

WLAN IEEE 802.11 Evolution

Von 1 Mbps (1997) auf weit über 1000 Mbps (2013)

Max Riegel

2011-11-23

WLAN IEEE 802.11 Evolution

- **Binnen Jahresfrist wurde der Markt mit Wireless LAN Routern mit Übertragungsraten von mehr als 1 Gbit/s überflutet. Der Vortrag stellt die Techniken und die Rahmenbedingungen für solche Übertragungsraten vor, macht Überlegungen zum praktischen Einsatz, gibt einen Überblick welche technischen Evolutionsschritte bis zum WLAN Standard IEEE 802.11ac geführt haben, und erklärt weitere Funktionsverbesserungen von WLAN, die in den letzten Jahren im Markt erschienen.**

- **WLAN Einsatz und Verbreitung**
- **IEEE 802.11 Standardisierung**
- **IEEE 802.11 Radio Evolution**
 - Grundlagen
 - IEEE 802.11g
 - IEEE 802.11n
 - IEEE 802.11ac
 - Praktische Kenngrößen
- **WLAN Spektrum in Europa**
- ***Lasst uns IEEE 802.11b beerdigen!***
- **Evolution der Spezifikationen**

Einführung

WLAN EINSATZ UND VERBREITUNG



Residential Wi-Fi

WLAN im Heimnetz

~ 90% der Access Points*

- Aufgebaut und konfiguriert durch 'Hobby Administratoren'
- Großes Sicherheitsbewußtsein verstärkt durch Gerichtsurteile
- Heute überall verschlüsselte Luftschnittstelle



Corporate Wi-Fi

WLAN im Unternehmensnetz

< 10% der Access Points*

- Aufgebaut und konfiguriert durch die IT Abteilung
- Großes Sicherheitsbewußtsein aus wirtschaftlichen Gründen (Spionage, Sabotage)
- Heute überall verschlüsselte Luftschnittstelle



Public Wi-Fi

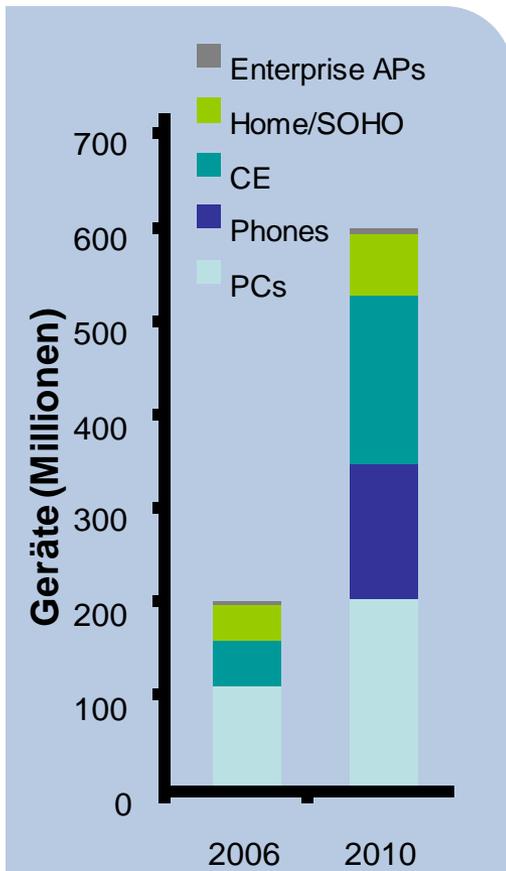
WLAN im Public Hotspot

< 1% of Access Points*

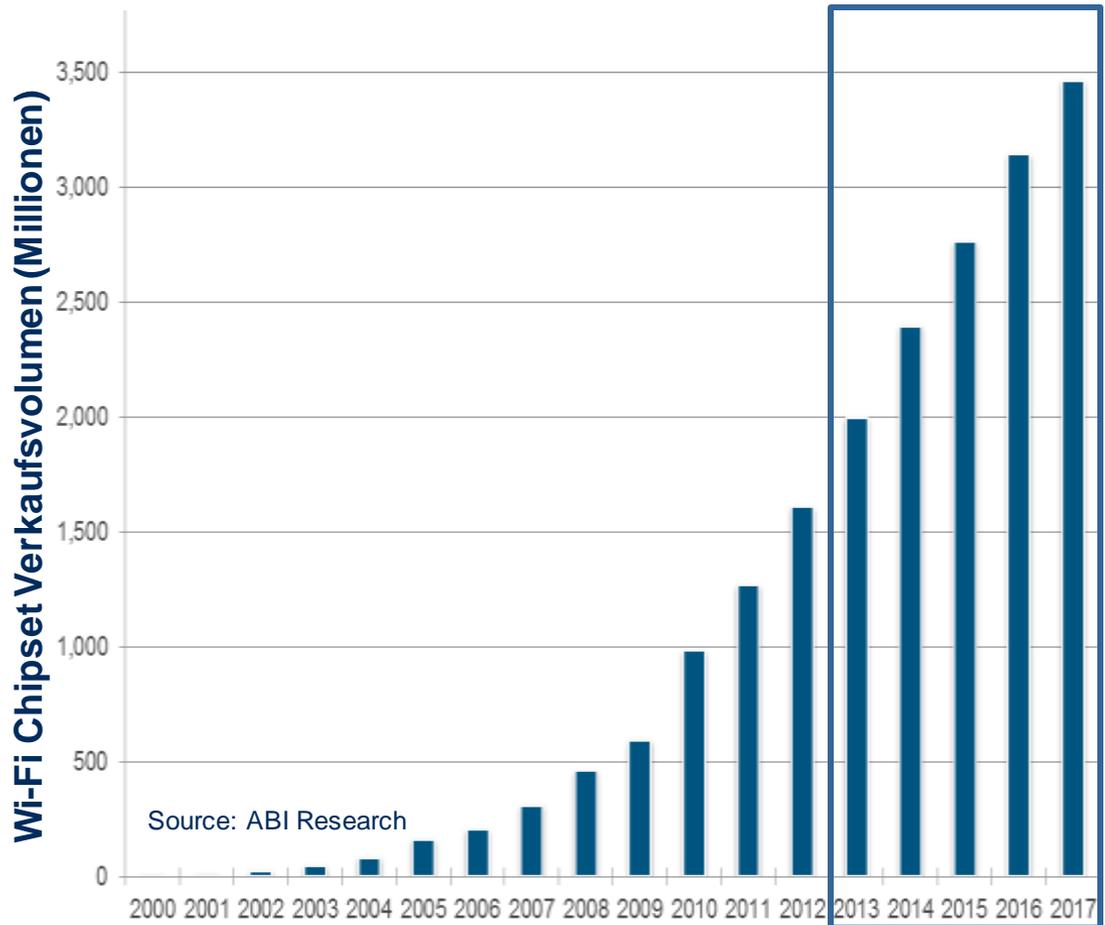
- Aufgebaut und betrieben von Telekommunikationsbetreiber
- Sicherheit ist Kundensache, Betreiber kümmert sich nur um seine Betriebssicherheit
- Heute grundsätzlich offene Luftschnittstelle

*Die Zahlen sind für den Deutschen WLAN Markt. Ähnliche Verhältnisse gelten in den anderen Ländern (z.B.: USA, Korea)

