

# **Protokolle Ausarbeitung - Vergleich diverser WLAN-Standards**

Jonas Wenner 3752607

Jens Kolz 3752518

13. Februar 2020

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Thema</b>	<b>4</b>
<b>2 Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>3 Vorwissen</b>	<b>5</b>
3.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) . . . . .	5
3.1.1 Funktionsweise . . . . .	5
3.2 Multiple Input Multiple Output (MIMO) . . . . .	7
3.2.1 Funktionsweise . . . . .	7
3.3 Coderate . . . . .	8
<b>4 IEEE 802.11n</b>	<b>9</b>
4.1 Techniken . . . . .	9
4.2 Fazit . . . . .	9
<b>5 IEEE 802.11ac</b>	<b>10</b>
5.1 Techniken . . . . .	10
5.1.1 802.11ac Wave 1 . . . . .	10
5.1.2 802.11ac Wave 2 . . . . .	11
5.2 Fazit . . . . .	12
<b>6 IEEE 802.11ad</b>	<b>13</b>
6.1 Techniken . . . . .	13
6.2 Fazit . . . . .	13
<b>7 IEEE 802.11ah</b>	<b>14</b>
7.1 Techniken . . . . .	14
7.2 Fazit . . . . .	14
<b>8 IEEE 802.11ay</b>	<b>15</b>
8.1 Techniken . . . . .	15
8.2 Fazit . . . . .	15
<b>9 IEEE 802.11be</b>	<b>16</b>
9.1 Techniken . . . . .	16
9.2 Fazit . . . . .	16
<b>10 Vergleich</b>	<b>17</b>
10.1 Entwicklungszeitraum und Entstehung . . . . .	17
10.2 Kanalnutzung und Reichweite . . . . .	18
10.3 Datenübertragungsrate . . . . .	19
10.4 Zukünftiges Potenzial und Anwendungsszenarien . . . . .	21

<b>11 Fazit</b>	<b>22</b>
<b>12 Abbildungen</b>	<b>23</b>
<b>13 Quellenverzeichnis</b>	<b>24</b>
<b>Akronyme</b>	<b>27</b>

# 1 Thema

Vergleichen und bewerten Sie die Wireless Local Area Network (WLAN) Standards IEEE 802.11ac, IEEE 802.11ad und IEEE 802.11ah detailliert und zeigen sie die jeweiligen Anwendungsbereiche auf. Gehen Sie auch auf die zukünftigen Entwicklungen mit beispielsweise IEEE 802.11ay und IEEE 802.11be ein.

## 2 Einleitung

Wer sein Heim und Büro oder auch Produktionsstraßen und Maschinen drahtlos vernetzen will, verwendet meist WLAN als Übertragungstechnik. Firmen und Endkunden haben schnell den IEEE- Standard 802.11 und seine Nachfolger als Übertragungsbasis akzeptiert. Die stetige Entwicklung der 802.11-Standards soll die entstehenden Probleme beheben und neue Einsatzgebiete schaffen. Verantwortlich für die Entwicklung ist das Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) in New York.

Anfangs mussten Laptops noch mit WLAN-Sticks nachgerüstet werden und konnten Datenraten von maximal 1 bis 2 Mbit/s übertragen, wodurch das normale Ethernet unangefochten blieb. Doch heutzutage gibt es kaum ein Gerät ohne drahtloser Verbindungsmöglichkeit. Oft kaufen Kunden jedoch unpassende Geräte, die zwar irgendeinen WLAN-Standard unterstützen, jedoch nicht optimal für den entsprechenden Einsatz geeignet sind. Dadurch durchdringen die Funksignale bestehende Hindernisse nicht. Ebenso kann die Datenübertragungsrate für die Anforderungen zu niedrig sein. Als Resultat daraus muss oft mit Signalverstärkern und anderen Drittgeräten gearbeitet werden.

Diese Ausarbeitung soll die unterschiedlichen Eigenschaften einiger ausgewählter Standards der 802.11-Reihe beschreiben und so deren Vor- und Nachteile sowie angedachte Einsatzgebiete aufzeigen.

## 3 Vorwissen

Einige der in diesem Thema referenzierten IEEE 802.11-Standards beziehen sich auf vorherige Entwicklungen der gleichen Standardisierungs-Familie oder benötigen zur Analyse eine Erklärung der genutzten Übertragungsmethoden und Techniken. Da manche der betroffenen Standards und Methoden nicht als Kernthema der Ausarbeitung behandelt werden, folgt hier eine verkürzte Übersicht der entsprechenden Eigenschaften.

### 3.1 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) ist ein Modulationsverfahren, welches als Basismodulation für einige WLAN-Standards verwendet wird.

#### 3.1.1 Funktionsweise

Der zu übertragende Datenstrom (mit hoher Datenrate) wird zunächst auf mehrere schmalbandige orthogonale Unterträger mit geringeren Datenraten aufgeteilt. Orthogonal bedeutet hier, dass das Maxima eines Unterträgers auf gleicher Frequenz mit den Nulldurchgängen der jeweiligen benachbarten Unterträger liegt. [11]

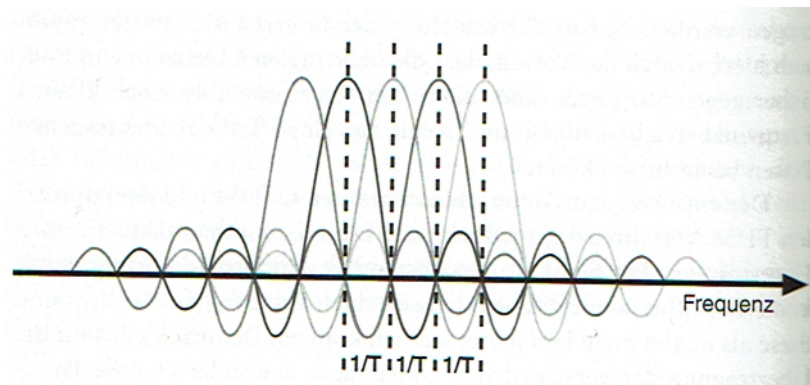


Abbildung 1: Darstellung des OFDM-Prinzips mit mehreren Unterträgern [12]

