

## 2 5G-Technologie: Grundlagen, Potentiale, Herausforderungen

### 2.1 Was ist 5G?

Die fünfte Generation des Mobilfunkstandards (5G) stellt eine bedeutende technologische Weiterentwicklung gegenüber dem bisherigen LTE-Standard (4G) dar. Sie nimmt eine immer stärkere Stellung als Schlüsseltechnologie ein, da die 5G-Technologie besondere Eigenschaften besitzt.

Sie wurde konzipiert, um eine signifikant höhere Datenübertragungsrate zu ermöglichen, wodurch Geschwindigkeiten von bis zu 10 Gigabit pro Sekunde realisierbar sind. Dies entspricht einer erheblichen Steigerung gegenüber 4G und trägt dazu bei, mobile Breitbandverbindungen leistungsfähiger und effizienter zu gestalten.

Ein zentraler Vorteil von 5G liegt in der drastischen **Reduktion der Latenzzeiten**. Während bei 4G die Signalverzögerung typischerweise im Bereich von 30 bis 50 Millisekunden liegt, kann 5G diese auf unter eine Millisekunde senken. Dies ist insbesondere für latenzkritische Anwendungen von essenzieller Bedeutung, etwa in den Bereichen der automatisierten Fahrzeugsteuerung, der robotergestützten Chirurgie oder des Cloud-basierten Gamings.

Darüber hinaus zeichnet sich 5G durch eine erhebliche **Steigerung der Netzwerkkapazität** aus. Während frühere Mobilfunkstandards in hoch-

frequenzierten Gebieten häufig an ihre Grenzen stießen, ermöglicht 5G die gleichzeitige Vernetzung von mehreren Millionen Endgeräten pro Quadratkilometer. Dies ist vor allem für das Internet der Dinge (IoT) von Relevanz, in welchem zahlreiche vernetzte Geräte, industrielle Sensoren und autonome Systeme eine nahtlose Kommunikation erfordern.

Ein weiterer technologischer Fortschritt von 5G liegt in der **optimierten Nutzung des elektromagnetischen Spektrums**. Neben den bereits etablierten Frequenzbändern, die auch bei 4G Verwendung finden, setzt 5G verstärkt auf sogenannte Millimeterwellen, die im Hochfrequenzbereich operieren. Diese ermöglichen zwar eine erheblich höhere Datenübertragungsrate, weisen jedoch eine geringere Reichweite auf, wodurch eine dichtere Infrastruktur von Basisstationen erforderlich ist (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

## 2.2 Die Funkstandards – Gegenüberstellung

In den 1990er-Jahren begann die Einführung der digitalen Mobilfunknetze mit der 2. Generation als Nachfolger der analogen Netze der ersten Generation. Diese Entwicklung leitete eine neue Phase im Bereich der mobilen Kommunikation ein. Inzwischen wurde eine Vielzahl von Mobilfunkstandards entwickelt, die es auch ermöglichen, Daten drahtlos zu übertragen.

Einen bedeutenden Schritt stellte die Einführung der fünften Generation des Mobilfunkstandards (5G) als Weiterentwicklung der vorherigen Generationen GSM (2G), UMTS (3G) und LTE (4G) dar. Jede neue Generation von Mobilfunkstandards brachte eine deutliche Verbesserung der Nutzungsmöglichkeiten und stellte erhöhte Anforderungen an die Technologie und Infrastruktur. Im Schnitt erfolgte die Entwicklung neuer Mobilfunkgenerationen im Abstand von etwa zehn Jahren. Abbildung 1 zeigt die Evolution der Mobilfunkstandards im Überblick (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