Der WLAN Markt wächst gewaltig



Source: In-Stat



Source: ABI Research

Die WLAN Spezifikationen

IEEE 802.11

STANDARDISIERUNG



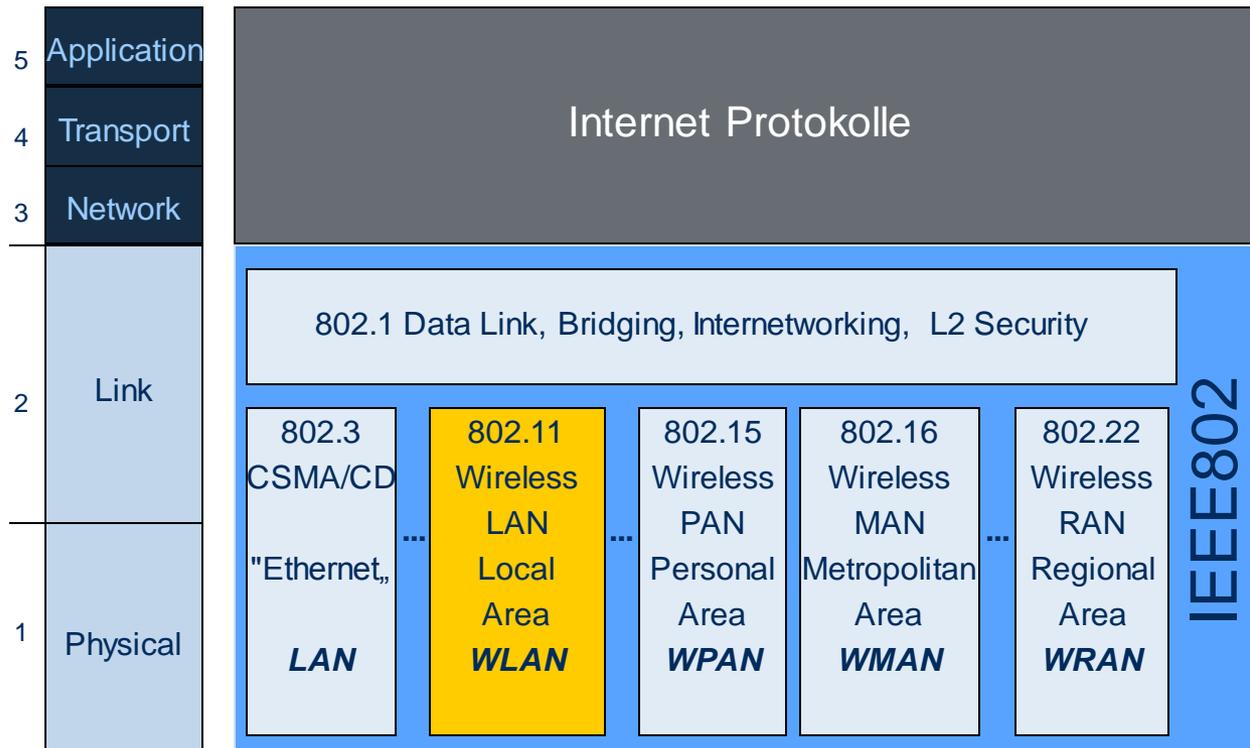
IEEE 802.11 entwickelt und veröffentlicht die technischen Spezifikationen für WLAN

Technische Standards



Wi-Fi Alliance definiert Anwendungsprofile und zertifiziert Produkte bezüglich Konformität

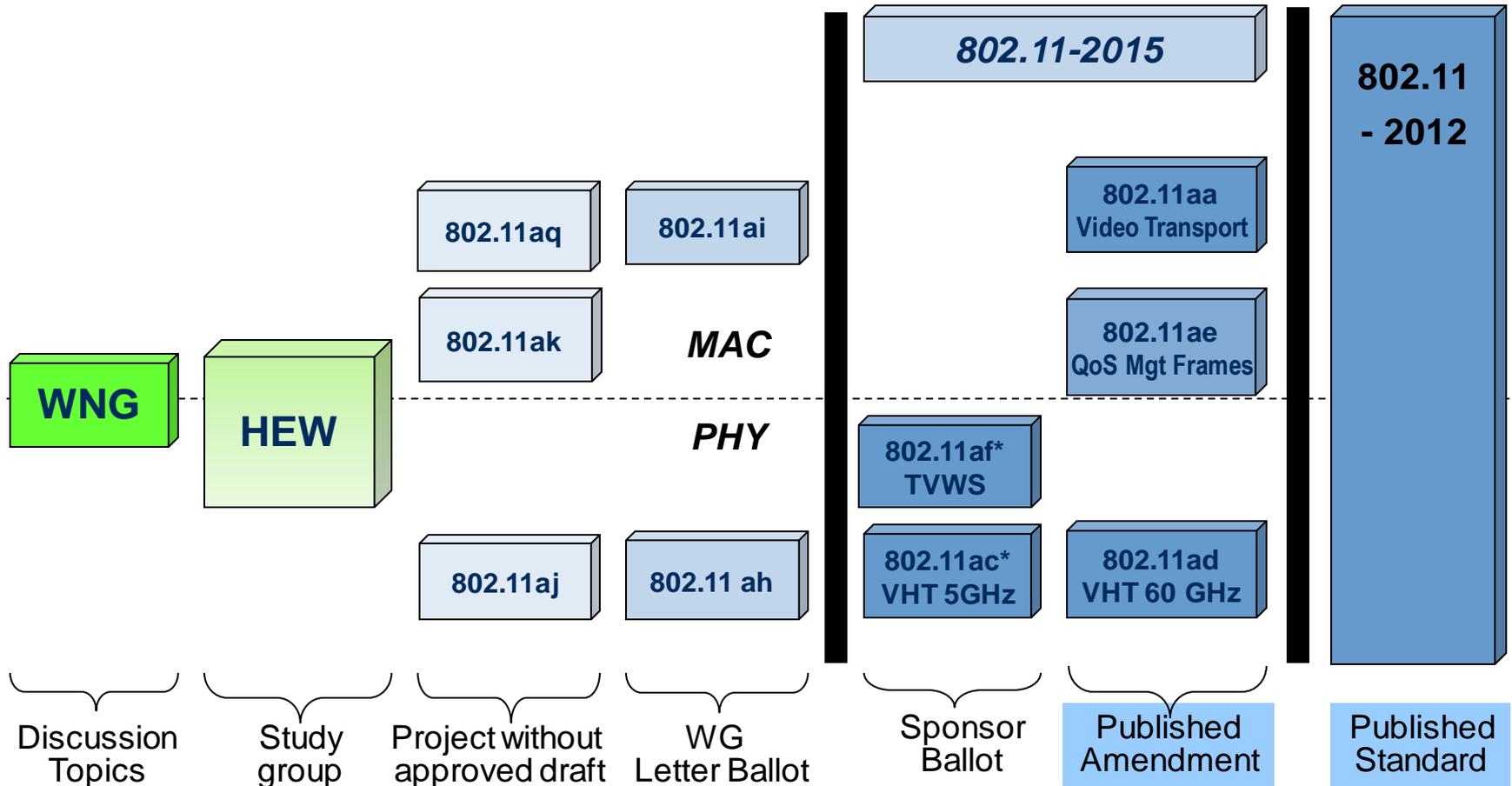
Konformität Zertifizierung



- IEEE 802 stellt eine Familie von Standards für die Übertragung von IP zur Verfügung
- IEEE 802 spezifiziert 'nur' den Physical and Data Link Layer.

- **Start des IEEE Computer Society Project 802 im Februar 1980 (80-2) zur Standardisierung von Ethernet für 1..20 Mbps.**
 - Wurde später in "LMSC": LAN/MAN Standardization Committee umbenannt.
- **IEEE 802.11 startete in 1990**
 - Ursprünglich um Registerkassen zu vernetzen.
 - Besonders die Klärung regulatorischer Fragen brauchte viele Jahre.
- **Der erste IEEE 802.11 Standard wurde 1997 verabschiedet.**
 - WLAN mit 1..2 Mbps
 - 3 verschiedene Verfahren

Derzeitige IEEE 802.11 Arbeitsthemen



* Spezifikationen ratifiziert aber noch nicht veröffentlicht.

IEEE802.11 WLAN Radio Standards



Std	Datum	Freq. (GHz)	Bandbreite (MHz)	Datenrate pro Stream (Mbit/s)	Erlaubte MIMO Streams	Modulation	Reichweite innen	Reichweite außen
							(m)	(m)
	Jun 1997	2.4	20	1, 2	1	DSSS	30	120
a	Sep 1999	5	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	1	OFDM	30	120
b	Sep 1999	2.4	20	5.5, 11	1	DSSS	40	140
g	Jun 2003	2.4	20	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	1	OFDM	40	140
n	Oct 2009	2.4/5	20	7.2, 14.4, 21.7, 28.9, 43.3, 57.8, 65, 72.2 ^[X]	4	OFDM	70	250
			40	15, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150 ^[X]			70	250
y	Nov 2008	3.7	5/10/20	Up to 13.5/27/54	1	OFDM		5 000
ac	~ 03/2014	5	20/40/80/160	up to 867	8	OFDM	40	140
ad	Oct 2012	60	2000	up to 6 700	1	DS	Single room	-
af	~ 03/2014	TV WS	W/2W/4W ^[w]	up to 142	4	OFDM	200	1000
ah	~ 03/2016	< 1	1/2/4/8/16	tbd (up to 80)*	tbd	OFDM	200*	1000*

^[X]Assumes short guard interval (SGI) enabled, otherwise reduce each data rate by 10%.

^[w]W=6/7/8 MHz depending of regulatory domain.

* Preliminary information; specifications still in early phases of development.