**Erhöhung der Datenrate:** Durch das Aufteilen des originalen Datenstroms in  $n$  Unterträger, kann die Datenrate des übertragenen Signals deutlich erhöht werden, da mehrere Dateneinheiten parallel übertragen werden können. Es ist jedoch zu beachten, dass nicht alle Unterträger der OFDM-Modulation zur Datenübertragung genutzt werden. Der *OFDM-Kanal 0* markiert zum Beispiel die Mittenfrequenz des verwendeten Kanals, indem über ihn lediglich

eine Folge von 0 übertragen wird. Neben diesem Kanal und den für Nutzdaten reservierten *Datenkanälen* existieren noch *Pilotkanäle*, die die Referenzphase zum Steuern der OFDM-Datenübertragung übertragen. Lediglich die *Datenkanäle* tragen zur Erhöhung der Datenrate bei. Existieren  $n$  solcher Kanäle, wird die Datenrate um den Faktor  $n$  erhöht. [11]

Der Datenstrom der einzelnen Unterträger wird nach dem Aufteilen auf die Datenkanäle weiter mit anderen Modulationsverfahren, wie zum Beispiel BPSK oder 16-QAM moduliert, um weitere Abstufungen der Datenrate zu ermöglichen. Bevor das Datensignal letztendlich übertragen wird, werden alle verwendeten Unterträger überlagert, sodass ein breitbandiger Träger entsteht, der schließlich übertragen wird. [11]

**Anmerkung:** Aufgrund der Orthogonalität der Unterträger können diese nach dem Empfangen des Signals wieder aufgeteilt und so die Nutzdaten identifiziert werden.

Wichtig ist ebenfalls, dass aufgrund der Orthogonalität der Einzelträger im Vergleich zum Nicht-Orthogonalen Frequency Division Multiplexing (FDM) Bandbreite eingespart werden kann. [11]

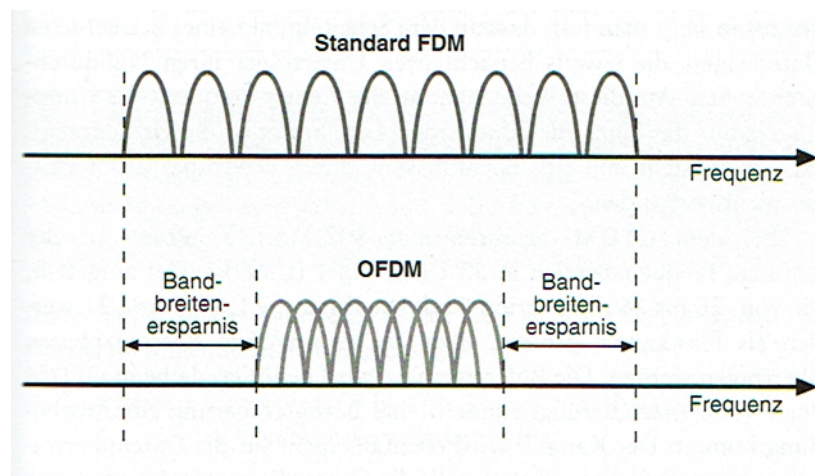


Abbildung 2: Darstellung des OFDM-Prinzips im Gegensatz zu FDM [13]

## 3.2 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

Multiple Input Multiple Output (MIMO) stellt ein Übertragungssystem zur drahtlosen Übertragung von Daten dar. Im Vergleich zu anderen Übertragungssystemen, wie das Single Input Single Output (SISO)-System, werden durch MIMO aufgrund von paralleler Übertragung mehrerer Signale höhere Datenraten oder Reichweiten erreicht, indem der *Signal-Rausch-Abstand* erhöht wird. [14]

### 3.2.1 Funktionsweise

Für MIMO-Übertragungen wird das Phänomen des *Multipath Fadings* ausgenutzt, welches bei Einzelantennen als Störfaktor angesehen wird. [14]

**Multipath Fading:** Das Phänomen beschreibt, dass aufgrund von Signalreflexionen und Laufzeitunterschieden des ausgesendeten Signals, das Signal an der Empfangsantenne, durch Überlagerung von phasenverschobenen Sendesignalen, verändert erkannt wird. [15]

Beim MIMO-System werden über mehrere Antennen unterschiedliche Daten (und damit unterschiedliche Signale) parallel zum Empfangsgerät gesendet. Hier wird das Multipath Fading ausgenutzt, indem über die unterschiedlichen Übertragungsstrecken, auch ohne Reflexion, eine Phasenverschiebung der einzelnen Signale erzeugt wird. Diese durch Multipath Fading phasenverschobenen Empfangssignale können dann durch eine Empfangslogik im empfangenden Gerät wieder in die ausgesendeten Signale aufgeteilt werden. [14]

**Wichtig:** Damit die Empfangslogik dies erreichen kann, müssen die Antennen der jeweiligen Sende- und Empfangseinheit untereinander mindestens den Abstand einer halben Wellenlänge zu den zu übertragenden Signale einhalten. [14]

