

### Generationen von Mobilfunksystemen

Mobilfunksysteme der 1. Generation (1G) sind das A-, B- und das C-450 des C-Netzes gewesen. Alle drei Netze haben die analoge Sprachübertragung auf der Funkschnittstelle zwischen Mobilfunktelefon und Basisstation gemeinsam. Mit GSM wurde erstmals ein digitales Übertragungsverfahren für die Sprachübertragung verwendet. Damit wurde die Kapazität der Funkschnittstelle besser ausgelastet. GSM entspricht deshalb einem Mobilfunksystem der 2. Generation (2G). Auf dem Weg zum Mobilfunksystem der 3. Generation (3G) wurde für die Datenübertragung HSCSD und GPRS eingeführt, die auch unter 2.5G eingeordnet werden, als ein Zwischenschritt zwischen GSM (2G) und UMTS (3G). In vielerlei Dokumentation wird EDGE bereits zur 3. Generation gesehen, wenn auch dieser Datendienst in Verbindung mit GSM nicht an UMTS heranreicht. Eher wäre EDGE unter 2.75G einzuordnen. Hauptbestandteil von Mobilfunksystemen der 3. Generation (3G) sind Datendienste, wie z. B. Videotelefonie und der mobile breitbandige Internet-Zugang. Auf dem Weg zur 4. Generation (4G) von Mobilfunksystemen kommen noch mehrere Zwischenschritte mit HSPA, HSPA+ (3.5G) und LTE (3.9G). Die Zukunft der Mobilfunktechnik wird LTE Advanced (4G) sein.

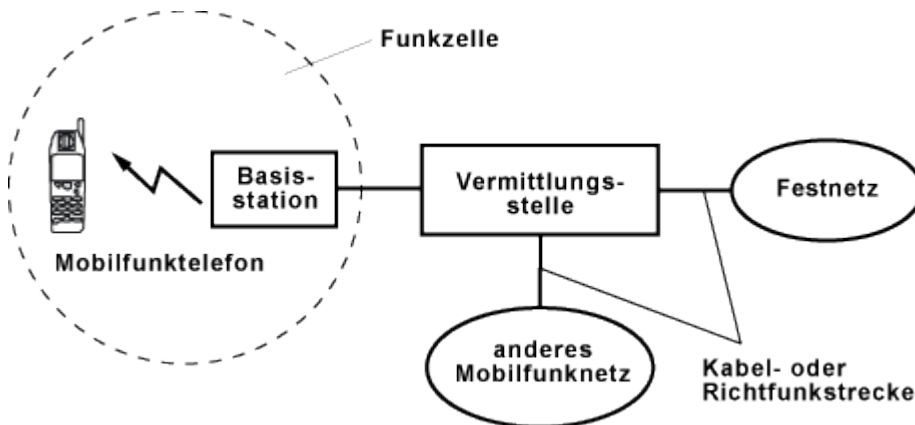
GSM: Groupe Spécial Mobile; "great signalling monster"; global System for mobile communications,

GPRS: General packet radio service; Kanalbündelung von maximal 8 Zeitschlitzten erlaubt theoretisch bis zu 171kbit/s

EDGE: Enhanced Data Rates for GSM Evolution; bezeichnet eine Technik zur Erhöhung der Datenübertragungsrate in GSM-Mobilfunknetzen durch Einführung eines zusätzlichen Modulationsverfahrens. Mit EDGE werden die Datendienste GPRS zu E-GPRS (Enhanced GPRS) und HSCSD zu ECSD erweitert. EDGE stellt dabei eine Weiterentwicklung der GSM-Technik dar. Es ist im Grunde ein GSM mit mehr Bits pro Baud

Generation	Technik	Übertragung	Bandbreite
1G	AMPS	analog, leitungsvermittelt	-
2G	GSM	digital, leitungsvermittelt	9,6 kBit/s
2.5G	HSCSD	digital, leitungsvermittelt	57,6 kBit/s
	GPRS	digital, paketvermittelt	115 kBit/s
2.75G	EDGE	digital, paketvermittelt	236 kBit/s
3G	UMTS	digital, paketvermittelt	384 kBit/s
3.5G	HSPA	digital, paketvermittelt	14,4 MBit/s
3.9G	LTE	digital, paketvermittelt	150 MBit/s
4G	LTE Advanced	digital, paketvermittelt	1 GBit/s

## Mobilfunknetze



Die Mobilfunknetze entwickeln sich weltweit zu Multi-Mobilfunknetzen, die von GSM (GPRS, EDGE) über UMTS (HSPA) auch LTE beherrschen. Egal welches Mobilfunksystem, alle bestehen aus einigen elementaren Bestandteilen, die alle Systeme gemeinsam haben. Zum Beispiel das Mobilfunktelefon und die Basisstation. In den meisten Fällen ist dieser kleine Teil der Übertragungsstrecke zwischen Mobilfunktelefon und Basisstation die einzige Funkübertragungsstrecke. Die Übertragungsstrecke von der Basisstation zum Kernnetz wird als Backhaul bezeichnet und erfolgt über leitungsgebundene E1/E3-Verbindungen oder Glasfaserverbindungen. Nur in ganz entlegenen Gebieten, wo weit und breit keine Kabel liegen oder deren Nutzung zu teuer ist, werden Richtfunkstrecken verwendet.

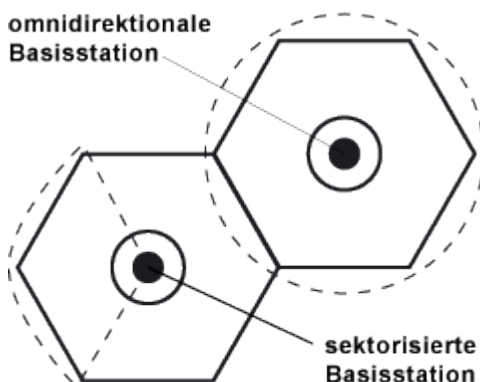
Im Prinzip ist ein Mobilfunktelefon ein schnurloses Telefon, dessen Basisstation sich nicht in unmittelbarer Nähe befindet, sondern einige Kilometer weiter weg.

Für den Betrieb der Mobilfunknetze sind in der Regel die Netzbetreiber verantwortlich. Die neigen jedoch dazu, den Betrieb ihrer Mobilfunknetze an die Mobilfunk-Ausrüster abzugeben. Die Ausrüster übernehmen dabei das komplette Netzmanagement.