IEEE 802.11y-2008 is only licensed in the United States by the FCC; licensed spectrum allows for higher TX power

Von 1 Mbps auf über 1000 Mbps in 15 Jahren

IEEE 802.11 RADIO EVOLUTION

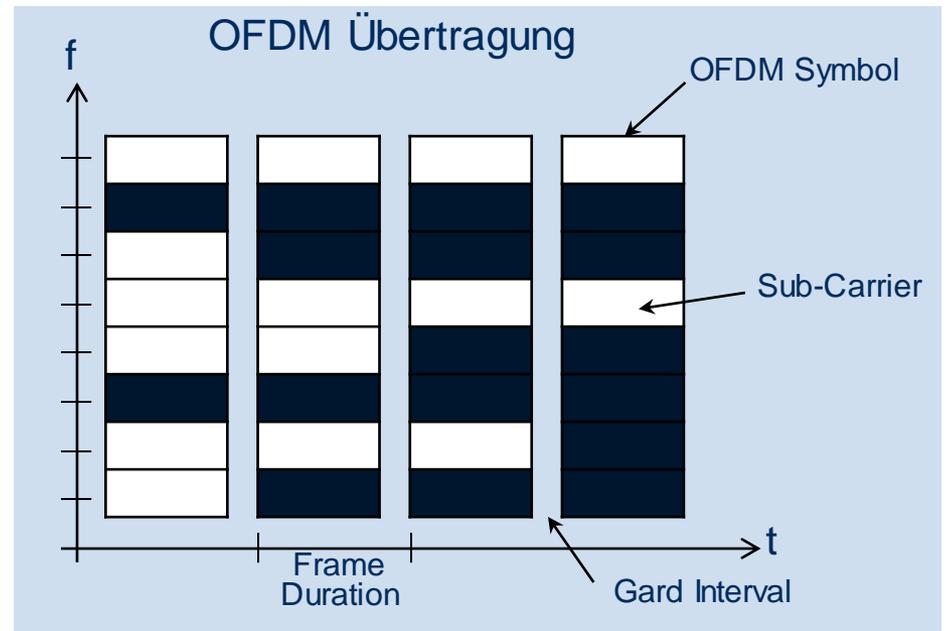
OFDM Prinzip

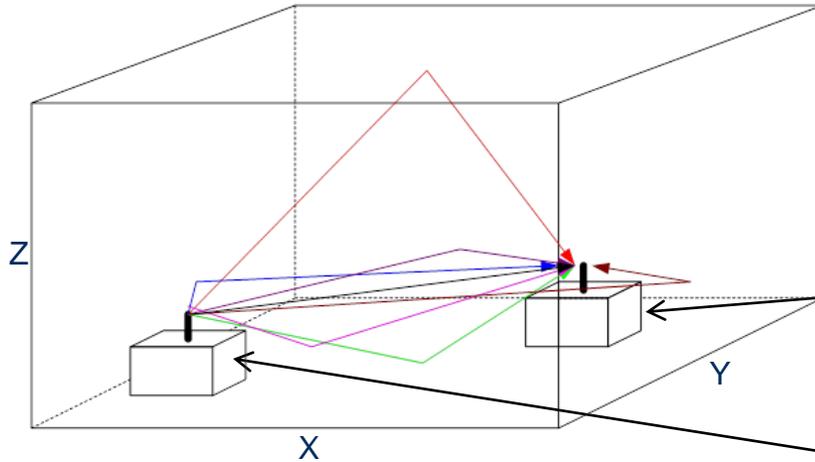
(Orthogonal Frequency Devison Multiplexing)



- Bit-Sequenzen werden mit einer diskreten Fourier-Transformation in OFDM Symbole umgewandelt.

	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



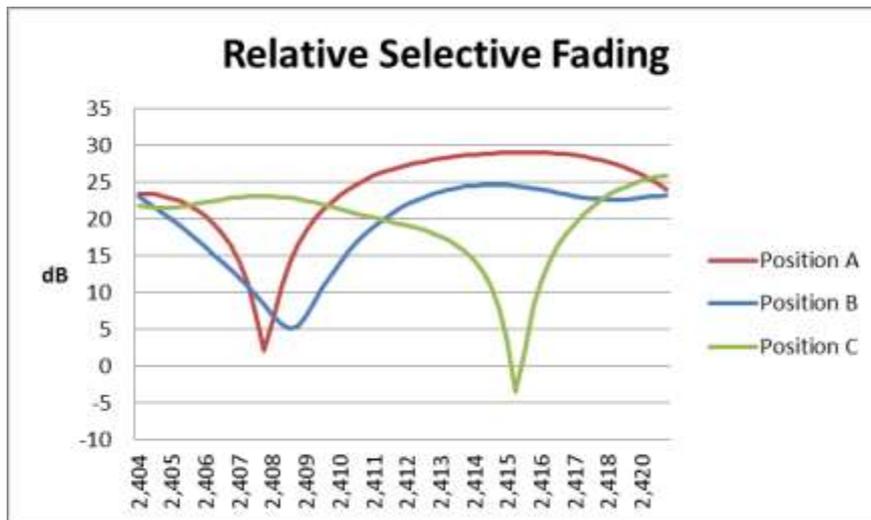


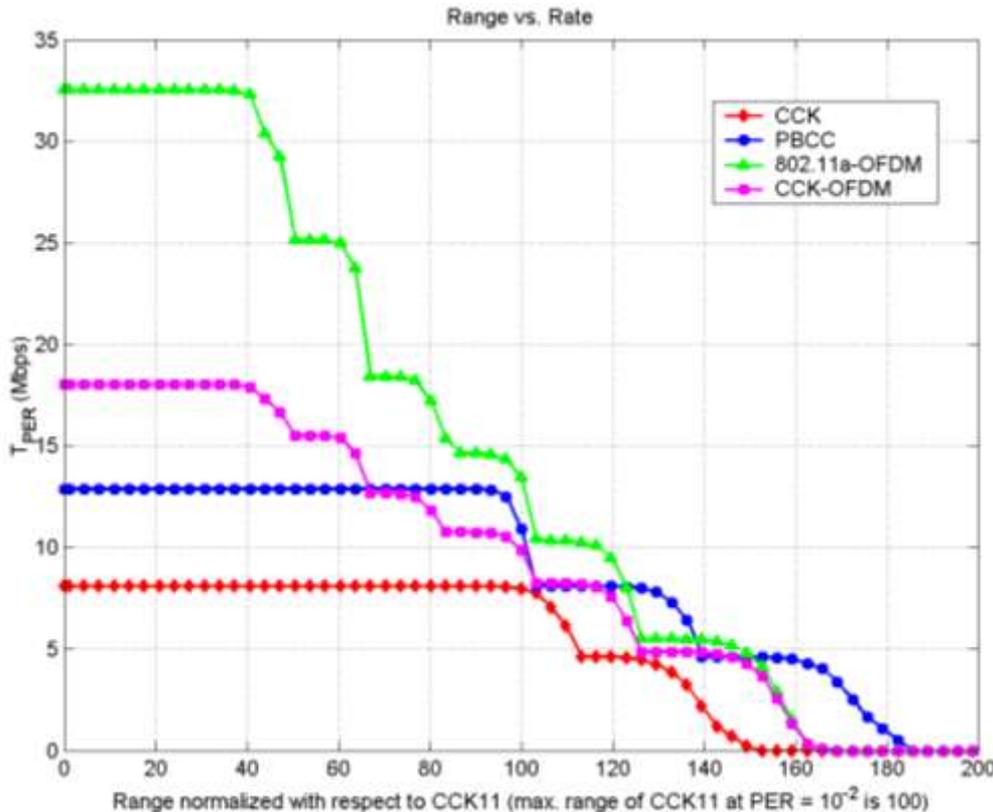
■ Simulation eines Raumes mit 30m x 21m x 6m (x, y, z):

■ Empfangsposition: x=20, y=14, z=1

■ Sendepositionen:

- Position A: x=6, y=14
 - Delay Spread: 23 to 100ns
- Position B x=9, y=14
 - Delay Spread: 27 to 102ns
- Position C x=4, y=14
 - Delay Spread 21 to 99ns





Vergleich von Übertragungsrates und Entfernung

- CCK (802.11b),
- OFDM("802.11a, g"),
- PBCC,
- CCK-OFDM

(Batra, Shoemake; Texas Instruments; Doc: 11-01-286r2)

■ IEEE802.11b DSSS/CCK

- Data rates:
1, 2, 5.5, 11Mbps
- 22 MHz channel spacing

■ IEEE802.11a/g OFDM

- Data rates:
6, 12, 18, 24, 36, 48, 54Mbps
- 48 sub-carriers
- Sub-carrier modulation:
BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
- Bit interleaved convolutional coding, $K=7$, $R=1/2$, $2/3$, $3/4$
- OFDM frame duration: $4\mu\text{s}$
- Guard interval: $0.8\mu\text{s}$
- 18MHz channel spacing
- 9-10 channels in 200MHz

■ MCS Optionen für IEEE 802.11a und IEEE 802.11g

Data Rate (Mbps)	Modulation	Coding Rate	Coded Bits per Subcarrier	Coded Bits per OFDM Symbol	Data Bits per OFDM Symbol
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	16-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