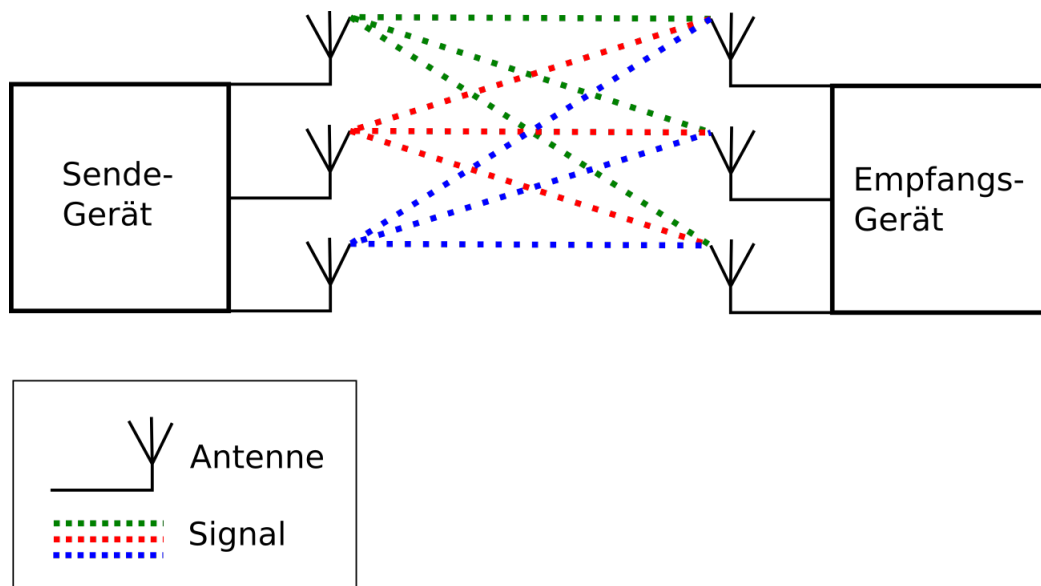


Abbildung 3: Darstellung des MIMO-Prinzip mit jeweils drei Antennen [16]

### 3.3 Coderate

Die Coderate wird als Bruch angegeben und beschreibt in WLAN-Systemen wie die Anzahl der Nutzdaten-Bits eines Übertragungssignals im Verhältnis zur gesamten Länge der übertragenen Bitfolge steht. Daraus lässt sich ableiten wie viele Fehlerkorrektur-Bits pro Übertragung verwendet werden.

Die Coderate spielt damit eine Rolle in der Berechnung der maximal möglichen Datenübertragungsrate. [17]

**Beispiel:** Eine Coderate von  $\frac{3}{4}$  für ein Sendesignal gibt an, dass 75% der übertragenen Bits Nutzdaten enthalten.



## 4 IEEE 802.11n

Der Standard 802.11n ist, obwohl er nicht Kernthema der Ausarbeitung sein soll, gesondert zu betrachten. Die für diesen Standard eingeführten Technologien und Methoden ermöglichen einerseits vorher nicht umsetzbare Eigenschaften wie die nochmals erhöhte Datenübertragungsrate, andererseits wird für neuere Standardisierungen immer wieder auf Methoden und Erkenntnisse des 802.11n-Standards zurückgegriffen. 802.11n definiert dabei Techniken im 2,4 und 5 GHz-Bereich. [5]

### 4.1 Techniken

Der WLAN-Standard 802.11n ermöglicht im Vergleich zu vorherigen Standards Datenraten von bis zu 600 MBit/s. Möglich wird dies durch die Verwendung der MIMO-Technologie mit maximal 4 Datenströmen. Die Datenrate von 600 MBit/s wird dabei durch das Zusammenschalten von 4 Datenströmen im MIMO-System erreicht. [18]

Für die Modulation der Daten wird OFDM verwendet. Statt, wie bei 802.11a/g den Übertragungskanal in 48 Datenkanäle und 5 Pilotkanäle aufzuteilen, erfolgt hier eine Aufteilung in 52 Datenkanäle und 5 Pilotkanäle. Weiterhin wurde die mögliche Coderate zu  $\frac{5}{6}$  erhöht. Die einzelnen OFDM-Datenströme können, abhängig von der Übertragungsqualität, mit BPSK, QPSK, 16-QAM oder 64-QAM moduliert werden. [18]

Weiterhin definiert der Standard im 2,4 und 5 GHz-Band erstmals Kanalbreiten von 40 Megahertz (MHz) pro Kanal im Gegensatz zu den vorher bekannten 20-MHz-breiten Kanälen. Die 40 MHz-Kanäle werden dabei aus zwei 20 MHz-Kanälen zusammengelegt. Dadurch ergibt sich für einen 40 MHz- Kanal ebenfalls eine Verdopplung der OFDM-Datenkanäle. [18]

### 4.2 Fazit

Der 802.11n-Standard befasst sich hauptsächlich mit der Aufgabe, die mögliche Datenrate erneut zu erhöhen. Erreicht wird dies durch zahlreiche Anpassungen des Layer 1 im OSI-Referenzmodell, die in neuen Standards wieder aufgegriffen und weiterentwickelt wurden (vergleiche MIMO-System). Diese Änderungen wurden jedoch erst durch die ständige Weiterentwicklung der Funktechnik ermöglicht. Durch empfindlichere Empfangselektronik können zum Beispiel die OFDM-Unterträger schmalbandiger gestaltet werden. Ebenfalls ermöglichte die Weiterentwicklung von Signal-verarbeitenden Elementen das Einführen des MIMO-Systems, welches eine erweiterte Empfangslogik benötigt.

## 5 IEEE 802.11ac

Dieser Standard ist der Nachfolger von IEEE 802.11n und ermöglicht erneut schnellere Übertragungsraten. Hier sah das IEEE einige Probleme im 2,4 GHz-Band, wie zum Beispiel die große Anzahl an Kanalüberlappungen der 20 MHz-Kanäle oder die Auslastung des Bandes durch Bluetooth oder Mikrowellenherde. Daher wurde sich bei der Spezifikation des 802.11ac-Standards auf das 5 GHz-Band beschränkt. Die größere Anzahl an überlappungsfreien Kanälen in diesem Band ermöglicht dabei eine bessere Zusammenlegung der einzelnen 20 MHz-Kanäle zur Erhöhung der theoretisch möglichen Datenrate. [19]

Der IEEE 802.11ac-Standard wurde dabei in zwei verschiedenen Teilen definiert:

- Wave 1 (2013)
- Wave 2 (2015)

### 5.1 Techniken

Die Neuerungen und verwendeten Techniken des 802.11ac-Standards befassen sich erneut mit Anpassungen der WLAN-Layer-1-Funktionalität. Dabei werden zunächst durch Wave 1 kleinere Änderungen bezüglich der Kanalzusammenlegung und Modulationstechnik durchgeführt, im zweiten Schritt wird dem MIMO-System durch Wave 2 die vorher nicht bekannte Multi-User-Funktionalität hinzugefügt. Die beiden Teilstandards sind dabei so ausgelegt, dass Wave 2 sämtliche Änderungen, die mit Wave 1 getätigt wurden, beinhaltet.