### Mobilfunkzellen - Struktur der Mobilfunknetze

Ein Mobilfunknetz ist in Zellen aufgeteilt. Der Durchmesser einer Zelle beträgt mehrere Kilometer. In jeder Zelle hat der Mobilfunknetzbetreiber eine oder mehrere Basisstationen aufgebaut.

Bewegt sich ein Handy-Nutzer durch das Mobilfunknetz, dann bewegt er sich durch viele Zellen. Manchmal kommt es vor, dass er sich in einen Bereich einer Zelle bewegt, der sehr schlecht oder gar nicht mit Funkwellen von der Basisstation erreicht wird. Er befindet sich dann in einem Funkloch. Diese Funklöcher kommen sehr häufig vor. Was man in der Regel nicht merkt. Meistens sind diese Funklöcher ganz klein. Doch es gibt auch Funklöcher, die ganze Landstriche überziehen.



Das Handy strahlt seine Funkwellen in alle Richtungen aus. Bei den Basisstationen unterscheidet man zwischen der omnidirektionalen und der sektorisierten Basisstation.

Die omnidirektionale Basisstation steht im Zentrum einer Funkzelle und strahlt ihre Funkwellen genau wie

das Handy in alle Richtungen (360° Abstrahlwinkel der Antenne) aus.

Die sektorisierte Basisstation wird zur Erhöhung der Gesprächskapazität eingesetzt. Sie strahlt ihre Funkwellen nur in einem von drei Sektoren einer Funkzelle aus.

Da der Mobilfunkkunde nicht immer innerhalb einer Zelle bleibt, kommt es vor, dass er sich an den Rand einer Funkzelle bewegt. Das Netz erkennt dann, wann es besser ist, eine neue Verbindung zu einer anderen Basisstation aufzunehmen. Das Netz entscheidet dann anhand der Verbindungsqualität, welche Basisstation für eine Verbindung besser geeignet ist.

Die Verbindungsqualität zu den Basisstationen wird ständig geprüft. Bei Bedarf wird die Basisstation gewechselt. Dabei wird die Verbindung zur alten Basisstation erst abgebrochen, wenn die neue Verbindung steht. Der Handynutzer merkt davon nichts. Seine Sprach- und Datenverbindungen werden unterbrechungsfrei fortgeführt.

## **Netzbetreiber und Service-Provider**

Der Netzbetreiber ist derjenige, der das Netz aufbaut, wartet und instand hält. In Deutschland sind das die Firmen T-Mobile, Vodafone, E-Plus und O2.

Den eigentlichen Anschluss an das Mobilfunknetz und den Kartenvertrag erhält man nicht zwangsläufig vom Netzbetreiber. Ein sogenannter Service-Provider kauft von den Netzbetreibern Minuten und Anschlüsse (Rufnummern) ein und schaltet die SIM-Karte frei und verschickt auch die monatliche Gebührenabrechnung. Durch die Mittler- bzw. Händlerfunktion zwischen Nutzer und Netzbetreiber entstehen sehr viel Tarife und Tarifoptionen, die auf unterschiedliche Kundenbedürfnisse zugeschnitten sind.

Der Kunde kann sich so den für sich günstigsten Tarif herausuchen. Die Auswahl an Tarifen der unterschiedlichsten Anbieter ist jedoch groß. Jeder Provider bietet seine Leistungen (Sprache, Daten, SMS) zu unterschiedlichen Preisen an. So kann eine Änderung des Kommunikationsverhaltens zu einer teureren Gebührenrechnung führen als ursprünglich geplant.

## **SIM-Karte**

Die SIM-Karte ist eine Telefonkarte mit einem Chip, auf dem alle wichtigen Daten des Besitzers und seines Handys gespeichert sind (z. B. das Telefonbuch). Jede Karte hat eine weltweit einmalige Kennung.

Auf dem Chip befindet sich auch der vierstellige Sicherheitscode, die Personal Identity Number (PIN). Sie schützt vor unberechtigtem Zugriff auf das Handy. Sie hat mit dem Mobilfunknetz jedoch nichts zu tun.

Die SIM-Karte kann von einem Mobiltelefon ausgebaut und in ein anderes eingebaut werden, so dass die zugewiesene Rufnummer über ein anderes Mobiltelefon genutzt werden kann. Voraussetzung ist, dass das Gerät nicht per SIM-Lock gesperrt ist.

Für das UMTS-Netz gibt es eine spezielle SIM-Karte, die U-SIM. Es ist eine verbesserte SIM-Karte mit mehr Speicherplatz und Funktionen.

## **MultiSIM-Karte**

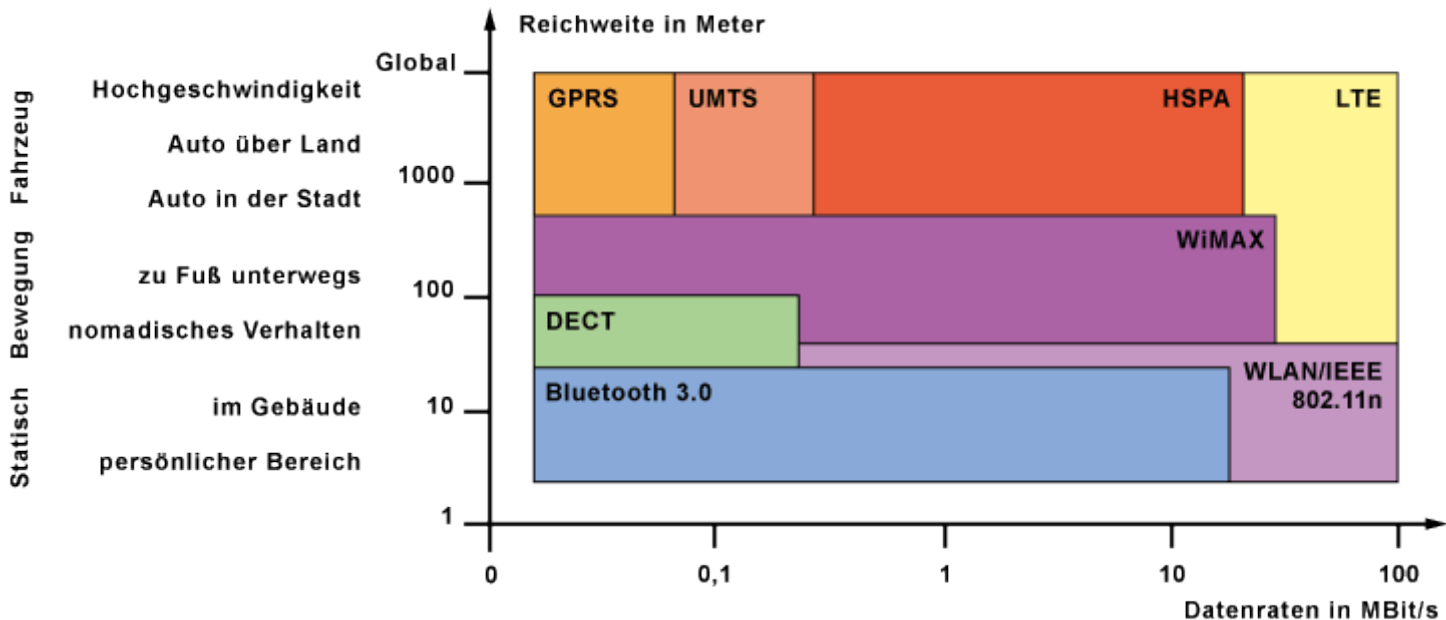
MultiSIM ist die Möglichkeit mit einem Mobilfunkvertrag mehrere SIM-Karten zu verwenden. Für alle SIM-Karten gilt der gleiche Vertrag und die gleiche Rufnummer. Mehrere SIM-Karten können in verschiedenen Geräten gleichzeitig genutzt werden. Während man mit dem Handy telefoniert, kann man gleichzeitig mit dem Notebook auf das Internet zugreifen. Oder man hat eine Karte im Handy und eine andere Karte im Autotelefon.