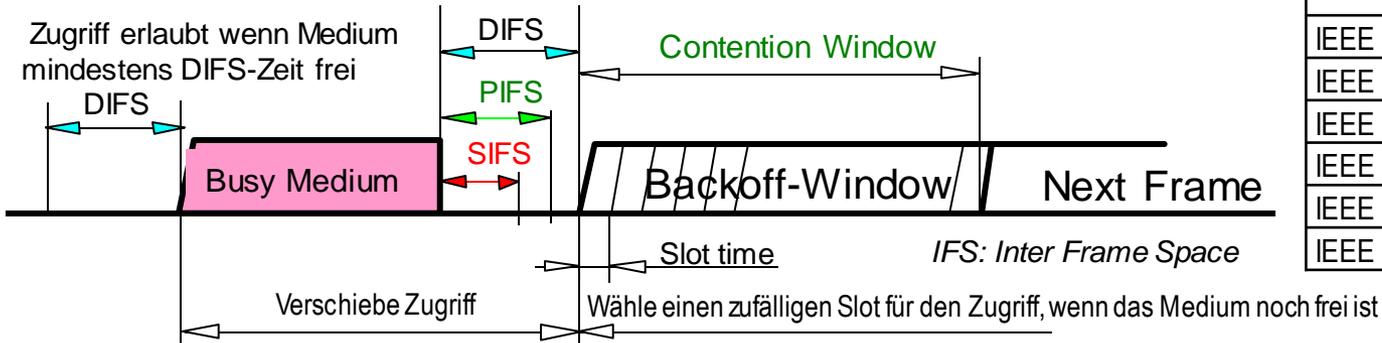
■ Realistisch erreichbare Nutzbandbreiten:

	(Mbps)	(Mbps)	(%)			(Mbps)	(Mbps)	(%)
BPSK	1	0.81	81%		BPSK	6	4.64	77%
QPSK	2	1.58	79%		BPSK	9	6.55	73%
CCK	5.5	4.07	74%		QPSK	12	8.31	69%
CCK	11	7.18	65%		QPSK	18	11.5	64%
					16-QAM	24	14.18	59%
		avg	74.8%		16-QAM	36	18.31	51%
					64-QAM	48	23.25	48%
					64-QAM	54	26.12	48%

Ursachen der geringen Effizienz von 802.11a/g bei höheren Bitraten



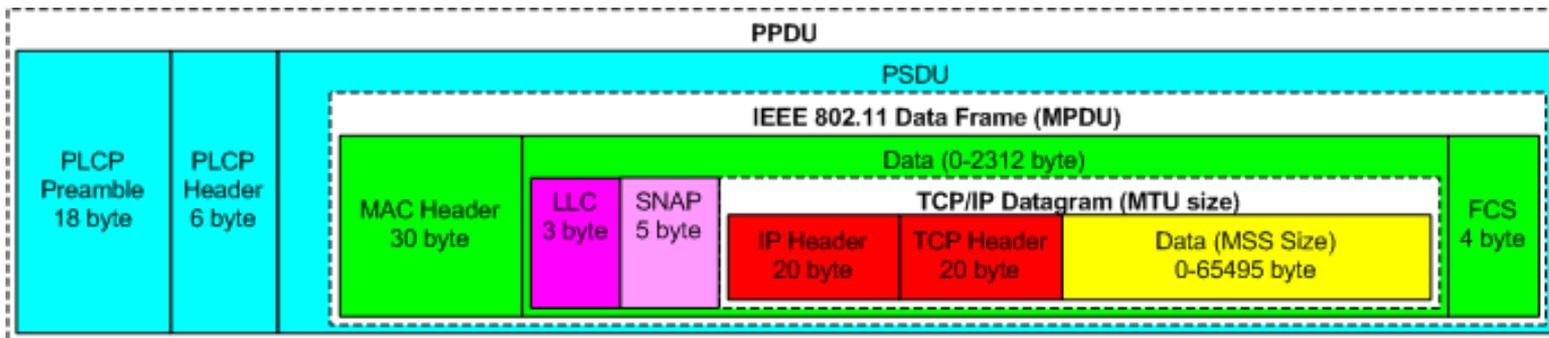
CSMA/CA zur Zugriffssteuerung



Standard	Slot time (µs)	DIFS (µs)
IEEE 802.11b	20	50
IEEE 802.11a (5G)	9	34
IEEE 802.11g	9 / 20	28 / 50
IEEE 802.11n	9 / 20	28 / 50
IEEE 802.11n (5G)	9	34
IEEE 802.11ac (5G)	9	34

- Inter Frame Space Zeiten sind für alle Bitraten gleich
 - Bei hohen Übertragungsraten/kleineren Nutzdateneinheiten ist der Verlust größer

Preamble zur Justierung der Übertragungsrates



- Selbst mit 'Short Preamble': PLCP Preamble in 1Mbps + Header in 2Mbps vergehen 96 µs bevor mit der eigentlichen Datenübertragung begonnen wird.

IEEE 802.11n-2009 (High Throughput)



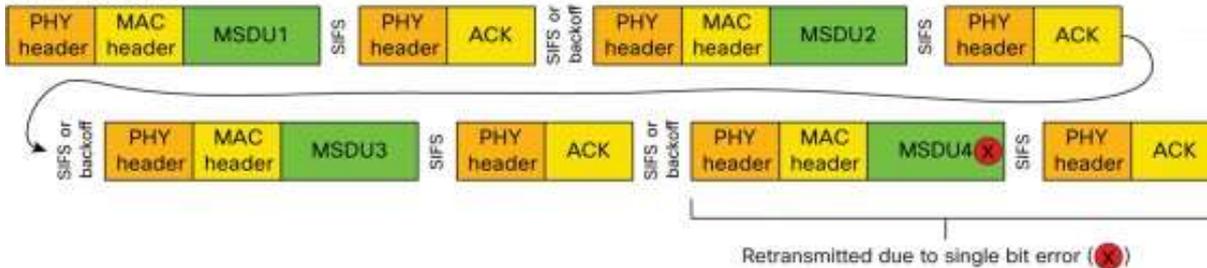
- Erweiterung zu IEEE 802.11-2007 (a/b/g) für erheblich höhere Übertragungsgeschwindigkeit bis zu 600 Mbps
- Einsatz von
 - 'Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO) zur Realisierung mehrerer paralleler Datenströme,
 - 40 MHz breite Übertragungskanäle zur Verdopplung des Durchsatzes
 - Frame Aggregation im MAC Layer zur Effizienzsteigerung des CSMA/CA MAC Protokolls
- MCS Optionen für IEEE 802.11n

MCS index	Spatial streams	Modulation type	Coding rate	Data rate (Mbit/s)			
				20 MHz channel		40 MHz channel	
				800 ns GI	400 ns GI	800 ns GI	400 ns GI
0	1	BPSK	1/2	6.50	7.20	13.50	15.00
1	1	QPSK	1/2	13.00	14.40	27.00	30.00
2	1	QPSK	3/4	19.50	21.70	40.50	45.00
3	1	16-QAM	1/2	26.00	28.90	54.00	60.00
4	1	16-QAM	3/4	39.00	43.30	81.00	90.00
5	1	64-QAM	2/3	52.00	57.80	108.00	120.00
6	1	64-QAM	3/4	58.50	65.00	121.50	135.00
7	1	64-QAM	5/6	65.00	72.20	135.00	150.00