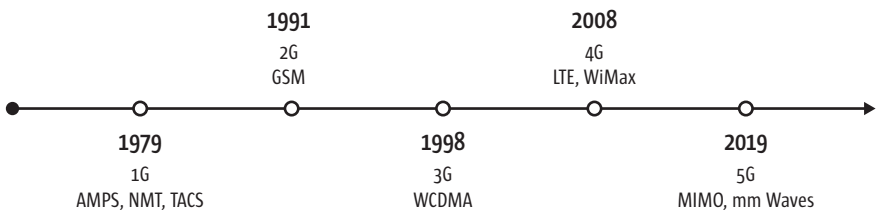


Abb. 1 Evolution der Mobilfunkstandards

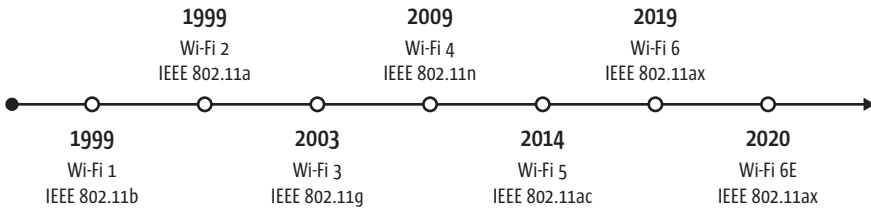


Abb. 2 Evolution von Wi-Fi

Neben den Mobilfunknetzen, die als Weitverkehrsnetze (WAN) fungieren und in der Regel über große Entfernungen sowohl in Innenräumen als auch im Freien genutzt werden, existiert auch Wi-Fi als eine weitere Form von Drahtlostechnologie. Wi-Fi ist eine Art lokales Netzwerk (LAN), das hauptsächlich in Innenräumen verwendet wird, z. B. in einem Haus oder am Arbeitsplatz. Wie auch die Mobilfunkstandards wurde Wi-Fi seit der Einführung im Jahr 1997 kontinuierlich weiterentwickelt. Die neueste Version dieser Technologie, Wi-Fi 6E (IEEE 802.11ax) wurde im Jahr 2020 eingeführt. Abbildung 2 zeigt die Evolution von Wi-Fi im Überblick (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

In der folgenden Gegenüberstellung der Funkstandards 4G, 5G und Wi-Fi wird insbesondere auf wichtige Aspekte wie Datenraten, Latenz, Reichweite, Interferenzanfälligkeit, Anzahl der Endgeräte, Energieeffizienz und Sicherheit eingegangen.

**2.2.1 Datenraten**

4G-Netzwerke bieten in der Regel Datenraten von bis zu einem Gigabit pro Sekunde. Diese Geschwindigkeiten sind ausreichend für typische mobile Anwendungen wie das Surfen im Internet, das Streamen von Videos und das Versenden von Nachrichten. Um diese Datenraten zu erreichen, werden Signale von großen Mobilfunkmasten gesendet (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

Im Vergleich zu 4G nutzt die 5G-Technologie andere Frequenzbereiche und setzt weitaus mehr Antennen (MIMO) ein. 5G kann auf einem neuen, hochfrequenten Spektrum arbeiten, das als Millimeterwelle (mmWave) bezeichnet wird. Die größeren Bandbreiten zur Datenübertragung ermöglichen deutlich höhere Geschwindigkeiten. Unter den richtigen Bedingungen können 5G-Netzwerke Geschwindigkeiten von bis zu 100 Gigabit pro Sekunde erreichen, was bis zu 100-mal schneller ist als 4G. Dadurch ermöglicht die 5G-Technologie ultraschnelle Downloads, das Streamen von 4K- und 8K-Videos sowie Echtzeitkommunikation für An-

wendungen wie Augmented Reality, Virtual Reality und automatisierte Produktionsprozesse (Trick u. Ulrich. 2020).

Wi-Fi 6 bietet ebenfalls beeindruckende Datenraten und kann Geschwindigkeiten von bis zu 11 Gigabit pro Sekunde (Gbps) erreichen. Diese hohen Geschwindigkeiten sind ideal für Umgebungen mit vielen gleichzeitigen Nutzern und bandbreitenintensiven Anwendungen wie Videokonferenzen, Online-Gaming und das Streamen von Inhalten in hoher Qualität. Wi-Fi 6 verwendet fortschrittliche Technologien wie OFDMA und MU-MIMO, um die Effizienz und Leistung des drahtlosen Netzwerks zu steigern (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

### 2.2.2 Latenz

Der größte Unterschied zwischen 4G und 5G ist die Latenz. Die Latenzzeit gibt an, wie lange es dauert, bis versendete Daten beim Empfänger ankommen. Im Vergleich zu den Vorgängerstandards 2G oder 3G bieten 4G-Netzwerke mit 60 ms bis 98 ms bereits vergleichsweise niedrige Latenzzeiten, was entscheidend für Anwendungen wie Videokonferenzen und Online-Gaming ist (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

In 5G-Netzen ist die Latenz nochmal deutlich geringer. Bei korrektem Netzwerkdesign und der richtigen Netzwerkkonfiguration kann sie nur noch eine Millisekunde betragen. Die niedrigen Latenzzeiten werden unter anderem über ein Netz aus eng angebundenen Funkstationen (Microcells), Edge Computing, einem erweiterten Frequenzbereich und speziellen Übertragungsverfahren erreicht. Dies ist einer der Schlüsselvorteile von 5G und macht es ideal für Anwendungen, die Echtzeitkommunikation erfordern, wie Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR), autonomes Fahren und Telemedizin (3G, 4G, 5G: Was ist der Unterschied?).