Da alle SIM-Karten die gleiche Rufnummer haben, klingeln bei einem Anruf alle Geräte gleichzeitig. Bei abgehenden Telefonaten wird die gleiche Rufnummer übermittelt. Alle Geräte können sogar gleichzeitig genutzt werden. Was nicht geht, dass sich die Geräte untereinander gegenseitig anrufen.

Je nach Mobilfunkbetreiber hat die MultiSIM-Karte eine andere Bezeichnung. Bei Bedarf muss man genauer nachfragen.

## Reichweite und Bandbreite im Vergleich

Daten- und Sprachübertragung (Telefonie) sind die Hauptanwendungsgebiete der Mobilfunktechnik. Während bei der Telefonie die Anforderungen an die Bandbreite eher gering sind, spielt die Reichweite eine viel größere Rolle. Telefonieren mit Mobilfunktechnik heißt vor allem überall erreichbar zu sein und selber jederzeit telefonieren zu können. Da sind Abstriche bei der Sprachqualität kein Problem. Es lässt sich auch unter schlechten Empfangsbedingungen durchaus kommunizieren.



Bei der Datenübertragung ist ungünstiger Netzempfang schlecht für die Übertragungsgeschwindigkeit. Ein schlechter Empfang führt zu einer höheren Fehlerrate. Ist die Datenübertragung gestört, müssen defekte oder verlorene Daten erneut übertragen werden. Das geht zu Lasten der effektiven Übertragungsgeschwindigkeit. Zum Ausgleich wird die Übertragungsrate reduziert und somit auch die Fehlerrate. Aus diesem Grund schränkt man auch die Reichweite (Funkausbreitung) von Funksystemen für Datendienste ein und erhöht dadurch die Datenrate auf kurze Distanzen.

Die Bandbreite und Reichweite von Mobilfunksystemen hängt unweigerlich zusammen. Will man viel Reichweite, muss man die Bandbreite einschränken und aufgrund der Reichweite müssen sich viele Teilnehmer die Bandbreite teilen. Will man viel Bandbreite, muss man die Reichweite reduzieren, damit weniger Störungen die Funkschnittstelle belasten und die Anzahl der erreichbaren Teilnehmer klein bleibt.

## Sprachqualität im Mobilfunk

Viele unterschiedliche Faktoren haben auf die Sprachqualität im Mobilfunk Einfluss. Die verwendeten Hardwarekomponenten, wie Mikrofon, Hörkapsel, DSP und das Gehäusematerial und Gehäuseform spielen eine entscheidende Rolle. Und auch die Software im Mobilfunktelefon beeinflusst die Sprachqualität. Betrachtet man die Nutzungsumgebung eines Mobilfunktelefons, so wird es in der Regel in Umgebungen mit einer Vielzahl unterschiedlicher Geräuschkulissen eingesetzt. Jede Umgebung hat dabei ihr ganz eigenes Geräuschespektrum, das manchmal sehr laute Hintergrundgeräusche erzeugt. Mobilfunktelefone müssen in der Lage sein, diese störenden Geräusche auszublenden oder stark zu unterdrücken. Je besser das gelingt, desto besser ist die Verständlichkeit der Sprache.

Gleichzeitig wächst, bei der intensiven Nutzung des Mobilfunks, die Forderung nach einer besseren und konstanteren Sprachqualität. Doch bessere Mikrofone und Hörkapseln, sowie die Optimierung des Gehäuses verteuern die Produkte.

Durch die Miniaturisierung entsteht eine immer komplexere Elektronik. Denn die Elektronik muss das leisten, was die Akustik des Gehäuses nicht leisten kann. Das bedeutet, die Rechenleistung und somit auch der Energieverbrauch steigen.

## Weitere Mobilfunk-Grundlagen

- [Die Geschichte des Mobilfunks](#)
- [Handy / Smartphone / Datenkarte](#)
- [Endgeräte für mobiles Internet](#)
- [Sprach-Codecs im Mobilfunk](#)
- [MVNO - Mobile Virtual Network Operator](#)
- [Roaming](#)
- [Handover](#)

## LTE - Long Term Evolution

Long Term Evolution, kurz LTE, ist die erste weltweit gültige Mobilfunktechnik für Nordamerika, Europa und Asien. LTE ist eine Weiterentwicklung von UMTS und HSPA. Der damit einhergehende Entwicklungssprung ist mit dem von GSM auf UMTS vergleichbar. LTE wird als natürlicher Entwicklungsschritt nach UMTS gesehen.

Unter der Bezeichnung HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access) wird neben LTE noch ein weiterer Evolutionspfad von UMTS aufgezeigt. Dabei handelt es sich um eine logische Weiterentwicklung von UMTS, immer noch mit dem ursprünglichen Kanalzugriffverfahren CDMA (Code Division Multiple Access) und der festen Kanalbandbreite von 5 MHz, jedoch mit intelligenten Antennensystemen (MIMO) und höherwertigen Modulationsverfahren.