#### 5.1.1 802.11ac Wave 1

Im ersten Teilstandard sorgt die Erweiterung der Kanalzusammenlegung auf maximal 80 MHz-breite Kanäle für eine höhere mögliche Datenrate im Vergleich zu bereits existierenden 802.11-Standards. Weiterhin wurde für die Modulation der OFDM-Unterträger zu den aus 802.11n bekannten Modulationsarten die Methode 256-QAM mit einer Coderate von  $\frac{3}{4}$  und  $\frac{5}{6}$  hinzugefügt, welche ebenfalls die Datenrate positiv beeinflusst. [19] [8]

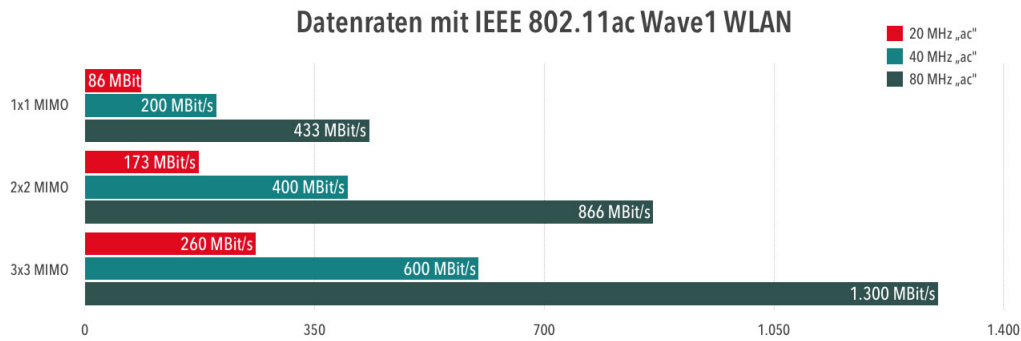


Abbildung 4: Darstellung der Datenrate diverser MIMO-Systeme im Wave 1 Teilstandard [23]

### 5.1.2 802.11ac Wave 2

Der Wave 2-Teilstandard führt zunächst eine mögliche Kanalzusammenlegung zu bis zu 160 MHz- breiten Kanälen ein. Dies bedeutet, dass im Vergleich zu einem sonst identisch konfigurierten Aufbau, der 80 MHz-breite Kanäle nutzt, die mögliche Datenrate verdoppelt wird. [8]

**MIMO-System** Ebenfalls wurde das MIMO-System des 802.11n-Standards umdefiniert, sodass nun 8 Antennen pro Sender und Empfänger zum Einsatz kommen (8x8 MIMO), im Gegensatz zu den maximal möglichen 4 Antennen im 802.11n-Standard. Damit werden pro 160 MHz-Kanal theoretische Datenraten von 6900 MBit/s ermöglicht. Als Neuerung im MIMO-System wird das sogenannte Multi-User-MIMO (MU-MIMO)-System eingeführt. Es wird definiert, dass ein 802.11ac-fähiges Gerät die zur Verfügung stehenden Antennen auf unterschiedliche Kommunikationspartner aufteilen kann. [19] Durch Beamforming kann dabei die Abstrahlcharakteristik der verwendeten Antennen so geändert werden, dass sich die einzelnen Signale gegenseitig nur wenig stören und eine Parallelisierung der Kommunikation mit unterschiedlichen Partnern ermöglicht wird. [8] [20]

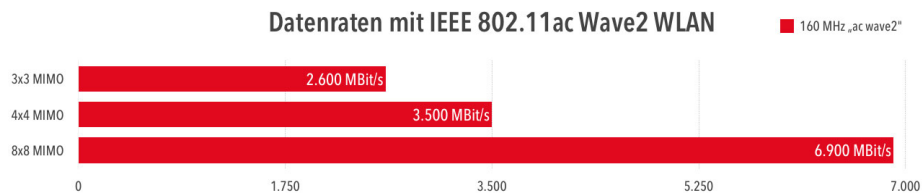


Abbildung 5: Darstellung der Datenrate diverser MIMO-Systeme im Wave 2 Teilstandard [24]

## **5.2 Fazit**

Der 802.11ac-Standard ist als WLAN der 5.Generation bekannt und führt als erster Standard der Very-High-Throughput (VHT)-Erweiterungen Techniken ein, die später eine Datenrate von 1 GBit/s erreichen sollen.

Da der Standard auf 802.11n aufsetzt und diesen erweitert, können Geräte, die diesen Standard implementieren, auch abwärtskompatibel zum 802.11n-Standard genutzt werden. Der Teilstandard Wave 2 ist ebenfalls Wave 1-kompatibel, da Wave 2 seinen Vorgänger lediglich erweitert.

## 6 IEEE 802.11ad

Dieser WLAN-Standard stellt neben 802.11ac den zweiten Standard der VHT-WLAN- Erweiterung dar. 802.11ad ermöglicht dabei letztendlich Datenraten über dem vom IEEE gesetzten 1 GBit/s-Ziel. Um solche Datenraten zu erreichen, definiert das IEEE den 802.11ad-Standard im Frequenzbereich von 57 - 64 GHz. Durch dieses, im Vergleich zu anderen WLAN-Standards, hohe Frequenzband erhöht sich die Dämpfung des Signals, was eine geringe Reichweite von ungefähr 10 Meter zur Folge hat. In dem vorher nicht durch WLAN-Standards genutzten Frequenzband werden vier Kanäle mit Bandbreiten von 2160 MHz definiert. Im europäischen Raum steht Kanal 1 jedoch nicht zur Verfügung. [21]

### 6.1 Techniken

Der Standard definiert mehrere Modi der Datenübertragung, wobei ein IEEE 802.11ad-fähiges Gerät nicht alle Modi implementieren muss.

