariation von 25 dB!**
- **Laufzeitvariation von mehr als 75 ns**

Signalübertragung bei Laufzeitvariation

Robuste Übertragung durch Orthogonale Frequenztransformation

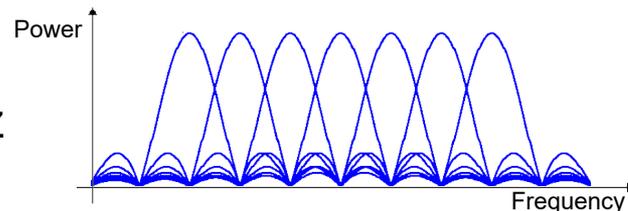
	D	e	m	o
ASCII	68	101	109	111
128	0	0	0	0
64	1	1	1	1
32	0	1	1	1
16	0	0	0	0
8	0	0	1	1
4	1	1	1	1
2	0	0	0	1
1	0	1	1	1



Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM)

Transformiert Daten in eine Kombination von 'Tönen'

- Erstmals eingesetzt in 802.11a-1999
- Bandbreite 16.25 Mhz im Tonraster 312.5 kHz
- OFDM Symbol mit einer Dauer von 3.2 μ s alle 4 μ s (250 kSymbols/s)
 - Schutzabstand von 0.8 μ s zwischen Symbolen garantiert Orthogonalität bei Laufzeitvarianz

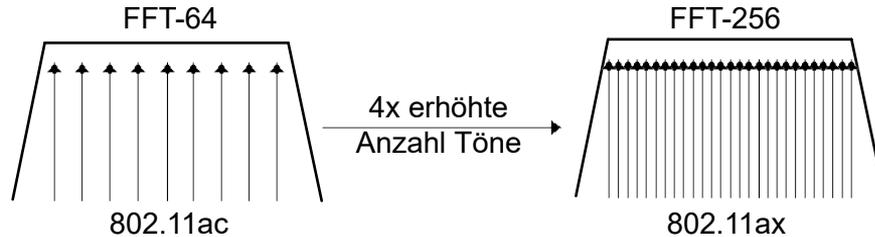


Data Rate (Mbps)	Modulation	Coding Rate	Coded bits per subcarrier	Coded bits per OFDM symbol	Data bits per OFDM symbol	Receive sensitivity
6	BPSK	1/2	1	48	24	- 82 dBm
9	BPSK	3/4	1	48	36	- 81 dBm
12	QPSK	1/2	2	96	48	- 79 dBm
18	QPSK	3/4	2	96	72	- 77 dBm
24	16-QAM	1/2	4	192	96	- 74 dBm
36	16-QAM	3/4	4	192	144	- 70 dBm
48	64-QAM	2/3	6	288	192	- 66 dBm
54	64-QAM	3/4	6	288	216	- 65 dBm

OFDM Verbesserungen in Wi-Fi 6

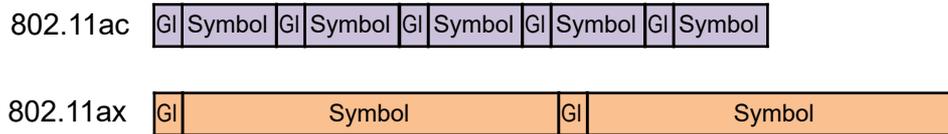
Längere Symbole durch Verfeinerung des Tonrasters

Frequenzbereich
(~ 5% Gewinn)



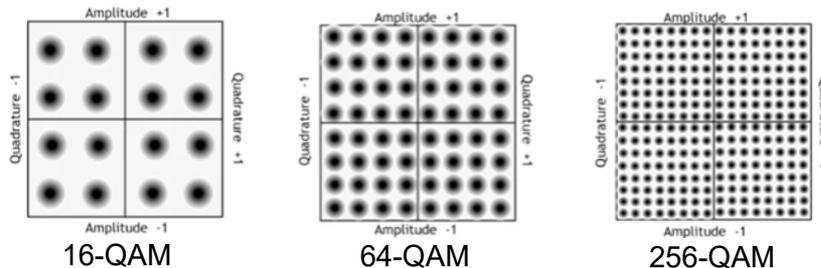
Bessere Nutzung der Kanalbandbreite durch zusätzliche Töne am Rand