LTE wird die bisherigen GSM-, UMTS- und HSPA (High Speed Packet Access) -Mobilfunknetze nicht ersetzen, sondern ergänzen. Es wird ein nahtloser Übergang von der UMTS-Technik zu LTE geben. Durch die weite Verbreitung von UMTS- und HSPA-Endgeräten werden beide Techniken mehrere Jahre koexistieren. Mit LTE entwickelt sich der Mobilfunk zunehmend zu einer Alternative zur Überbrückung der letzten Meile und damit als Alternative zu Kabelmodemtechnik und DSL.

Bei LTE handelt es sich nicht, wie so oft zu lesen, um die vierte Mobilfunk-Generation (4G). Die Generation wird von der ITU-T festgelegt. Die Einteilung ist in einer Spezifikation festgelegt. Demnach ist LTE ein 3.9G-Mobilfunknetz. Der Grund, LTE setzt die 4G-Definition nicht vollständig um. Leider kam die Spezifikation erst nach dem sich jeder an die willkürliche Festlegung gewöhnt hat. Deshalb findet man immer wieder Aussagen, dass LTE 4G sei. Doch erst LTE Advanced entspricht der 4G-Definition.

Die Leistungsziele für LTE wurden von der Standardisierungsorganisation 3GPP (3rd Generation Partnership Project) während den Jahren 2005/2006 definiert. Damit sind auch die wichtigsten technischen Eckpunkte der neuen Funkschnittstelle festgelegt worden:

- Signifikante Erhöhung der Datenrate im Downlink auf bis zu 100 Mbit/s mit der Kanalbandbreite von 20 MHz;
- Signifikante Erhöhung der Datenrate im Uplink auf bis zu 50 Mbit/s mit der Kanalbandbreite von 20 MHz;
- Kanalbandbreiten von 1,25 MHz, 2,5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz und 20 MHz;
- Kanalzugriffverfahren OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access);
- Verzögerungszeit (Latenzzeit) über die Luftschnittstelle vom Handy bis zum Festnetz soll kürzer als 5 ms sein.
- Duplex-Verfahren FDD (Frequency Division Duplex) und TDD (Time Division Duplex) werden unterstützt;
- Höhere Datenraten am Zellenrand;
- Mobilität bis zu 500 km/h (optimiert für 0 - 15 km/h);
- Integration von intelligenten Antennen (MIMO - Multiple Input Multiple Output);
- Tiefe Übertragungskosten pro Bit über die Luftschnittstelle;
- Einfache Architektur, weniger Netzelemente, offene Schnittstellen;
- Möglichst kleiner Energieverbrauch der Endgeräte (hohe Autonomie).

Die wichtigste Neuerung von LTE gegenüber dem heutigen UMTS-Standard ist die Einführung des Kanalzugriffsverfahrens OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) im Downlink und SC-FDMA (Single Carrier - Frequency Division Multiple Access) - einer mit OFDM verwandten Methode - im Uplink. Diese Verfahren ermöglichen den Betrieb des Systems mit Kanalbandbreiten von 1,25 MHz bis 20 MHz. Damit können Mobilfunksysteme in verschiedensten Bandbreiten eingesetzt werden und sind nicht an das heute übliche Kanalraster von 5 MHz gebunden.

LTE wird auch Gleichwellenfunk (SFN - Single Frequency Network) ermöglichen und damit rundfunkartige Dienste (Broadcast/Multicast) mindestens so effizient übertragen, wie dies die heutigen darauf spezialisierten DVB-T bzw. DVB H Rundfunksysteme tun.

Um die Performance von verschiedenen Mobilfunksystemen zu vergleichen, werden üblicherweise die maximal möglichen Datenraten (im Downlink) und die damit verknüpfte Mobilität in einem so genannten "Van"-Diagramm dargestellt (das Diagramm ähnelt der Silhouette eines Autos, daher der Name). In der folgenden Abbildung sind die wichtigsten Mobilfunktechnologien anhand dieser Darstellung einander gegenübergestellt:

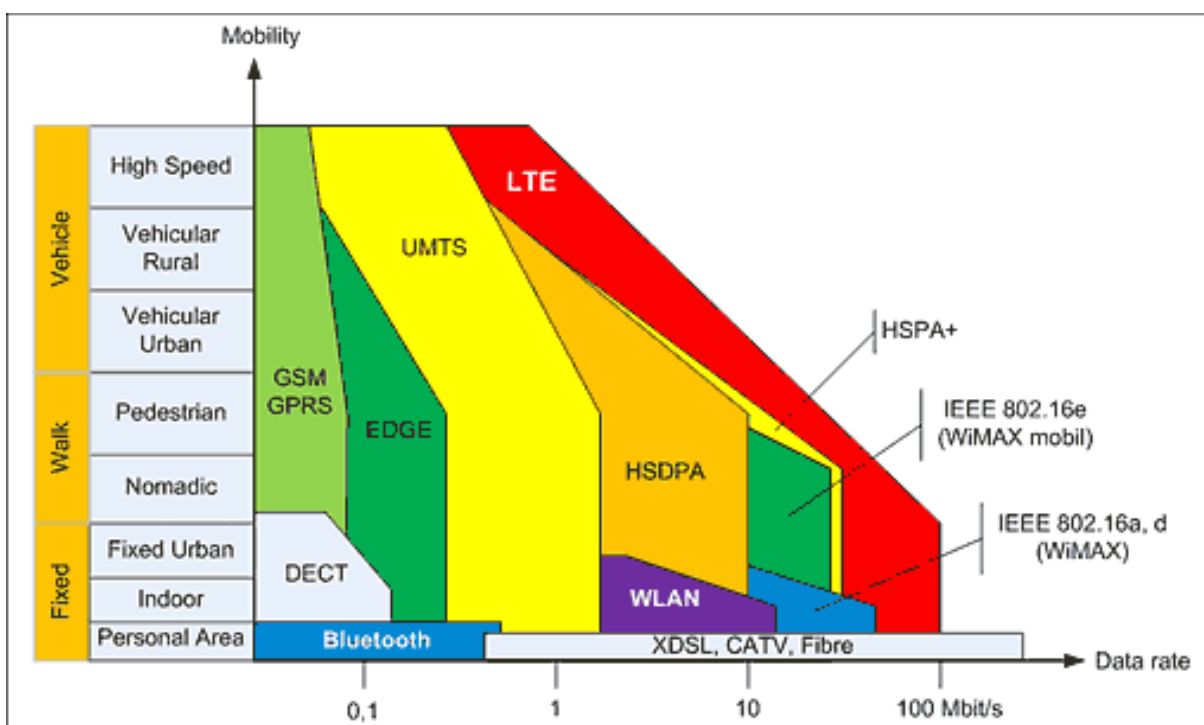


Abbildung 1: Van-Diagramm mit den wichtigsten Mobilfunktechnologien.