- Optimiert für stabile Verbindung
- Geringer Stromverbrauch
- Höhere Datenübertragungsrate

[10]

### 6.2 Fazit

Der IEEE 802.11ad-Standard ist bezüglich anderer WLAN-Funknetze im gleichen Frequenzbereich weniger störanfällig, da die geringen Reichweiten von ungefähr 10 Metern eine Überlappung zweier WLAN-Netze unwahrscheinlich machen.

Durch die große zur Verfügung stehende Bandbreite und der damit verbundenen hohen Datenrate ist der Standard sehr gut für Anwendungen geeignet, die hohe Übertragungsgeschwindigkeiten erfordern. Als eine solche Anwendung ist das Streaming von unkomprimierten Videos zu nennen.

Aufgrund der hohen Dämpfung, nicht nur im Freiraum, sondern auch durch Hindernisse, ist der IEEE 802.11ad-Standard nicht zur Datenübertragung zwischen unterschiedlichen Räumen geeignet. [3]

## **7 IEEE 802.11ah**

Der Standard 802.11ah definiert WLAN im 900 MHz-Frequenzband. Im Vergleich zu Standards der 802.11-Familie wird so eine höhere Reichweite erzielt. Die tatsächlich genutzten Frequenzbereiche können dabei abweichen. In Europa wird das Band zwischen 863 und 868 MHz genutzt.

Die für diesen Standard definierten Kanalbreiten wurden dabei variabel zwischen 1 und 16 MHz Bandbreite definiert. [22] [8] [2]

### **7.1 Techniken**

Dieser Standard führt neben den genannten Änderungen des Frequenzbereichs und der Bandbreite keine neuen oder geänderten Übertragungs-Techniken ein.

### **7.2 Fazit**

Dieser 802.11ah-Standard wurde mit dem Gedanken einer hohen Reichweite definiert. Gleichzeitig kann die 4 Datenübertragung durch die variabel gehaltene Bandbreite den Anforderungen der verbundenen Geräte angepasst werden. 802.11ah wurde im Hinblick auf Geräte des Internet of Things (IoT) so definiert, dass er sich gut für die Übertragung großer Mengen an Sensordaten mit kleiner Nutzdatengröße eignet. [2]

## 8 IEEE 802.11ay

802.11ay gilt als Erweiterung des Standards 802.11ad, welcher WLAN im 60 GHz-Band definiert. Der Standard 802.11ay zielt auf eine Erhöhung der theoretisch möglichen Datenrate im verwendeten Frequenzband ab.

### 8.1 Techniken

Um eine Erhöhung der möglichen Datenrate zu erreichen, wird für das 60 GHz-Band das MIMO- System mit einer Höchstkonfiguration von 4x4, also vier Antennen pro Sende- und Empfangsgerät, eingeführt.

Ebenfalls wurde definiert, dass die im 60 GHz-Band existierenden Kanäle zu bis zu 8640 MHz breite Kanäle zusammengelegt werden können.

Für die Datenübertragung kann Beamforming verwendet werden. [8]

### 8.2 Fazit

Der 802.11ay-Standard zielt als Erweiterung von 802.11ad darauf ab die Datenrate im 60 GHz-Band zu erhöhen um so ein breiteres Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten für das Frequenzband im WLAN- Standard zu schaffen. So kann 802.11ay zum Beispiel zum Übertragen von unkomprimierten Videos auf kurzer Strecke genutzt werden. [8]

## 9 IEEE 802.11be

Aktuell wird noch am 802.11be-Standard gearbeitet und eine endgültige Fassung wird erst in Zukunft veröffentlicht. Daher sind Angaben über die tatsächlich definierten Techniken und Methoden noch schwer zu tätigen.

Zum aktuellen Datum ist aber bekannt, dass der IEEE 802.11be-Standard auf IEEE 802.11ax aufbaut. Der Standard soll das in IEEE 802.11ax definierte 6 GHz-Band erweitern und eine Kanalbreite von 320 MHz ermöglichen.

Da der Standard erneut erhöhte Datenraten ermöglichen soll, wurde ihm der Namenszusatz *Extremely High Throughput* gegeben. [9]

### 9.1 Techniken

Der Standard soll die sogenannte *Multi-Band / Multi-Channel-Aggregation* nutzen und in dessen Betrieb mit 16 räumlich unterteilten Streams arbeiten. Gleichzeitig soll eine Verbesserung des MIMO-Systems stattfinden und es wird ein erweitertes Verbindungsanpassungs- und Neuübertragungsprotokoll eingeführt werden. [9] [1] Es werden also Techniken enthalten sein, die die WLAN-Verbindungen besser den benötigten Eigenschaften anpasst.

### 9.2 Fazit

Durch das verwenden des neuen 6 GHz-Bands und 320 MHz Kanalbreite werden voraussichtlich höhere maximale Datenraten ermöglicht. Unter anderem werden dadurch Möglichkeiten zur Vernetzung von Anwendungen mit hohen Anforderung an die Datenrate ermöglicht, wobei die Reichweite nicht so stark eingeschränkt wird, wie es zum Beispiel bei IEEE 802.11ad der Fall ist.

Da dieser Standard aber erst am Anfang der Entwicklungsphase steht müssen erst zukünftige Tests und Publikationen betrachtet werden, bevor eine endgültige Aussage über die Eigenschaften von IEEE 802.11be getroffen werden können.