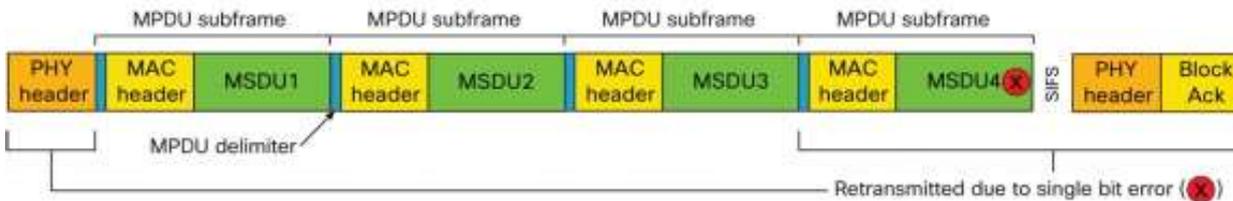
IEEE 802.11n Frame Aggregation



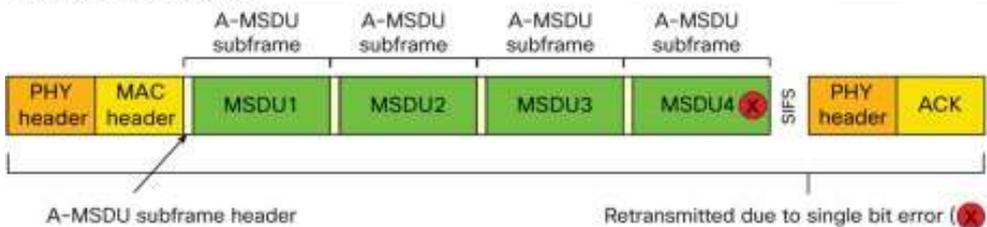
(a) No Aggregation



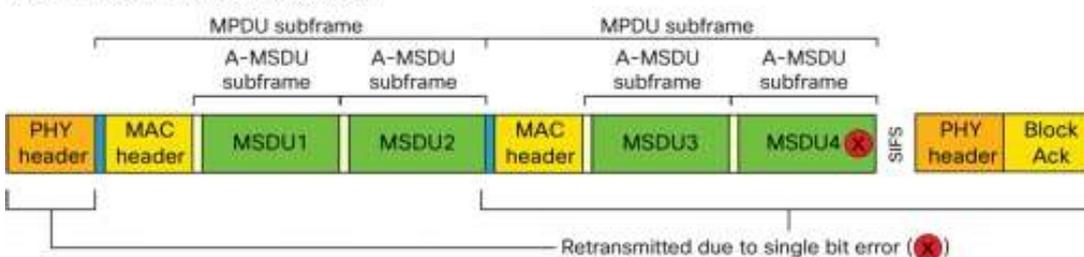
(b) A-MPDU Aggregation



(c) A-MSDU Aggregation



(d) A-MPDU of A-MSDU Aggregation



- Frame Aggregation fügt mehrere MAC Datenframes in einen größeren Rahmen, für das nur einmal das aufwändige Zugriffsverfahren benötigt wird.

■ A-MSDU Aggregation

- Mehrere MAC Service Datenfelder werden zusammengepackt und zusammen verschickt.
 - Bei einem Übertragungsfehler muss der ganze Frame wiederholt werden

■ A-MPDU Aggregation

- Mehrere MAC Protokoll Datenfelder werden zusammengekettet und in einem Rahmen verschickt.
 - Bei einem Übertragungsfehler braucht nur der betroffene Teil wiederholt werden.
 - Dafür wurde das in 802.11e eingeführte Blockquittierungsverfahren angepasst und verbessert.

■ **MIMO ist eine Technik die mit mehreren Antennen mehrere parallele Datenströme zwischen einem Access Point und einem Terminal überträgt.**

■ **IEEE 802.11n beschreibt mehrere Verfahren:**

■ **Spatial Multiplexing (SM)**

- Teilt die Datenübertragung in mehrere Teile auf
- Überträgt die Teile unabhängig über verschiedene Antennen

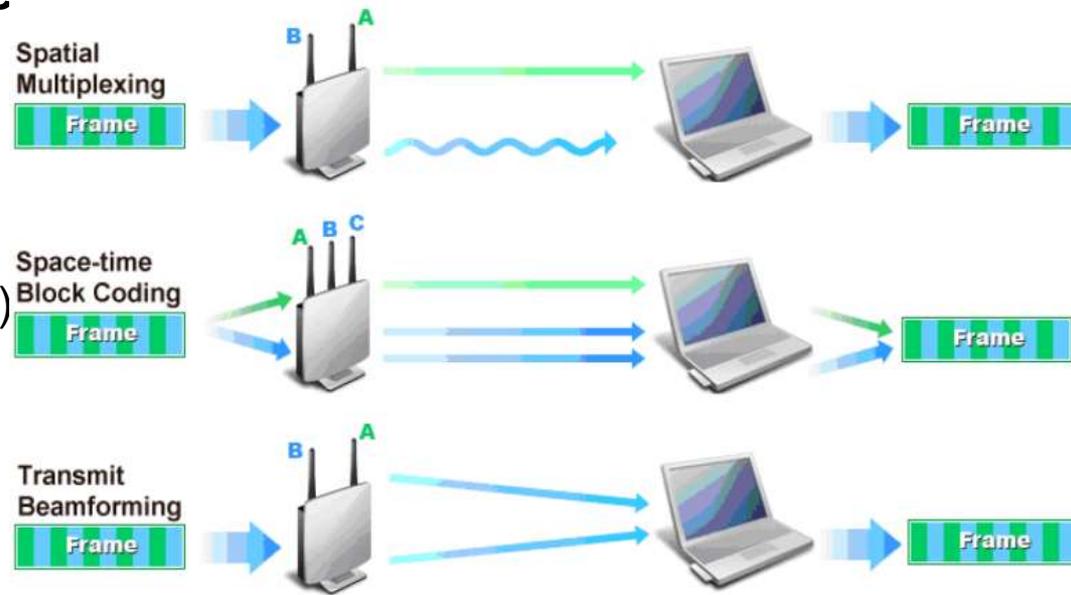
■ **Space-Time Block Coding (STBC)**

- Überträgt die Daten jeweils vollständig aber unterschiedlich codiert über mehrere Antennen
- Erhöht dadurch die Empfangssicherheit bei schwachen Signalen.
- Kann mit SM kombiniert werden

■ **Transmit Beamforming (TxBF)**

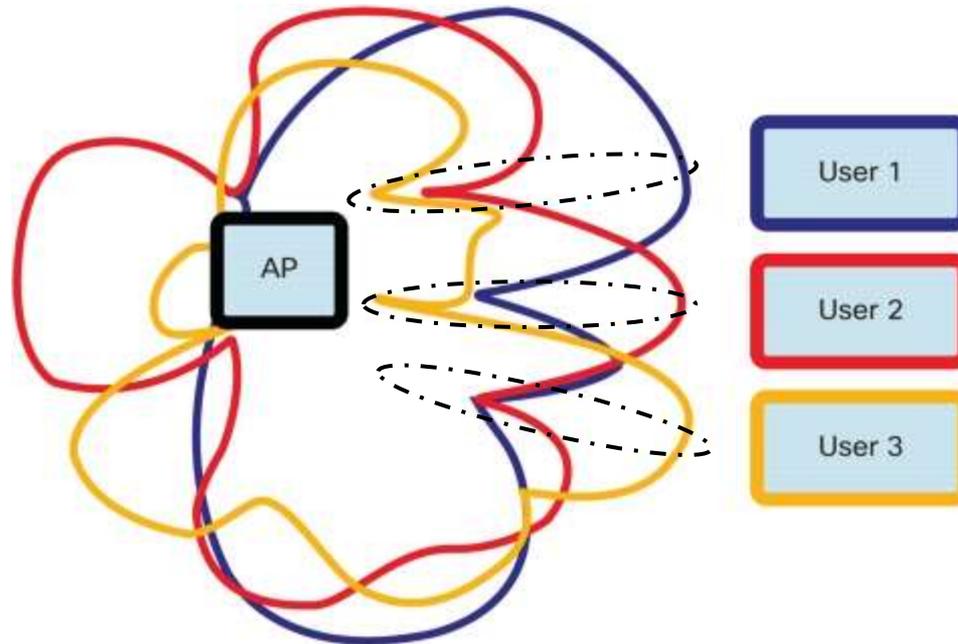
- Steuert durch unterschiedliche Ansteuerung der Antennen die Sendeleistung zielgerichtet zum gewünschten Empfänger wie eine elektronisch gesteuerte Richtantenne.
- Erhöht die Reichweite und reduziert unerwünschte Interferenzen

■ **Einzig ‘Spatial Multiplexing’ wird heute in der Wi-Fi Zertifizierung verlangt.**



- **Erweiterung von IEEE 802.11n für bis zu 6 930 Mbps im 5GHz Band**
- **Größere Kanalbandbreiten zusätzlich zu 20 MHz und 40 MHz**
 - 80 MHz und entweder 80+80MHz oder 160 MHz
 - Unterstützung von 80 MHz Kanalbandbreite ist Pflicht für alle 11ac Terminals
- **Mehr parallele MIMO Datenströme**
 - Unterstützung für bis zu 8 räumlich getrennte Ströme (vs. 4 in 802.11n)
- **Multi-user MIMO (MU-MIMO)**
 - Mehrere Terminals, jedes mit einer oder mehreren Antennen, können gleichzeitig unterschiedliche Datenströme empfangen
 - “Space Division Multiple Access” (SDMA)
 - Downlink MU-MIMO (ein Sender, mehrere Empfänger) ist die Option
- **Modulation**
 - Optionale Unterstützung von 256-QAM, rate 3/4 and 5/6
 - 64-QAM, rate 5/6 ist Maximum in 802.11n
- **Andere Verbesserungen**
 - Ein einzelnes Format für ‘sounding’ und ‘feedback’ für Beamforming
 - Die Einführung von Beamforming bei 802.11n scheiterte an den zu vielen Optionen
 - Koexistenzmechanismen for 20/40/80/160 MHz channels
 - Paralleler Betrieb von 802.11ac and 802.11a/802.11n Geräten

- Ein Access Point kann mit Multi-User MIMO gleichzeitig im gleichen Kanal mehrere Datenpakete zu verschiedenen Terminals schicken.