Zeitbereich
(~ 15% Gewinn)



Reduzierter Overhead durch Schutzabstände

Modulation
(~ 25% Gewinn)



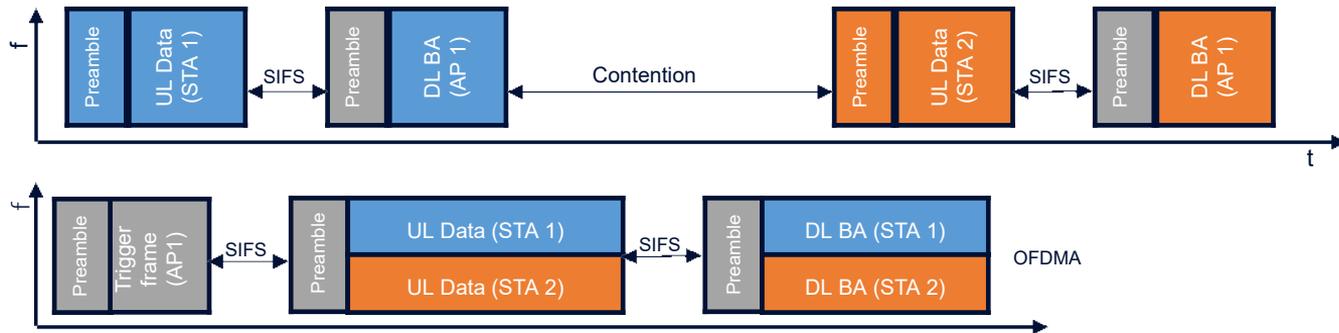
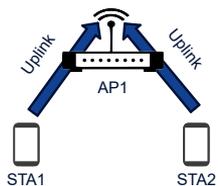
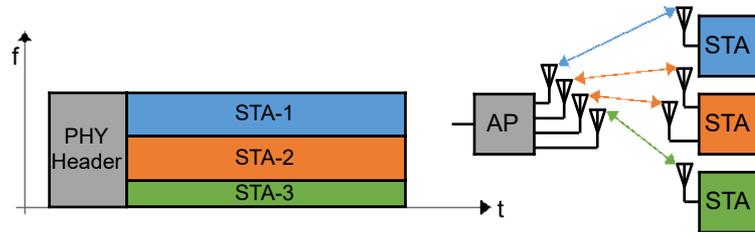
+ 1024-QAM

Mehr Bits pro Ton

OFDMA zur effizienten Ressourcenverteilung

Wi-Fi 6: Gleichzeitige Bedienung mehrerer Stationen

- OFDMA erlaubt die Aufteilung der Töne eines Symbols auf mehrere STAs.
- Mehrere STAs können innerhalb eines Nachrichtenaustausches Daten empfangen und/oder senden.



MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Ausnutzung von Selective Fading zur Kapazitätserhöhung

- Spatial Multiplexing (SM)



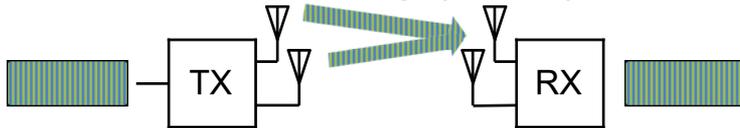
- Aufteilung der Übertragung auf mehrere Teilströme

- Space-Time Block Coding (STBC)



- Variable Kapazitätserhöhung mit Störfestigkeitsverbesserung

- Transmit Beamforming (TxBF)