## 10 Vergleich

Da nun einige 802.11-Standards isoliert betrachtet wurden, können diese nun im Vergleich analysiert werden. Dazu werden nicht nur die technischen Details betrachtet, sondern auch die Verteilung entsprechender Clients und andere Markt-relevante Einzelheiten.

### 10.1 Entwicklungszeitraum und Entstehung

Betrachtet man den Entwicklungszeitraum der vorgestellten IEEE 802.11-Standards, so lässt sich ein Zeitstrahl erstellen.

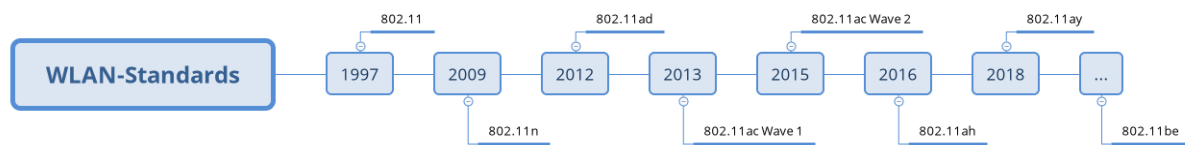


Abbildung 6: Veröffentlichungsjahr der jeweiligen Standards

Betrachtet man die Reihenfolge der Standards, so fällt auf, dass der IEEE 802.11-Standard zunächst im 2,4 GHz-Band definiert wurde. Die Erweiterung IEEE 802.11n befasste sich neben der Einführung des 5 GHz-Frequenzbands im WLAN-Standard mit der Erhöhung der für WLAN möglichen Datenraten, indem neue Techniken und Methoden wie das MIMO-System eingeführt wurden. Die in der IEEE 802.11n-Erweiterung eingeführten Methoden wurden erst Jahre nach der Veröffentlichung des Originalstandards möglich, da die eingeführten Maßnahmen mehr Rechenleistung und empfindlichere Bauteile benötigten.

In den folgenden Jahren wuchs die benötigte Menge der über Netzwerke versendeten Daten weiter. Daher wurde entschieden mit den Standards IEEE 802.11ac und IEEE 802.11ad die VHT-Erweiterung einzuführen. Es wurden jedoch einige Probleme im 2,4 GHz-Band bekannt, wie der bereits starken Auslastung durch WLAN-fähige Geräte oder den Störungen durch Bluetooth oder Mikrowellenherden. Deshalb wurde das mit IEEE 802.11n eingeführte 5 GHz-Band erweitert und ein weiteres Frequenzband bei 60 GHz hinzugefügt.

Mit dem verstärkten Wachstum bezüglich der Anzahl von IoT-Geräten, wie zum Beispiel Sensoren in Fertigungshallen, wurde es notwendig eine IEEE 802.11-Erweiterung für eben diesen Anwendungszweck zu schaffen. Die Erweiterung IEEE 802.11ah ermöglicht solche Anwendungs-Szenarien durch die mit dem 900 MHz-Band eingeführte hohe Reichweite.

Die beiden neueren Standards IEEE 802.11ay und IEEE 802.11be werden schließlich als Erweiterungen der Standards IEEE 802.11ad, beziehungsweise IEEE 802.11ax gestaltet, um den mit der Zeit gewachsenen Anforderungen gerecht zu werden.

## 10.2 Kanalnutzung und Reichweite

Betrachtet man den IEEE 802.11-Standard und seine Erweiterungen, so fällt auf, dass nicht nur mehrere Kanalbreiten, sondern auch unterschiedliche Frequenzbänder eingeführt wurden. Die folgende Tabelle gibt einen kurzen Überblick:

Standard	Frequenzbänder	Kanalbreite
802.11n	2,4 GHz 5 GHz	20 und 40 MHz 20 und 40 MHz
802.11ac	5 GHz	20, 40, 80 und 160 MHz
802.11ad	60 GHz	2.16 GHz
802.11ah	900 MHz	1 bis 16 MHz
802.11ay	60 GHz	8.64 GHz
802.11be	6 GHz	320 MHz

Abbildung 7: Übersicht der Kanalbreiten und Frequenzbänder einiger IEEE 802.11-Standards [5] [19] [21] [8] [9]

Die Reichweite der einzelnen IEEE 802.11-Standards ist direkt abhängig von den verwendeten Frequenzen. Diese fließen in die Berechnung des Verhältnis von Sende- und Empfangsleistung ein. Generell sind folgende Formeln anzuwenden:

$D$  = Dämpfungsmaß  $[dB]$

$P_S, P_E$  = Leistung Sender, Empfänger  $[W]$

$f$  = Frequenz des Signals  $[Hz]$

$r$  = Entfernung Sender, Empfänger  $[m]$

$$D = 10 \cdot \lg \left( \frac{P_E}{P_S} \right)$$

$$\frac{P_E}{P_S} = \left( \frac{c^2}{4\pi f^2} \right) \cdot \left( \frac{1}{4\pi r^2} \right)$$

$$\Rightarrow D = 10 \cdot \lg \left( \left( \frac{c^2}{4\pi f^2} \right) \cdot \left( \frac{1}{4\pi r^2} \right) \right)$$

[6]

Die von der Signalfrequenz und Entfernung abhängige Dämpfung schwächt das Sendesignal, was die Reichweitenbegrenzung verursacht.

Setzt man zum Vergleich der Dämpfungen  $r = 1$  und fügt einige Beispielfrequenzen, wie 2,4 GHz oder 5 GHz, in die Formel ein, so fällt auf, dass die Dämpfung mit der Frequenz ansteigt. Dies bedeutet, dass IEEE 802.11-Standards mit höheren Frequenzen aufgrund der höheren Dämpfung geringere Reichweiten erzielen.