## Vorteile von LTE

Die Einführung innovativer und benutzerfreundlicher Mobiltelefone, wie z. B. das iPhone oder der Android-Smartphones, haben gezeigt, dass damit die Nutzung des mobilen Internets stark ansteigt. Die Erweiterung der Netzkapazität ist dann nur noch durch Zellteilung möglich. Dabei wird eine Zelle mit einer Basisstation in zwei Basisstationen aufgeteilt, was die Anzahl der Basisstationen erhöht aber auch sehr kostspielig ist. Eine Alternative ist, das bereits existierende Netz mit einer Mobilfunktechnik aufzurüsten, die die Netzkapazität deutlich erhöht. LTE ist diese Mobilfunktechnik. LTE erhöht die Kapazität gegenüber HSPA um Faktor 3,5 (im gleichen Frequenzspektrum) und gegenüber HSPA+ um den Faktor 2,5 (im gleichen Frequenzspektrum). Da die Kosten für eine neue Basisstation um das zehnfache einer Aufrüstung von LTE übersteigt, ist LTE für die Netzbetreiber um einiges attraktiver.

Eine neue Technik ist auch aus anderen Gründen notwendig. Tests mit Mobilfunknutzern haben gezeigt, dass die Reaktionszeit des Netzes mit 60 ms als "langsam" empfunden wird. LTE mit 10 ms Reaktionszeit soll das Warten auf Daten reduzieren, so dass es für die iPhone-Generation akzeptabel ist. Denn was für den Mobiltelefonierer die Sprachqualität ist, das ist für den mobilen Internet-Surfer die Reaktionszeit auf Datenanforderungen. Zum Beispiel der Abruf von E-Mails oder Webseiten.

Doch LTE wird nicht nur aufgrund der höheren Übertragungskapazität eingeführt, sondern auch weil der Betrieb um bis zu 70% geringere Kosten verspricht. Schon aus diesem Grund ist LTE für die Mobilfunknetzbetreiber attraktiver als zum Beispiel WiMAX.

## Übertragungsrate in der LTE-Spezifikation

Die Geschwindigkeitsangaben beziehen sich auf das theoretische Maximum.

Spezifikation	Downstream	Upstream	Leistung	Anmerkung	Normiert
<b>LTE Release 8</b>	172,8 MBit/s	57,6 MBit/s	16QAM, 2x2 MIMO, 20 MHz	Netzelemente und Endgeräte	2008
<b>LTE Release 9</b>	326,4 MBit/s	86,4 MBit/s	16QAM, 4x4 MIMO, 20 MHz	MBMS	2009
<b>LTE Release 10</b>	1 GBit/s	500 MBit/s	16QAM, 8x8 MIMO, 100 MHz	LTE Advanced	2011

## Übertragungsrate aktuell

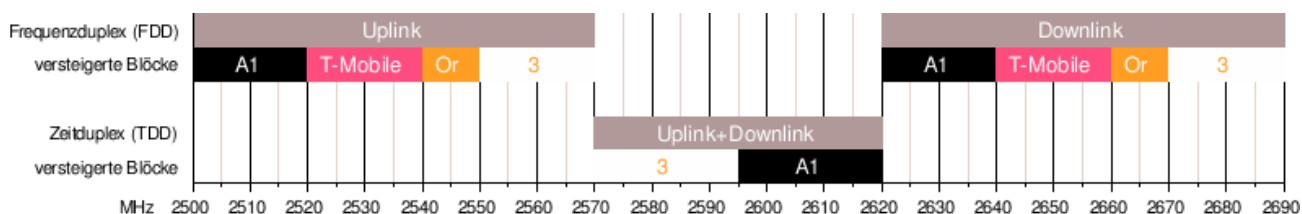
LTE steht vor allem für hohe Übertragungsraten und kurze Verbindungszeiten. Beides sind die Hauptkritikpunkte an GSM, UMTS und auch an HSPA. Prinzipbedingt sind alle Mobilfunktechniken langsamer und träger, als Übertragungstechniken für Leitungen und Kabel. Viele Anwendungen und in vielen Situationen ist man deshalb immer noch auf kabelgebundene Übertragungstechniken angewiesen. Mit LTE kommt man erstmals in die Nähe, was mit DSL oder Kabeltechnik schon lange möglich ist.

Die Steigerung der Übertragungsrate soll vor allem durch bessere Modulationsverfahren, flexiblere Frequenznutzung und größere Kanalbandbreiten erreicht werden. LTE erreicht laut Spezifikation pro 20-MHz-Band bis zu 300 MBit/s im Downlink und 75 MBit/s im Uplink. In Deutschland existieren jedoch keine Frequenzbereiche mit 20 MHz. Die Mobilfunknetzbetreiber verfügen im 800-MHz-Band nur über 10-MHz-Blöcke (jeweils für Up- und Downlink) und erreichen damit höchstens 150 MBit/s im Downlink.

### Situation in Österreich:

Am 20. September 2010 wurde die Frequenzauktion abgeschlossen. Dabei wurden Frequenzen im 2,6-GHz-Bereich wie folgt vergeben:

Nutzer	Frequenzduplex (FDD)		Zeitduplex (TDD)	Preis 2010
	Uplink	Downlink	Uplink+Downlink	
<a href="#">Mobilkom Austria</a> (A1)	2500–2520 MHz	2620–2640 MHz	2595 - 2620 MHz	13,248 Mio. €
<a href="#">T-Mobile Austria</a>	2520–2540 MHz	2640–2660 MHz	-	11,247 Mio. €
<a href="#">Orange Austria</a>	2540–2550 MHz	2660–2670 MHz	-	4 Mio. €
<a href="#">3</a>	2550–2570 MHz	2670–2690 MHz	2570 - 2595 MHz	11,03 Mio. €



Die Realität sieht so aus, dass die Netzbetreiber pro Sektor einer Basisstation rund 50 bis 75 MBit/s bereitstellen (Stand 2011). Später ist bis zu 100 MBit/s im Downlink und bis zu 50 MBit/s im Uplink geplant. In der Praxis liegt die Übertragungsrate weit darunter. Je mehr Nutzer die Bandbreite gleichzeitig nutzen, desto geringer fällt die Übertragungsrate pro Teilnehmer aus. Es ist davon auszugehen, dass mehr als 2 bis 3 MBit/s pro Teilnehmer unter normalen Bedingungen kaum möglich ist.