Wie auch 5G bietet Wi-Fi 6 ebenfalls niedrige Latenzzeiten, welche im Bereich von 1 bis 5 Millisekunden liegen. Dies macht es geeignet für Echtzeitkommunikation und Online-Gaming, bei denen die Latenz entscheidend ist (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

### 2.2.3 Reichweite

Grundsätzlich ist für die Reichweite eines Mobilfunkstandards die verwendete Frequenz der Basisstation ausschlaggebend. 4G-Netzwerke können je nach Umgebung und Sendemast eine Reichweite von bis zu 10 Kilometern erreichen. Diese Reichweite macht 4G zu einer soliden Wahl für

die mobile Kommunikation, insbesondere in ländlichen Gebieten, wo die Entfernung zwischen den Funkmasten größer sein kann.

Die 5G-Technologie erstreckt sich in völlig neue Frequenzbereiche. Das Spektrum kann unterteilt werden: Der erste Teil ist für alle Frequenzen unterhalb von 6 GHz zuständig. Er wird als Frequency Range 1 (FR1) bezeichnet. Der zweite Teil, das Spektrum über 6 GHz (24–71 GHz) wird als Frequency Range 2 (FR2) oder auch als Millimeter Wellen (mmWave) Spektrum bezeichnet. Das FR1 Spektrum nutzt teilweise die gleichen Frequenzen wie 4G und weist daher eine ähnliche Reichweite auf. Obwohl der Frequenzbereich höher ist als bei 4G, nähert sich die Reichweite dank neuer 5G-Techniken wie Beamforming, wobei Funkwellen gebündelt und gezielt zum Empfangsgerät gelenkt werden, der Reichweiten von 4G an. Im Gegensatz dazu ist die Reichweite im Millimeterwellenbereich auf nur wenige hundert Meter bis zu einem Kilometer begrenzt. Hindernisse wie Wände, Fenster und Bäume beeinträchtigen die Übertragung in diesem Frequenzbereich erheblich, weshalb viele kleine Funkzellen installiert werden müssen. Dies macht Millimeterwellen-5G ideal für den Einsatz in städtischen Umgebungen, in denen eine hohe Dichte von Sendemasten für eine zuverlässige Abdeckung sorgt (Sauter. 2022).

Obwohl Wi-Fi 6 im Vergleich zu seinen Vorgängern eine verbesserte Reichweite aufweist, bleibt es auf Innenräume beschränkt und kann nicht mit 5G konkurrieren. Ein typisches Wi-Fi-6-Router-Signal kann in einem Haus oder Büro gut abdecken, erreicht jedoch normalerweise keine großen Entfernungen im Freien. Die Reichweite kann jedoch durch den Einsatz von Mesh-Netzwerken erweitert werden, bei denen mehrere Router zusammenarbeiten, um eine größere Fläche abzudecken (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

#### 2.2.4 Interferenzanfälligkeit

4G-Netzwerke verwenden im Allgemeinen Frequenzen unter 6 GHz. Obwohl sie gegenüber älteren Standards wie 3G weniger anfällig für Interferenzen sind, können sie dennoch durch Hindernisse wie Gebäude und große Menschenmengen beeinträchtigt werden. Dies kann zu Verzögerungen bei der Datenübertragung und erhöhten Latenzzeiten führen (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

Die Verwendung von 5G-Netzwerken im Millimeterwellenbereich ist ebenfalls anfällig für Hindernisse und erfordert mehr Sendemasten zur Aufrechterhaltung einer stabilen Verbindung. Bei Hindernissen wie Ge-

bänden kann die 5G-Verbindung erheblich beeinträchtigt werden, was die Interferenzanfälligkeit erhöht (Trick 2020).

Wi-Fi-Netzwerke erscheinen im Allgemeinen weniger stabil als Mobilfunknetze, da die Wi-Fi-Frequenzbänder öffentlich sind und Konflikte auftreten können, insbesondere, wenn viele Benutzer gleichzeitig aktiv sind. Wi-Fi 6 arbeitet in den 2,4-GHz- und 5-GHz-Bändern und verwendet Technologien wie Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) und MU-MIMO, um diesen Problemen entgegenzuwirken und die Interferenzanfälligkeit zu reduzieren. Daher steigt die Stabilität des drahtlosen Netzwerks mit der Einführung von Wi-Fi 6 dramatisch an und steht 5G in nichts nach. Dennoch ist auch Wi-Fi 6 nicht vollständig immun gegen Interferenzen, insbesondere wenn viele drahtlose Geräte in dicht besiedelten Gebieten aktiv sind (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