### 10.3 Datenübertragungsrate

Die Datenrate eines WLAN-Systems lässt sich ungefähr mit folgender Formel berechnen:

$$C = \text{Datenübertragungsrate} \left[ \frac{\text{Bit}}{s} \right]$$

$$\text{Symbolrate} \left[ \frac{\text{Symbole}}{s} \right]$$

$$C = \text{Anzahl MIMO Antennenzüge} \cdot \text{Anzahl OFDM Unterträger} \cdot$$

$$\text{Symbolrate} \cdot \text{Anzahl Bits pro Symbol} \cdot \text{Coderate}$$

[7]

Aufgrund von Unterschieden im Einsatz des MIMO-Systems, unterschiedlichen Modulations-Konfigurationen und Kanalbreiten kann für jeden IEEE 802.11-Standard ein Bereich von möglichen Datenraten berechnet werden. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die angegebenen möglichen Datenraten:

IEEE Standard	Frequenz	Datenrate
802.11n	2,4 GHz	72 - 600 MBit/s
802.11ac	5 GHz	bis 6900 MBit/s
802.11ad	60 GHz	bis 6700 MBit/s
802.11ah	900 MHz	1 - 357 MBit/s
802.11ay	60 GHz	176 GBit/s
802.11be	6 GHz	...

Abbildung 8: Übersicht über mögliche Datenraten in IEEE 802.11-Standards [8] [4]

Betrachtet man die Datenraten im Bezug auf die Entstehungszeit der einzelnen IEEE-Standards, fällt auf, dass die maximal mögliche Datenrate über die Zeit stetig zunimmt. Eine Ausnahme bildet der Standard IEEE 802.11ah, welcher das vorher nicht genutzte 900 MHz-Band verwendet. Da diese Standardisierung auf das Anwendungsgebiet des IoT angepasst wurde, mussten die Datenrate zu Gunsten der Erhöhung der maximal möglichen parallelen Datenübertragungen heruntergesetzt werden.

Die Erhöhung der Datenraten wurde jedoch nicht nur durch die Verwendung des MIMO-Systems und der Zusammenlegung mehrerer Kanäle möglich. Zum Teil wurde die Entwicklung der Datenrate in WLAN-Netzwerken auch durch die Weiterentwicklung der Verarbeitungstechnik beeinflusst. Diese Entwicklung ermöglicht in neueren Standardisierungen unter anderem den Einsatz von höheren Symbolraten oder Modulationen mit mehr Zuständen (zum Beispiel QAM-1024 statt QAM-64).

Bezüglich des zukünftigen Standards IEEE 802.11be kann zum momentanen Zeitpunkt noch keine genaue Aussage über die unterstützte Datenrate getroffen werden.

## 10.4 Zukünftiges Potenzial und Anwendungsszenarien

Jeder Standard hat seinen eigenen Anwendungsbereich in dem er verwendet werden kann. So sind gerade die räumlich begrenzten Standards IEEE 802.11ad und IEEE 802.11ay sehr gut geeignet für große Datenmengen wie z.B. beim 4K-Streaming oder drahtlosen Virtual Reality Brillen. Gerade durch das Leistungsstärkere IEEE 802.11ay wird der Anwendungsbereich noch erweitert, zum Beispiel für drahtlose 8K-Monitore.

Für den Einsatz im Büro mit mehreren Räumen oder für ein flächendeckendes WLAN-Netz im Privathaus ist der 802.11ac Standard im Vorteil. Durch seine höhere Reichweite bildet er hier ein breiteres Spektrum an Verwendungsmöglichkeiten als IEEE 802.11ad und IEEE 802.11ay. Da IEEE 802.11ac jedoch eine geringere Datenrate zur Verfügung stellt ist er nicht für Anwendungen mit hohem Datenverkehr geeignet.

Der Standard 802.11ah sticht aus den zuvor genannten Standards heraus. Gerade durch die hohe Reichweite und geringen Datenrate ist er nur für kleine Datenmengen in weitläufigen Umgebungen, zum Beispiel Sensoren als IoT-Lösungen in Fertigungshallen, geeignet. Auch können sehr viele Anwendungen mit wenig Datenverkehr gleichzeitig im Netz dieses Standards verwaltet werden, wie es zum Beispiel bei Smart-Home-Anwendungen der Fall ist.

Betrachtet man die Vergangenheit näher und vergleicht die damaligen Entwicklungen mit den heutigen, so kann daraus gefolgert werden, dass auch in Zukunft die Entwicklung der WLAN-Standards mit der Entwicklung anderer Techniken voranschreiten wird. Gleichzeitig verlieren die bestehenden Standards aber nicht an Bedeutung, da diese zum einen als Kompatibilität für ältere Geräte eingesetzt werden können, zum anderen bauen neue Standardisierungen immer wieder auf den bereits bestehenden auf. So erweitert der sich momentan im Entwicklungsprozess befindende Standard IEEE 802.11be die Funktionalität von IEEE 802.11ax.

Da die zukünftigen Technologien immer Leistungsstärker und präziser werden, lässt sich auch hier eine Prognose erstellen. Das MIMO-System wird vermutlich ständig verbessert oder zur Ableitung neuer Technologien genutzt werden.

## 11 Fazit

Jeder der erläuterten Standards hat seine Vor- und Nachteile und es gibt nicht die eine "Beste" WLAN- Standardisierung. So ist zum Beispiel der Standard IEEE 802.11ah, bedingt durch seine Reichweite, eher für den Anwendungsbereich IoT, zum Beispiel in Fertigungshallen geeignet.

Bevor ein WLAN-Netz also tatsächlich aufgebaut wird, sollte eine Analyse bezüglich des Einsatzgebiets und den generellen Anforderungen durchgeführt werden. Einige ältere Standards können dabei obsolet wirken, stellen aber die Grundlage neuerer Standardisierungen dar. So können diese älteren Standards als Grundlage der neueren Standardisierungen die Kompatibilität zu älteren WLAN-fähigen Geräten aufrecht erhalten.