Zu einer beeindruckenden Übertragungsrate von über 1 GBit/s kommt man, indem man mehrere 20-MHz-Kanäle gleichzeitig nutzt (Multi-Carrier-Technik) und ein 4x4-MIMO-System (Multiple Input Multiple Output) einsetzt. Diese Techniken werden in LTE Advanced eingesetzt. In der Praxis sind jedoch nur wenige Netzbetreiber in der Lage mehrere Kanäle zu bündeln. Die nutzbaren Frequenzbereiche sind ein knappes Gut und auf mehrere Netzbetreiber verteilt. Es ist davon auszugehen, dass andere Frequenzbereiche, die beispielsweise von GSM oder UMTS genutzt werden, irgendwann für LTE geräumt werden.

Angestrebt wird eine Latenzzeit von unter 10 ms. In der Praxis ist von einer Latenzzeit unter 30 ms die Rede. Damit verhält sich ein LTE-Anschluss in etwa wie ein DSL-Anschluss. Die verfügbare Bandbreite und die Antwortzeiten sind ähnlich.

## LTE-Übertragungstechnik

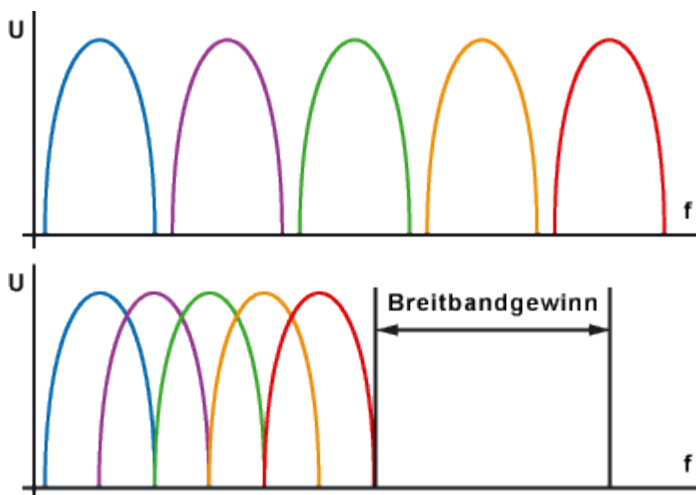
### OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplex

OFDM ist ein Vielträgerverfahren, in dem es den Datenstrom innerhalb des verfügbaren Frequenzbereichs auf eine Vielzahl von schmalen Frequenzträgern aufteilt. Dazu wird der serielle Datenstrom in mehrere parallele Datenströme aufgeteilt. Die einzelnen Datenströme werden den einzelnen Frequenzträgern zugeteilt. Die einzelnen Frequenzträger werden wiederum auf herkömmliche Weise moduliert. Zum Beispiel mit QAM.

Wegen der Schmalbandigkeit der einzelnen Träger, kann man davon ausgehen, dass der Phasenverlauf und das Dämpfungsverhalten in den Träger (Subbändern) weitgehend gleich bleibt. Dadurch entfällt eine aufwendige Kanalentserrung.

Kommt es innerhalb des Frequenzspektrums zu Störungen, dann ist nicht der gesamte Datenstrom betroffen, sondern nur ein einzelner Träger. Insbesondere bei schmalbandigen Störungen wird nur ein Teil der Träger beeinflusst. Im Vergleich zu einem Einträgerverfahren müssen im Störfall weniger Daten wiederholt übertragen werden.

Auf Grund der vielen Subträger kann man auch auf einzelne Subträger verzichten, wenn Sie aus irgendwelchen Gründen beeinträchtigt sind oder ausfallen. Zusätzlich kann man mit Fehlerkorrekturverfahren dem bis zu einem gewissen Grad entgegenwirken. OFDM zeichnet sich deshalb als äußerst robust aus.



Damit sich die dicht gepackten Subträger wegen der spektralen Überlappung nicht gegenseitig beeinflussen können, liegt die Mittenfrequenz der einzelnen Träger exakt im Nulldurchgang der Nachbarträger. Das minimiert Übersprechen und man kann auf Schutzabstände verzichten. Auf diese Weise wird das verfügbare Frequenzspektrum optimal ausgenutzt. Mit Equalizern und Korrekturfunktionen lässt sich bei OFDM sogar eine festgelegte Übertragungsrate sicherstellen.

Das Signal wird für jeden einzelnen Träger mit der Inverse Fast-Fourier-Transformation (IFFT) erzeugt. Bei diesem Verfahren steigt der Berechnungsaufwand mit der Anzahl der Subträger. Doch diese fest programmierten Funktionen lassen sich leicht in die Hardware implementieren. Das ist einfacher, als wenn man für jeden Datenstrom einen eigenen Signalgenerator in die Hardware baut.

## COFDM - Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing

OFDM in Kombination mit FEC (Forward Error Correction) ist COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Dieses Verfahren kann aus den gestörten Eingangssignalen die fehlerhaften Daten rekonstruieren, gestörte Frequenzbereiche ausblenden und je nach Übertragungsqualität, die Subträger unterschiedlich modulieren.

## FDM - Frequency Division Multiplex

Um die Datenrate zu erhöhen, sendet man mehrere Symbole gleichzeitig auf verschiedenen Trägerfrequenzen (FDM). Signale mit längerer Dauer brauchen eine geringere Bandbreite. Die Datenrate wird erhöht und die Unempfindlichkeit gegenüber Mehrwegeausbreitung verbessert.

## OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiplex Access

Beim Zugriffsverfahren, OFDMA genannt, werden den Subträgern unterschiedliche Nutzer zugewiesen. In einem Funkssystem können sich damit mehrere Teilnehmer eine Basisstation teilen.

## Multiplex-Verfahren bei LTE

Die LTE-Übertragungstechnik ist für einen Frequenzbereich von 700 bis 2.700 MHz ausgelegt (0,7 bis 2,7 GHz). Die Übertragungskanäle können flexibel zwischen 1,25 und 20 MHz variieren. Dadurch ist eine leichtere Anpassung an die weltweit unterschiedlichen Frequenzbereiche möglich. Damit internationales Roaming möglich ist, müssen die Endgeräte multifrequenzfähig sein.

LTE definiert eine völlig neue Funkschnittstelle. Das Übertragungsverfahren basiert auf OFDM (mit 64QAM) und SC-FDM (Single Carrier-FDM). Der Zugriff auf die Funkschnittstelle erfolgt im Downlink mit OFDMA und im Uplink mit SC-FDMA. Zusätzlich ist MIMO (Mehrfach-Antennen-System) vorgesehen, das bereits bei HSPA+ und in WLANs nach IEEE 802.11n verwendet wird.