- Damit das funktioniert muss der Access Point die Ausbreitungsbedingungen zu allen Terminals genau kennen. Insbesondere ist es wichtig, die Nullstellen der räumlichen Ausbreitung so zu justieren, dass die Terminals kein für die anderen Terminals gedachten Signal empfangen.
- Da sich die Ausbreitungsbedingungen laufend ändern, ist eine stetige Messung und Korrektur notwendig.

IEEE 802.11ac MCS Optionen und Gesamtkapazität



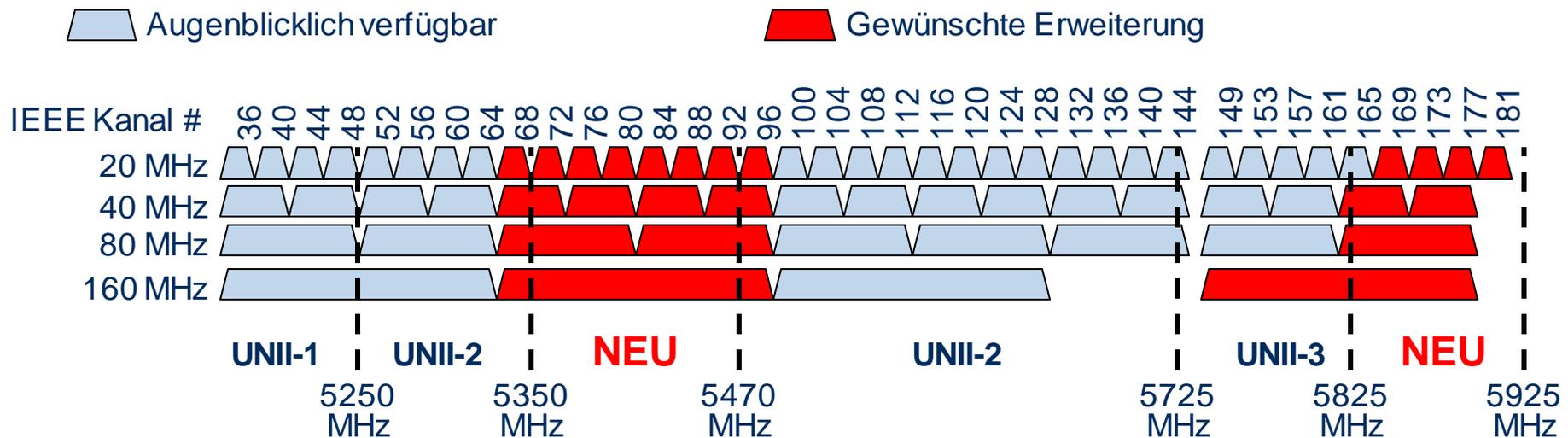
Theoretical throughput for single Spatial Stream (in Mbps)										
MCS	Modulation type	Coding rate	20 MHz channels		40 MHz channels		80 MHz channels		160 MHz channels	
			800ns GI	400ns GI	800ns GI	400ns GI	800ns GI	400ns GI	800ns GI	400ns GI
0	BPSK	1/2	6.5	7.2	13.5	15	29.3	32.5	58.5	65
1	QPSK	1/2	13	14.4	27	30	58.5	65	117	130
2	QPSK	3/4	19.5	21.7	40.5	45	87.8	97.5	175.5	195
3	16-QAM	1/2	26	28.9	54	60	117	130	234	260
4	16-QAM	3/4	39	43.3	81	90	175.5	195	351	390
5	64-QAM	2/3	52	57.8	108	120	234	260	468	520
6	64-QAM	3/4	58.5	65	121.5	135	263.3	292.5	526.5	585
7	64-QAM	5/6	65	72.2	135	150	292.5	325	585	650
8	256-QAM	3/4	78	86.7	162	180	351	390	702	780
9	256-QAM	5/6	N/A	N/A	180	200	390	433.3	780	866.7

Scenario	Typical Client Form Factor	PHY Link Rate	Aggregate Capacity
1-antenna AP, 1-antenna STA, 80 MHz	Handheld	433 Mbps	433 Mbps
2-antenna AP, 2-antenna STA, 80 MHz	Tablet, Laptop	867 Mbps	867 Mbps
1-antenna AP, 1-antenna STA, 160 MHz	Handheld	867 Mbps	867 Mbps
2-antenna AP, 2-antenna STA, 160 MHz	Tablet, Laptop	1.69 Gbps	1.69 Gbps
4-antenna AP, four 1-antenna STAs, 160 MHz (MU-MIMO)	Handheld	867 Mbps to each STA	3.39 Gbps
8-antenna AP, 160 MHz (MU-MIMO)			
-- one 4-antenna STA	Set-top Box,	3.39 Gbps to 4-antenna STA	6.77 Gbps
-- one 2-antenna STA	Tablet, Laptop,	1.69 Gbps to 2-antenna STA	
-- two 1-antenna STAs	PC, Handheld	867 Mbps to each 1-antenna STA	
8-antenna AP, four 2-antenna STAs, 160 MHz (MU-MIMO)	Digital TV, PC, Tablet, Laptop,	1.69 Gbps to each STA	6.77 Gbps

IEEE 802.11ac Kanalbelegung (5 GHz Band)



- Große Bandbreiten notwendig für hohe Datenraten
- Zur Vermeidung von Interferenz dürfen sich die Kanalbelegungen nicht überschneiden
- Das derzeitige 5 GHz Band ermöglicht nur 2x 160 MHz Kanäle
- Es wird angestrebt dass auch 5.35-5.47 GHz und 5.725-5.925 GHz durch WLAN Systeme benutzt werden dürfen.
- US Bandplan:



■ Basis WLAN Werte:

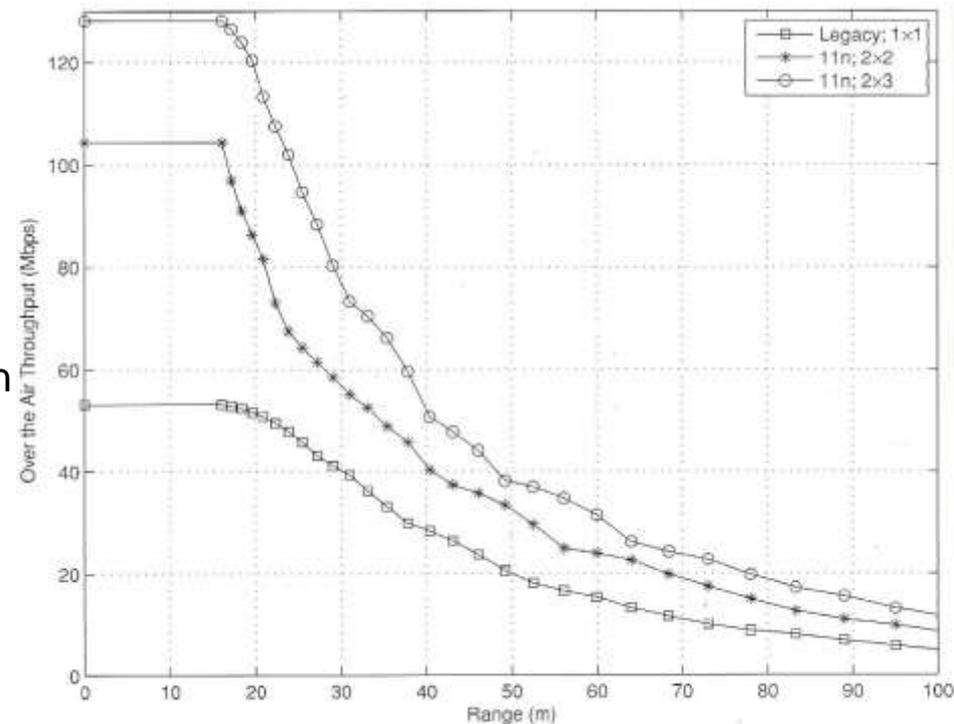
- Sendeleistung 30..50 mW
- Reichweite:
 - innen: 30m, außen: 300m
 - hängt stark von der Umgebung ab
- Max. Terminals per AP: ~ 35;
 - verursacht durch CSMA/CA Eigenheiten
 - neuere Installationen: ~ 10
- Tatsächlicher Durchsatz:
 - bis zu ~ 120 Mbps (.11n, 2x2MIMO)
 - ~ 27 Mbps (.11g)
 - ~ 5 Mbps (.11b)

■ Reichweitenerhöhung:

- APs offen angebracht, bessere Antennen, mehr MIMO

■ Durchsatzerhöhung:

- kleinere Zellen, mehr APs, Sektorantennen
 - Nicht vergessen die Sendeleistungen zu reduzieren um Interferenzen klein zu halten.



Throughput versus range comparison of receive diversity.

Source E. Perahia, R. Stacey, NextGeneration Wireless LANs, Cambridge University Press 2008.