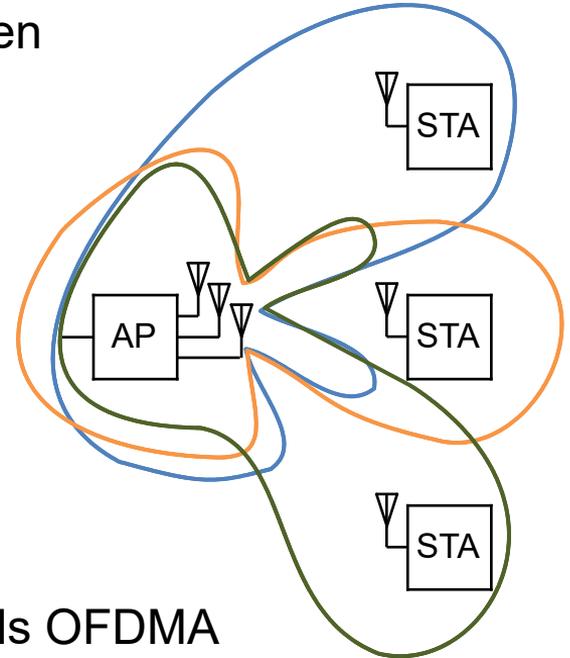


- Störfestigkeitserhöhung zur Reichweitenverbesserung

Bidirektionales Multi-User MIMO in Wi-Fi 6

Richtantennenwirkung zur Separation von Stationen

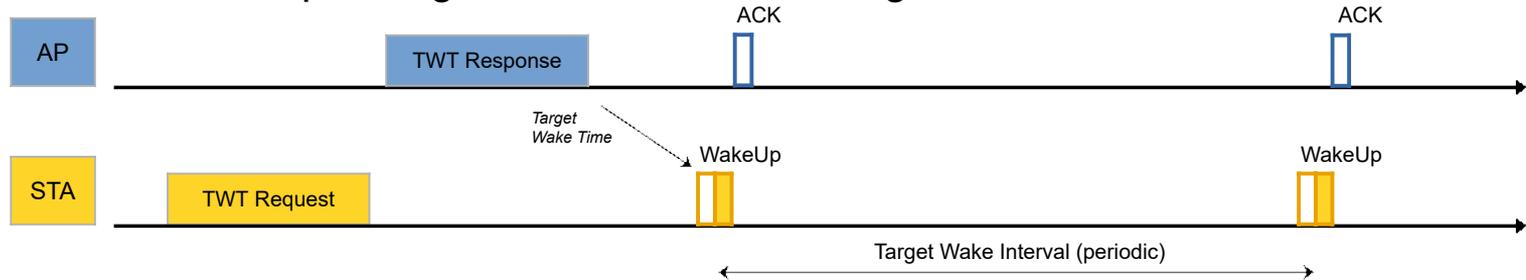
- MU-MIMO nutzt mehrere Antennen um gleichzeitig unterschiedliche Datenströme an verschiedene Stationen zu schicken
 - Kombination von Beamforming und Null-Steering
 - Hauptsächlich Null-Steering, damit Stationen nur ihre Datenströme sehen
- Genaue Kenntnis der Kanalbedingungen nötig
 - Explizit durch ein 'Sounding Protocol' zur Durchführung von Kanalmessungen und Meldung von Ergebnissen
 - Oder implizit aus den Empfangsdaten (weniger effizient)
- Kapazitätsverbesserungen vor allem wenn Stationen ähnliche Datenströme haben.
- MU-MIMO ist eine alternative Methode zur gleichzeitigen Bedienung mehrerer Stationen mittels OFDMA



Target Wake Time (TWT)

Flexible Steuerungsmethode in Wi-Fi 6 - nicht nur zum Stromsparen

- Station vereinbart ihre Ruhepausen individuell mit AP
 - AP speichert Daten zwischen bis zur nächsten Aktivitätsphase
 - Geschickte Zeitplanung erlaubt die Vermeidung von Kollisionen