Insgesamt ist die Interferenzanfälligkeit ein wichtiger Faktor bei der Auswahl eines drahtlosen Standards. 4G bietet eine relativ gute Stabilität, während 5G aufgrund der Verwendung von mmWave-Frequenzen und seiner geringeren Durchdringungsfähigkeit in bestimmten Szenarien anfälliger sein kann. Wi-Fi 6 hingegen verfügt über Mechanismen zur Reduzierung von Interferenzen, ist jedoch auch von der Umgebung und der Anzahl der aktiven Geräte abhängig. Bei der Planung von drahtlosen Netzwerken ist es entscheidend, diese Faktoren zu berücksichtigen, um eine zuverlässige Konnektivität sicherzustellen (3G, 4G, 5G: Was ist der Unterschied?).

### 2.2.5 Anzahl Endgeräte

4G-Netzwerke sind in der Lage, eine begrenzte Anzahl von Endgeräten zu unterstützen. Typischerweise können sie etwa 2.000 bis 4.000 gleichzeitige Verbindungen handhaben. Dies reicht in den meisten Fällen für den Einsatz in Mobilfunknetzen aus, da die meisten Benutzer hauptsächlich mobile Geräte wie Smartphones und Tablets verwenden.

Durch die dichtere Anzahl an Zellen kann 5G eine deutlich größere Anzahl von Endgeräten unterstützen. Es wird erwartet, dass 5G-Netzwerke bis zu 1 Million gleichzeitige Verbindungen pro Quadratkilometer ermöglichen können. Dies macht 5G besonders geeignet für das Internet der Dinge (IoT), bei dem eine große Anzahl von vernetzten Geräten gleichzeitig kommunizieren muss.

Auch Wi-Fi 6 kann für IoT-Dienste eingesetzt werden. Im Vergleich zu früheren WLAN-Standards bietet es eine erhebliche Verbesserung in Bezug auf die Anzahl der unterstützten Endgeräte. Wi-Fi 6 kann theoretisch

Tausende von Geräten in einem Netzwerk unterstützen. Dies ist besonders nützlich in Umgebungen wie Büros, wo viele Laptops, Smartphones und andere Geräte gleichzeitig verwendet werden (Luntovskyy u. Gütter. 2020).

Jedoch ist zu beachten, dass die tatsächliche Anzahl der unterstützten Endgeräte von verschiedenen Faktoren wie Netzwerkkonfiguration, Hardware usw. abhängt. Insgesamt bieten jedoch 5G und Wi-Fi 6 erhebliche Verbesserungen bei der Unterstützung einer großen Anzahl von Endgeräten im Vergleich zu 4G (3G, 4G, 5G: Was ist der Unterschied?).

### 2.2.6 Energieeffizienz

4G-Netzwerke wurden entwickelt, um einen ausgewogenen Kompromiss zwischen Leistung und Energieeffizienz zu bieten. Die meisten mobilen Geräte, die 4G nutzen, weisen eine akzeptable Batterielebensdauer auf, insbesondere im Standby-Modus.

5G hat sich hingegen auf die Verbesserung der Energieeffizienz im Vergleich zu 4G konzentriert. Dies ist besonders wichtig für das Internet der Dinge (IoT), da viele vernetzte Geräte eine lange Batterielebensdauer erfordern. 5G bietet eine erheblich verbesserte Energieeffizienz im Vergleich zu seinem Vorgänger 4G, um den Faktor 100. Dies bedeutet, dass 5G-Geräte mit geringem Datenvolumen eine Batterielebensdauer von bis zu 10 Jahren erreichen können. 5G stellt spezielle Mechanismen wie „Low Power Wide Area“ (LPWA) bereit, die speziell für energieeffiziente IoT-Anwendungen entwickelt wurden. Dies ermöglicht den Geräten, in den Energiesparmodus zu wechseln und den Energieverbrauch zu minimieren, wenn sie nicht aktiv Daten übertragen. Darüber hinaus ermöglicht Beamforming in 5G die präzisere Ausrichtung der Signale auf die verschiedenen Endgeräte, wodurch die Übertragung energieeffizienter wird (Trick 2020).

Bei der Entwicklung von Wi-Fi 6 wurde ebenfalls die Energieeffizienz berücksichtigt. Der Standard unterstützt „Target Wake Time“ (TWT), bei dem Geräte Zeiten planen können, in denen sie aktiv sind und Daten senden oder empfangen, und in den Ruhezustand wechseln können, wenn sie nicht benötigt werden. Dies trägt dazu bei, die Batterielebensdauer von Wi-Fi-fähigen Geräten zu verlängern (Luntovskyy u. Gütter. 2020).