Regulatorische Rahmenbedingungen

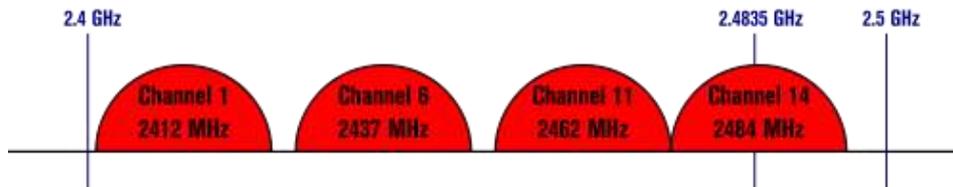
WLAN SPEKTRUM IN EUROPA

2.4 GHz WLAN Spektrum

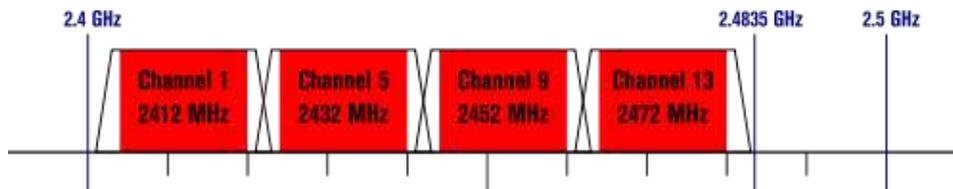
- **IEEE 802.11 g/n erlaubt bessere Spektrumsnutzung**
 - In einer reinen g/n Installation können die Kanäle 1-5-9-13 verwendet werden

Non-Overlapping Channels for 2.4 GHz WLAN

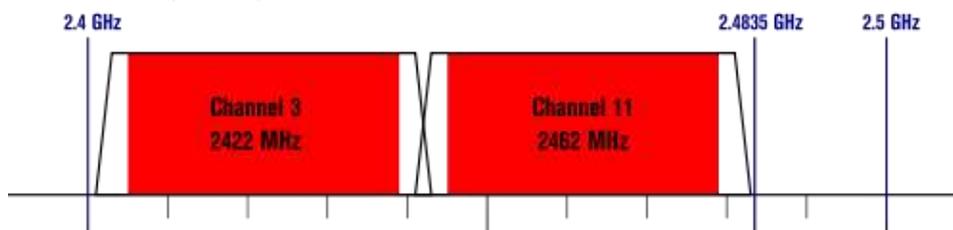
802.11b (DSSS) channel width 22 MHz



802.11g/n (OFDM) 20 MHz ch. width – 16.25 MHz used by sub-carriers



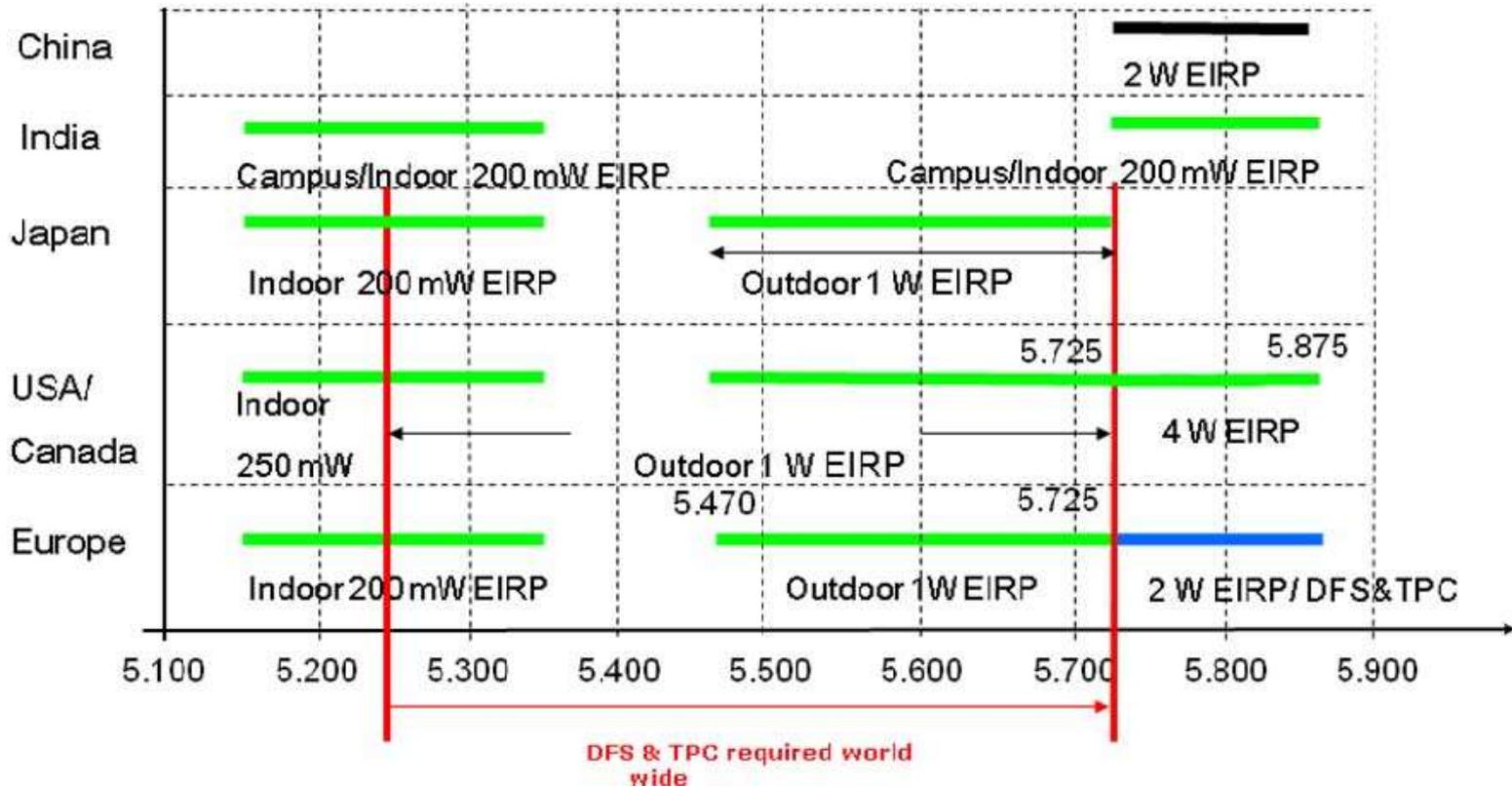
802.11n (OFDM) 40 MHz ch. width – 33.75 MHz used by sub-carriers



5 GHz WLAN Spektrum



■ WLAN Spektrumszuweisungen weltweit



5 GHz Band in Europa heute

- **Schon seit 2005 waren 455 MHz WLAN Spektrum in Europa ausgewiesen**
 - Der Bereich über 5 725MHz (150MHz) wird für unlicenzierte, aber angemeldete Richtfunksysteme verwendet.
- **Große Bereiche des 5GHz WLAN Spektrum werden mit anderen Diensten gemeinsam genutzt**
 - Dafür werden TPC (Transmission Power Control) und DFS (Dynamic Frequency Selection) eingesetzt
- **TPC führt zu einer Halbierung des Interferenzpegels durch benachbarte Stationen**
- **DFS wird verwendet um die Benutzung von Frequenzen durch RADAR Systeme zu erkennen und diese Frequenzen zu vermeiden**
 - DFS führt darüberhinaus zu einer in etwa gleichartigen Auslastung des Spektrums
- **Funktionaler Ablauf von DFS**
 - *Channel Availability Check*
 - Access Point untersucht das Spektrum auf Existenz von RADAR Systemen für zumindest 60s
 - *In-Service Monitoring*
 - Jeder genutzte Kanal wird laufend auf das Auftreten eines RADAR Signals überprüft
 - *Channel Shutdown*
 - Wenn ein RADAR Signal erkannt wird, stellt der Access Point den Betrieb auf dem Kanal innerhalb 10s ein und sucht einen anderen freien Kanal.
 - *Non-Occupancy Period*
 - Ein Kanal, in dem ein RADAR Signal erkannt wurde, wird für mindestens 30min nicht mehr benutzt.

Nachteile der Rückwärtskompatibilität zu IEEE 802.11b

***Lasst uns IEEE 802.11b
beerdigen!***

Warum IEEE 802.11b?

IEEE 802.11b hat mehr Reichweite

IEEE 802.11b 1Mbps im Vergleich zu IEEE 802.11g 6Mbps

■ In einer perfekten 'Line Of Sight' (Freifeld) Umgebung

- 802.11b 1Mbps bietet 12-32% mehr Reichweite als 802.11g 6Mbps

■ In 'normalen' Innenräumen

- 802.11g 6Mbps bietet in der Theorie 12% mehr Reichweite als 802.11b 1 Mbps
 - SNR 1Mbps = 9dB, 6Mbps = 7dB für 10% PER 1000B packets

■ Wenn es überhaupt keine 'Line Of Sight' gibt:

- 802.11g 6Mbps bietet mehrfache Reichweite von 802.11b 1Mbps
 - 802.11g ist bis zu 5-fach besser
 - SNR 1Mbps = 36dB, 6Mbps = 11dB für 10% PER1000B packet

In realen Einsatzfeldern dürfte der Reichweitevorteil von IEEE 802.11b im Vergleich zu IEEE 802.11g nicht existieren.