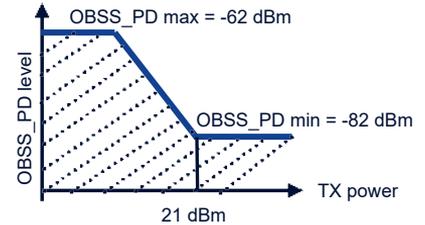
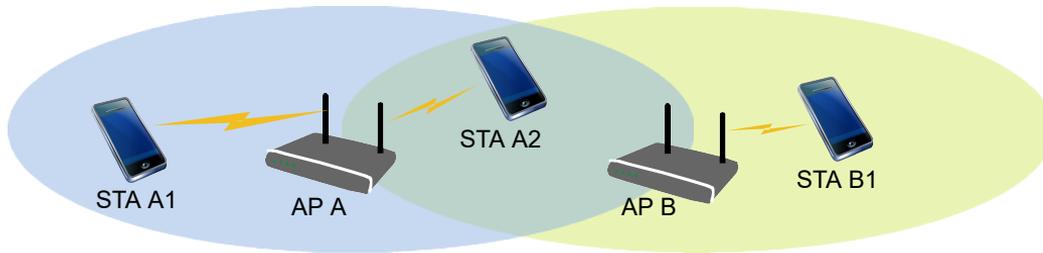


- Die vereinbarten Ruhepausen können von sehr kurz (einige μs) bis sehr lang sein (max 4.46 Jahre)
- Durch TWT ist es möglich, Wi-Fi 6 vollständig zentral zu steuern.
 - Voraussetzung zur Realisierung von QoS in Wi-Fi

BSS Coloring, wenn der Nachbar bremst

Bessere Unterscheidung von Nachbarsystemen in Wi-Fi 6

- Wi-Fi sendet nur, wenn das Medium frei ist
 - Clear Channel Assessment (CCA) ist oft übervorsichtig
 - Übertragungen funktionieren auch wenn Nachbarsystem aktiv sind



- Wi-Fi 6 besitzt ein Feld im PHY-Header (BSS color), das beim CCA erlaubt, Nachbarsysteme zu erkennen.
 - Wenn das erkannte Signal vom Nachbarn stammt, wird die Schwelle für den Start einer Übertragung erhöht, d.h. gesendet trotz anderer aktiver Nutzer.
 - Meistens funktioniert dann die Übertragung trotzdem, weil das Störsignal beim Empfänger räumlich weit entfernt ist und die Dekodierung nicht mehr beeinträchtigt.

Wi-Fi 6 Modulation und Coding

Bei MIMO mit der Anzahl der Ströme zu multiplizieren

MCS index	Modulation type	Coding rate	Data rate (in Mb/s)							
			20 MHz channels		40 MHz channels		80 MHz channels		160 MHz channels	
			1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI
0	BPSK	1/2	8	8.6	16	17.2	34	36.0	68	72
1	QPSK	1/2	16	17.2	33	34.4	68	72.1	136	144
2	QPSK	3/4	24	25.8	49	51.6	102	108.1	204	216
3	16-QAM	1/2	33	34.4	65	68.8	136	144.1	272	282
4	16-QAM	3/4	49	51.6	98	103.2	204	216.2	408	432
5	64-QAM	2/3	65	68.8	130	137.6	272	288.2	544	576
6	64-QAM	3/4	73	77.4	146	154.9	306	324.4	613	649
7	64-QAM	5/6	81	86.0	163	172.1	340	360.3	681	721
8	256-QAM	3/4	98	103.2	195	206.5	408	432.4	817	865
9	256-QAM	5/6	108	114.7	217	229.4	453	480.4	907	961
10	1024-QAM	3/4	122	129.0	244	258.1	510	540.4	1021	1081
11	1024-QAM	5/6	135	143.4	271	286.8	567	600.5	1134	1201