LTE arbeitet mit skalierbaren und individuellen Kanälen. Für den Downlink wird OFDMA verwendet. OFDMA teilt das zur Verfügung stehende Frequenzband (optimal 20 MHz) in viele schmale Bänder (Kanäle) auf. Das bedeutet, dass LTE mit unterschiedlich großen Frequenzbändern auskommen. Die Bandbreite wird flexibel genutzt, um das Äußerste an Übertragungsleistung aus den Frequenzen herauszuholen.

Spezielle Algorithmen wählen die geeigneten Kanäle aus und berücksichtigen dabei die Einflüsse aus der Umgebung. Dabei werden nur die Träger zur Übertragung genutzt, die für den Nutzer am günstigsten sind.

Für den Uplink wird SC-FDMA verwendet (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Das ist ein Einträgerzugriffsverfahren und OFDMA sehr ähnlich. SC-FDMA weist geringere Leistungsschwankungen auf und macht einfacher Leistungsverstärker möglich. Das schont vor allem den Akku mobiler Geräte.

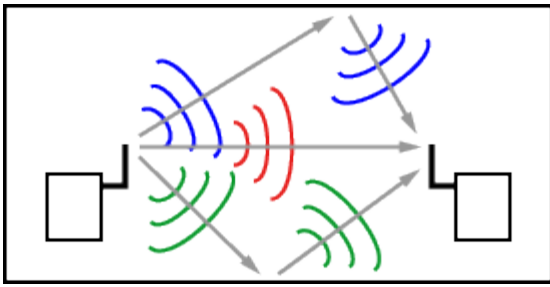
LTE arbeitet auch mit räumlich separierte Datenströmen. Die LTE-Spezifikation sieht 4 Antennen in der Basisstation und 2 Antennen in den Endgeräten vor. Das Sendesignal wird zur Übertragung an mehrere Sendeantennen weitergeleitet. Die Empfangssignale werden von zwei Antennen empfangen (MIMO). Aus beiden Signalen wird dann ein besseres Signal herausgerechnet. Damit erreicht man einen besseren Datendurchsatz, weil beide Sende- und Empfangspfade nicht den gleichen Störungen (Verluste und Interferenzen) unterliegen.

## MIMO - Multiple Input Multiple Output

MIMO ist der Oberbegriff für Verfahren, die Funkverbindung mit mehreren Antennen verbessern. Mehrere Antennen liefern ein besseres Empfangssignal, vergrößern die mögliche Distanz oder erhöhen den Datendurchsatz.

## Warum MIMO?

Bei der Entwicklung neuer Funktechniken stößt man bei Ein-Antennen-Systemen immer öfter an das technisch Machbare. Die Strategie, ein immer höherstufiges Modulationsverfahren einzusetzen, lässt das Kosten-Nutzen-Verhältnis aus dem Ruder laufen. Denn die Hochfrequenzelektronik müsste eine deutlich höhere Genauigkeit aufweisen, um aus einem schlechten Funksignal noch ein brauchbares Datensignal erkennen zu können.



Mehrere Antennen verhelfen dem Empfänger zu räumlichen Informationen (Spatial Multiplexing), was zur Steigerung der Übertragungsrate genutzt werden kann. Das ist besonders in Situationen vorteilhaft, wo keine Sichtverbindung zwischen den Sende- und Empfangsstationen besteht. Zum Beispiel in Gebäuden, wo sich die Signale aufgrund von Decken und Wänden mehrfach ausbreiten. WLANs mit MIMO-Technik profitieren dann durch die Mehrwegeausbreitung.

## MIMO in Mobilfunknetzen

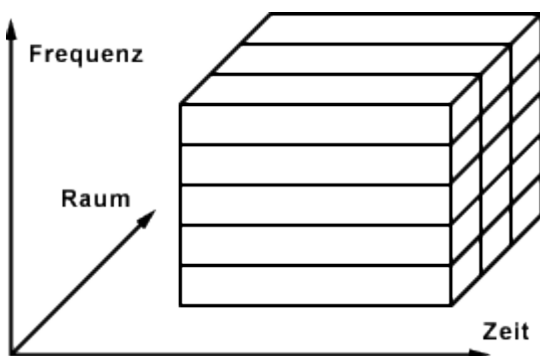
Seit dem Ausbau der Mobilfunknetze zu Breitbandnetzen sind die Entwickler auf der Suche nach Ansätzen zur Kapazitätssteigerung. Wegen der Bandbreitenbeschränkung aufgrund kleiner Frequenzbereiche, verschiedener Funktechniken innerhalb des Frequenzspektrums und der unterschiedlichen Qualität der Funkschnittstelle, wird immer wieder an Verfahren gearbeitet, durch die die Funktechnik grundlegend verbessert wird. Als zukunftsweisend wird die Verwendung mehrerer Antennen gesehen. Diese Technik, die MIMO genannt wird, kommt bereits in WLANs nach IEEE 802.11n zum Einsatz. Und auch die Arbeitsgruppen rund um die Standardisierung von WiMAX, HSPA und LTE sind an dieser Technik interessiert.

Ohne MIMO wird in Zukunft keine Funktechnik mehr auskommen. Egal ob WLAN, WiMAX, UMTS oder LTE.



## MIMO-Prinzip

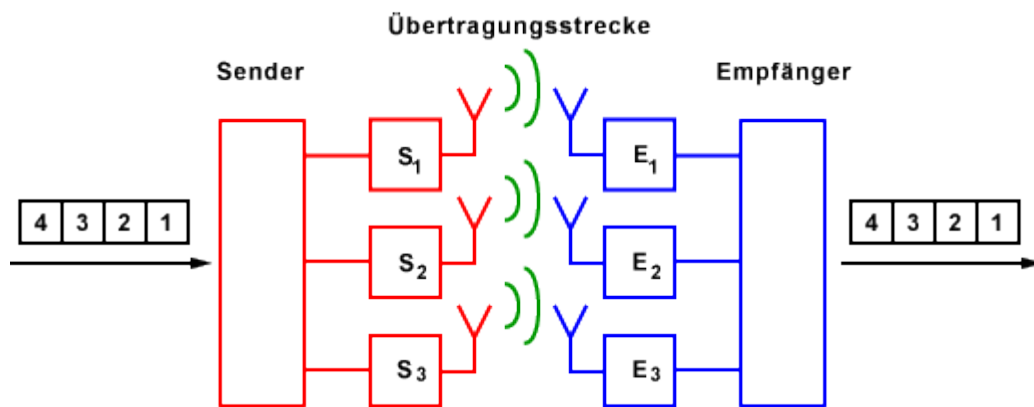
Das Prinzip, das bei MIMO zur Anwendung kommt, stammt aus der militärischen Radartechnik, wo MIMO schon seit vielen Jahren genutzt wird. Dort setzt man nicht nur eine, sondern gleich mehrere baugleiche Antennen ein. Die Antennen haben zueinander mindestens eine halbe Wellenlänge ( $\lambda/2$ ) der Trägerfrequenz Abstand.