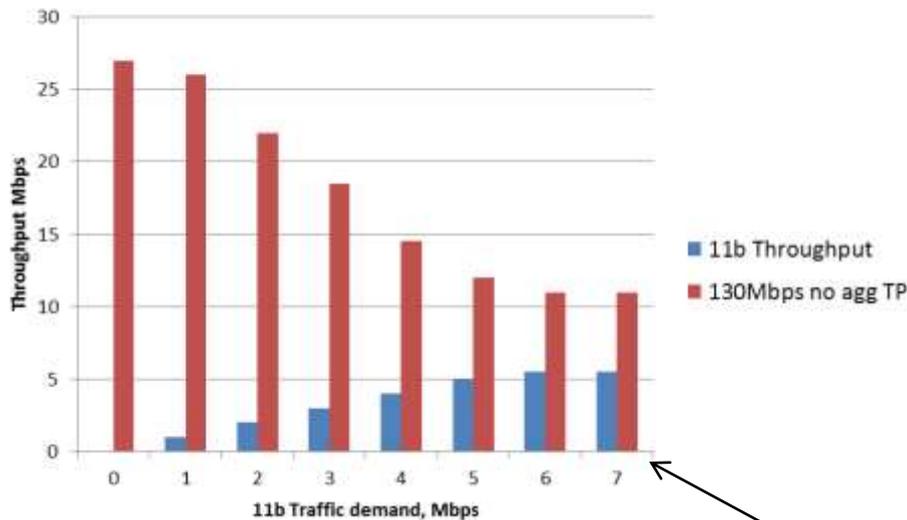
- Noch sind nicht alle Experten vollständig überzeugt...

Warum kein IEEE 802.11b

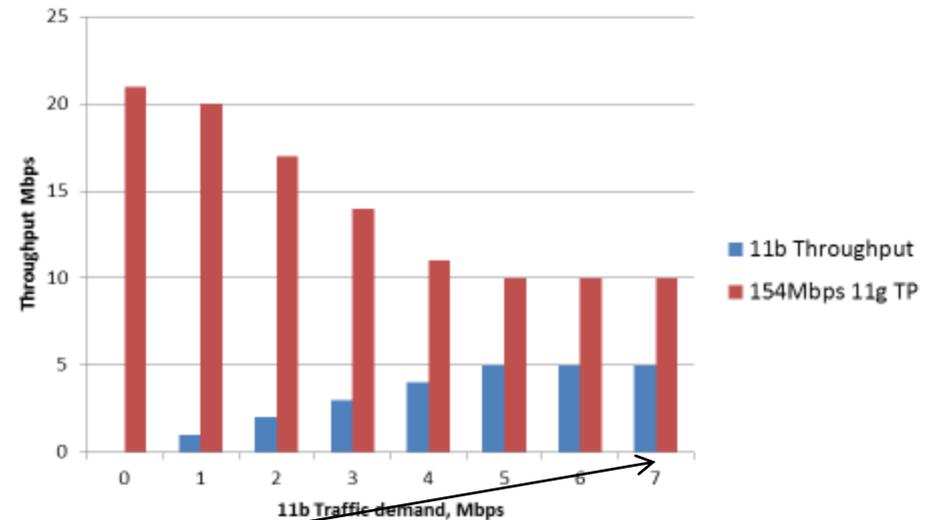
Datendurchsatz von 802.11 g/n bricht ein

- Mit einem 802.11b Terminal bricht der Datendurchsatz eines 802.11 b/g/n Access Points erheblich ein.
 - Theoretische Analyse, die Praxis dürfte noch schlechter sein

130Mbps 11n and 11Mbps 11b Throughputs



54Mbps 11g and 11Mbps 11b Throughputs



- Gesamtdurchsatz bricht auf 15 Mbps ein, wenn ein 802.11b Terminal mit einem 802.11g Terminal die Kapazität aufteilt.
- Bei Mixed-Mode reduziert sich Durchsatz von 802.11n auf 36 Mbps und 802.11g auf 27Mbps

Schlussfolgerung

Problem IEEE 802.11b

- **Die Rückwärtskompatibilität zu 802.11b zerstört den verfügbaren WLAN Durchsatz**
- **IEEE 802.11b hat eigentlich keine Vorteile zu IEEE 802.11g**
 - Reichweitenvorteile sind eher theoretisch
 - 802.11g ist wesentlich robuster in problematischen Umgebungen
 - Durch die erheblich kürzere Übertragungszeiten ist der Stromverbrauch von 802.11g Chip-sets trotz größerer Komplexität eher geringer
- **Abschalten von 802.11b hilft wenn Kapazitätsprobleme im WLAN auftauchen**
 - Probleme im WLAN sind häufig 'Kapazitätsprobleme', d.h. zu viele Anwendungen konkurrieren um das gleiche Medium
- **Das Problem ist erkannt, aber es wird noch viele Jahre dauern, bis IEEE 802.11b offiziell beerdigt wird.**

... aber wir können den IEEE 802.11b Kompatibilitätsmodus bereits heute in unseren Access Points und Routern abschalten!

IEEE 802.11 Standards

EVOLUTION DER SPEZIFIKATIONEN

IEEE 802.11 Spezifikationen



IEEE 802.11-1997	Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications	Jul 1997
IEEE 802.11a	High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band (54 Mbps in 5GHz)	Sep 1999
IEEE 802.11b	Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band (11 Mbps in 2.4 GHz)	Sep 1999
IEEE 802.11c	<i>Support of the Internal Sublayer Service to cover bridge operations with 802.11 MAC => <u>IEEE 802.1D</u></i>	Oct 1998
IEEE 802.11d	Specification for operation in additional regulatory domains	Jun 2001
IEEE 802.11e	Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements	Nov 2005
IEEE 802.11F	Inter-Access Point Protocol => <u>Withdrawn February 2006</u>	Jul 2003
IEEE 802.11g	Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band (54 Mbps in 2.4 Ghz)	Jun 2003
IEEE 802.11h	Spectrum and Transmit Power Management Extensions in the 5 GHz band in Europe	Oct 2003
IEEE 802.11i	Medium Access Control (MAC) Security Enhancements	Jul 2004
IEEE 802.11j	4.9 GHz–5 GHz Operation in Japan	Oct 2004
<i>IEEE 802.11-2007</i>	<i>Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications</i>	<i>Jun 2007</i>



IEEE 802.11 Spezifikationen, Fortsetzung

IEEE 802.11-2007	Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications	Jun 2007
IEEE 802.11k	Radio Resource Measurement of Wireless LANs	Jun 2008
IEEE 802.11n	Enhancements for Higher Throughput (4x 150 Mbps in 2.4/5GHz)	Oct 2009
IEEE 802.11p	WAVE—Wireless Access for the Vehicular Environment	Jul 2010
IEEE 802.11r	Fast Basic Service Set (BSS) Transition	Jul 2008
IEEE 802.11s	Mesh Networking	Sep 2011
IEEE 802.11T	Wireless Performance Prediction (WPP) => <u>Cancelled</u>	
IEEE 802.11u	Interworking with External Networks	Feb 2011
IEEE 802.11v	IEEE 802.11 Wireless Network Management	Feb 2011
IEEE 802.11w	Protected Management Frames	Sep 2009
IEEE 802.11y	3650–3700 MHz Operation in USA	Nov 2008
IEEE 802.11z	Extensions to Direct Link Set-up (DLS)	Oct 2010
IEEE 802.11-2012	Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications	Mar 2012

IEEE 802.11 Spezifikationen, Fortsetzung



IEEE 802.11-2012	Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications	Mar 2012
IEEE 802.11aa	MAC Enhancements for Robust Audio Video Streaming	May 2012
IEEE 802.11ad	Enhancements for Very High Throughput in the 60 GHz Band	Dec 2012
IEEE 802.11ae	Prioritization of Management Frames	Apr 2012
IEEE 802.11ac	Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz	~03/2014
IEEE 802.11af	TV White Spaces Operation	~ 03/2014
P802.11ah	Sub 1 GHz license-exempt operation	~ 03/2016
P802.11ai	Fast Initial Link Set-up	~ 11/2015
P802.11aj	China Milli-Meter Wave (CMMW)	~ 10/2016
P802.11ak	Enhancements For Transit Links Within Bridged Networks	~ 2016
P802.11aq	Pre-Association Discovery (PAD)	~ 05/2016

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

FRAGEN, KOMMENTARE?