## 12 Abbildungen

### Abbildungsverzeichnis

1	Darstellung des OFDM-Prinzips mit mehreren Unterträgern [12] . . . . .	5
2	Darstellung des OFDM-Prinzips im Gegensatz zu FDM [13] . . . . .	6
3	Darstellung des MIMO-Prinzip mit jeweils drei Antennen [16] . . . . .	8
4	Darstellung der Datenrate diverser MIMO-Systeme im Wave 1 Teilstandard [23]	11
5	Darstellung der Datenrate diverser MIMO-Systeme im Wave 2 Teilstandard [24]	11
6	Veröffentlichungsjahr der jeweiligen Standards . . . . .	17
7	Übersicht der Kanalbreiten und Frequenzbänder einiger IEEE 802.11-Standards [5] [19] [21] [8] [9] . . . . .	18
8	Übersicht über mögliche Datenraten in IEEE 802.11-Standards [8] [4] . . . .	19

## 13 Quellenverzeichnis

### Literatur

- [1] Allround-PC 802.11be. <https://www.allround-pc.com/artikel/wissen/2020/wissen-was-kann-das-neue-wi-fi-6>. 11.02.2020, 20:43 Uhr.
- [2] Com-Magazin 802.11ah. <https://www.com-magazin.de/news/wlan/wlan-standard-802.11ah-langstrecke-1080686.html>. 11.02.2020, 21:18 Uhr.
- [3] Computerwoche 802.11ad. <https://www.computerwoche.de/a/so-schnell-wird-das-netz,3229202>, 2. 13.02.2020, 19:22 Uhr.
- [4] Heise. <https://www.heise.de/ct/hotline/FAQ-WLAN-1473094.html>. 13.02.2020, 23:39 Uhr.
- [5] HTW Saar Vorlesung WLAN. [https://swl.htwsaar.de/lehre/ss19/wlan/WLAN\\_Vorlesung\\_2018.pdf](https://swl.htwsaar.de/lehre/ss19/wlan/WLAN_Vorlesung_2018.pdf). Seite 79-80, 13.02.2020, 23:40 Uhr.
- [6] HTW Saar Vorlesung WLAN. [https://swl.htwsaar.de/lehre/ss19/wlan/WLAN\\_Vorlesung\\_2018.pdf](https://swl.htwsaar.de/lehre/ss19/wlan/WLAN_Vorlesung_2018.pdf). Seiten 33-36, 13.02.2020, 21:19 Uhr.
- [7] HTW Saar Vorlesung WLAN. [https://swl.htwsaar.de/lehre/ss19/wlan/WLAN\\_Vorlesung\\_2018.pdf](https://swl.htwsaar.de/lehre/ss19/wlan/WLAN_Vorlesung_2018.pdf). Seite 82, 13.02.2020, 22:20 Uhr.
- [8] IEEE 802.11 WLAN-Standards im Vergleich. <https://www.welotec.com/de/wlan-standards-vergleich>. 11.02.2020, 18:32 Uhr.
- [9] IEEE 802.11be. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8847238>. 13.02.2020, 19:29 Uhr.
- [10] NZZ 802.11ad. <https://www.nzz.ch/digital/wlan-ieee-80211ad-zimmerfunk-mit-sichtkontakt-ld.103812>. 13.02.2020, 18:59 Uhr.
- [11] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, pages 113–117. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 3 edition, 2008.



- [12] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, page 116. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 3 edition, 2008. Abbildung 3-20.
- [13] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, page 115. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 3 edition, 2008. Abbildung 3-19.
- [14] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, pages 256–258. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 3 edition, 2008.
- [15] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, page 114. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 3 edition, 2008.
- [16] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, page 256. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 3 edition, 2008. Grafik zur Verdeutlichung farbig nachgestellt mit Hilfe von Inkscape. Angelehnt an Abbildung 5-1.
- [17] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, page 123. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 3 edition, 2008.
- [18] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, pages 255, 262–255. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 3 edition, 2008.
- [19] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, pages 289–290. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 4 edition, 2012.
- [20] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, pages 290–291. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 4 edition, 2012.
- [21] Jörg Rech. *Wireless LANs 803.22-WLAN-Technologie und praktische Umsetzung im Detail*, pages 298–299. Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover, 4 edition, 2012.

- [22] Telecom-Handel 802.11ah. <https://www.telecom-handel.de/business-solutions/wlan/wlan-standard-802.11ah-langstrecke-1079392.html>. 11.02.2020, 21:15 Uhr.
- [23] Welotech 802.11ac Wave 1 MIMO-Systeme Datenrate. [https://www.welotec.com/files/CMS%20Landingpages/datenrate-802\\_11ac-wave1-vergleich.jpg](https://www.welotec.com/files/CMS%20Landingpages/datenrate-802_11ac-wave1-vergleich.jpg). 11.02.2020, 18:32 Uhr.
- [24] Welotech 802.11ac Wave 2 MIMO-Systeme Datenrate. [https://www.welotec.com/files/CMS%20Landingpages/datenrate-802\\_11ac-wave2-vergleich.jpg](https://www.welotec.com/files/CMS%20Landingpages/datenrate-802_11ac-wave2-vergleich.jpg). 11.02.2020, 18:32 Uhr.

## Akronyme

**FDM** Frequency Division Multiplexing 6, 22, 26

**GHz** Giga-Hertz 9, 10, 13, 15–19, 21, 26

**IEEE** Institute of Electrical and Electronic Engineers 2, 4, 5, 9, 10, 13–19, 22, 26

**IoT** Internet of Things 14, 17, 26

**MHz** Mega-Hertz 9–11, 13–20, 26

**MIMO** Multiple Input Multiple Output 2, 7–11, 15–17, 19–22, 26

**MU-MIMO** Multi-User-MIMO 11, 26

**OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing 2, 5, 6, 9, 10, 22, 26

**OSI** Open Systems Interconnection 9, 26

**SISO** Single Input Single Output 7, 26

**SU-MIMO** Single-User-MIMO 20, 26

**VHT** Very-High-Throughput 12, 13, 17, 26

**WLAN** Wireless Local Area Network 1, 4, 5, 8–10, 12–15, 17, 26