Vergleich Wi-Fi 5 zu Wi-Fi 6

Feature	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6
OFDMA	Nicht vorhanden	Dynamische Zuweisung von 26, 52, 106, 242, 484, or 996 Töne per Station. Die Bandbreite einer OFDMA Übertragung für eine einzelne Station liegt zwischen 2.03125 MHz und ca. 80 MHz.
Multi-user MIMO (MU-MIMO)	Nur in DownLink	Sowohl DownLinke als auch UpLink (bidirektional)
Trigger-based Random Access	Nicht vorhanden	Erlaubt UL OFDMA Übertragungen von Stationen, denen kein Kanal zugewiesen wurde.
BSS Coloring	Nicht vorhanden	BSS Coloring ermöglicht die Unterscheidung von Nachbarsystemen und damit die dynamische Anpassung der CCA Schwellen für den Start einer Übertragung.
Target Wait Time (TWT)	Nicht vorhanden	TWT für Reduktion von Stromverbrauch und Vermeidung von Zugriffskollisionen
Guard Interval	0.4 μ s or 0.8 μ s	0.8 μ s, 1.6 μ s or 3.2 μ s
Symbol duration	3.2 μ s	3.2 μ s, 6.4 μ s, or 12.8 μ s

Erste Praxiserfahrungen mit Wi-Fi 6

<https://www.networkworld.com/article/3541759/test-and-review-of-4-wi-fi-6-routers-whos-the-fastest.html>

<https://www.smallnetbuilder.com/wireless/wireless-reviews/33220-wi-fi-6-performance-roundup-five-routers-tested>

<https://www.techspot.com/article/2098-wifi-5-vs-wifi-6/>

<https://www.heise.de/select/ct/2021/3/2030915164965629451>

Product	Extreme AP-650		Cisco Catalyst C9115		EnGenius EWS377		Meraki MR55	
	AVG	MAX	AVG	MAX	AVG	MAX	AVG	MAX
TP-Link AC600 USB Adapter (Wi-Fi 5)	196.13	229.19	122.17	187.01	134.28	150.67	194.73	214.04
Galaxy S5 Phone (Wi-Fi 5)	485.45	603.61	231.60	384.64	498.50	578.69	304.49	336.55
Ubitt AX200 PCI Adapter (Wi-Fi 6)	370.53	418.86	177.59	226.74	454.69	528.42	420.31	483.28
Apple iPhone 11 (Wi-Fi 6)	535.05	700.13	266.87	310.87	617.58	929.37	296.94	360.26

“Es kommt darauf an, Wi-Fi 6 ist nicht unbedingt besser als Wi-Fi 5.”

	NAT-Durchsatz		WLAN-Durchsatz			
	PPPoE	IP/IP	2,4 GHz nah	20 Meter	5 GHz nah	20 Meter
	besser ▶	besser ▶	besser ▶	besser ▶	besser ▶	besser ▶
Asus RT-AX58U	904	950	332	305	737	347
AVM Fritzbox 7530AX	884	950	346	213	706	226
D-Link DIR-X1860	901	950	421	297	695	216
Huawei WiFi AX3 (WS7200)	187	948	382	276	893	283
Linksys MR7350	849	949	322	256	691	309
Telekom Speedport Pro Plus	nicht messbar	nicht unterstützt	403	322	898	371
AVM Fritzbox 7580	882	949	204	189	848	309

alle Werte in MBit/s, NAT-Performance Downstream, WLAN gegen Intel AX200

Wi-Fi 6 unter der Haube...

Wenn man tiefer in die Firmware einsteigen möchte...

- Offizielles OpenWRT bis jetzt nur für ganz wenige Geräte mit MediaTek Chipsatz
 - https://openwrt.org/toh/views/toh_available_16128?dataflt%5BWLAN+5.0GHz*%7E%5D=ax
 - Günstigster Einstieg: TOTOLINK X5000R
 - Gibt es z.B. in Polen bei batna24.com für ca. 45€
<https://www.batna24.com/de/p/totolink-x5000r-wifi-router-rmmm>
- Alternative für ASUS Router: ASUSWRT-Merlin
 - <https://www.asuswrt-merlin.net/>
 - Mehr Funktionen, *ssh*-Zugriff, *Entware* Unterstützung
- Für ernsthafte Entwicklungen: mango von 8devices
 - <https://www.8devices.com/products/mango>
 - Modifiziertes OpenWRT mit Qualcomm Treibern verfügbar



Fragen, Anmerkungen ?