Der bis dahin üblichen Frequenz-Zeit-Matrix wird eine 3. Dimension, der Raum, hinzugefügt. Dabei wird das Datensignal über mehrere Antennen gesendet. Gleichzeitig werden auch mehrere Empfangsantennen verwendet. Die signalverarbeitende Empfangseinheit bekommt durch mehrere Funksignale eine räumliche Information. Denn bei zwei Antennen trifft das selbe Funksignal aus zwei verschiedenen Richtungen beim Empfänger ein. Jedes eingehende Funksignal weist in der Regel einen eigenen "räumlichen Fingerabdruck" auf, der auch "Spatial Signature" genannt wird. Der Empfänger setzt die Signale wieder passend zusammen. Dadurch verbessert sich die Leistung des ganzen Funksystems erheblich.

## MIMO in der Praxis

MIMO-Systeme müssen die Übertragung ständig an die wechselnden Eigenschaften des Funkkanals anpassen. Die komplexen Sende- und Empfangssysteme von Mehrantennensystemen in Hardware zu implementieren ist eine große Herausforderung. Insbesondere deshalb, weil eine hohe Rechenleistung benötigt wird und in mobilen Geräten der Energiebedarf ansteigt.



Die einfachste MIMO-Hardware besteht aus zwei Sendeantennen und einer Empfangsantenne. Um die Leistungsfähigkeit optimal auszunutzen, werden Antennen immer paarweise eingesetzt. Dadurch vereinfachen sich die MIMO-Signalverarbeitungsalgorithmen und führen zu einem optimalen Signal-Rausch-Abstand.

Die Bandbreite lässt sich mit der Anzahl der Sendeantennen linear erhöhen. Das Trennen der einzelnen Signale ist eine einfache lineare Matrizenrechnung, die von leistungsfähigen Prozessoren berechnet wird. Geht man von dieser Rechnung aus, dann ließe sich theoretisch die Übertragungskapazität ins unendliche steigern.

Jeweils 8 Sende- und Empfangsantennen gelten als das Maximum. Je mehr Sende- und Empfangsantennen, desto größer ist die Leistungsaufnahme durch die Hardware, desto größer die Wärmeentwicklung. Mal abgesehen vom enormen Platzbedarf. So spielt bei kleinen tragbaren Geräten der Kompromiss zwischen Preis und Leistung eine große Rolle.

Mit jeweils 3 Sende- und Empfangsantennen erreicht man bereits optimale Systemvoraussetzungen für den Praxiseinsatz.

### Vorteile durch Mehrfach-Antennen-Systeme

- größere Empfangsleistung (Gruppengewinn)
- Störerunterdrückung (Interferenzunterdrückungsgewinn)
- bessere Verbindungsqualität (Diversitätsgewinn)
- höhere Übertragungsraten (Multiplexgewinn)

Dabei muss man beachten, dass die 4 Gewinntypen nicht gleichzeitig maximiert werden können. Je nach Umgebung kann die Datenrate, die Verbindungsqualität oder die Reichweite verbessert werden. Aus diesem Grund ist die MIMO-Technik noch ein großes Feld für Forschung und Entwicklung. Letztlich geht es darum, unter Berücksichtigung von Umgebung und den verschiedenen Mobilfunkstandards, die beste Kombination aus den vier Gewinntypen herauszubekommen.

### Gruppengewinn

Der Gruppengewinn ergibt sich aus der Anzahl von Empfangsantennen. Mehr Antennen können aus den eintreffenden Funksignalen mehr Leistung herausholen und so die Funkverbindung verbessern. Mit einer Verdoppelung der Antennen erreicht man einen Gruppengewinn von maximal 3 dB.

Dazu müssen die empfangenen Funksignale durch lineare Überlagerungen (Spatial Combining) miteinander verknüpft werden. Dabei spielt ein Verzögerungselement bei der Signalverarbeitung eine wichtige Rolle.

Die räumliche Trennung funktioniert jedoch nicht, wenn die Funkstationen zu dicht beieinander stehen. Die Grenze liegt in der Breite der Hauptkeule im Richtdiagramm. Die Breite wird in Grad angegeben. Stehen die Stationen zu dicht beieinander, dann muss man die üblichen Techniken, wie unterschiedliche Trägerfrequenzen, Zeitmultiplex und Übertragungs-codes verwenden.

Weil die Antennen beim Senden und Empfangen das gleiche Verhalten aufweisen, kann man das MIMO-Verfahren nicht nur beim Empfangen, sondern auch beim Senden einsetzen. Beim Senden führt die Verzögerung der Funkstrahlen zu einer Verformung (Beamforming). Die Antenne strahlt die Sendeleistung in die Richtung des Empfängers ab. Davor muss natürlich der Winkel bestimmt werden, in dem sich der Empfänger befindet. Um das herauszufinden, wird das Funksignal in verschiedene Richtungen gesendet. Da in WLANs nach IEEE 802.11 jedes Datenpaket vom Empfänger bestätigt werden muss, weiß der Sender, wie stark seine Gegenstelle ihn empfangen kann. Die entsprechende Information wird als RSSI (Received Signal Strength Indication) übertragen. Und so bekommt der Sender auch heraus, wo sich der Empfänger befindet. Nämlich dort, in welche Richtung das Signal gesendet wurde, das er am besten empfangen konnte.

Doch auch beim Beamforming gilt es, die Vorschriften für die maximal erlaubte Sendeleistung (äquivalente isotrope Sendeleistung, EIRP) einzuhalten. Deshalb muss die Sendeleistung auf alle Antennen aufgeteilt werden.

## Interferenzunterdrückungsgewinn

Typisch für Funktechniken ist die Mehrwegeausbreitung (Multipath Propagation) der Funksignale durch Reflexionen und Abschattungen an Wänden und Gebäuden. Bei der Mehrwegeausbreitung trifft das Funksignal aus verschiedenen Richtungen mit unterschiedlichen Laufzeiten beim Empfänger ein. Der Empfänger muss dann versuchen das ursprüngliche Signal herauszufiltern. Im schlimmsten Fall wird das Trägersignal ausgelöscht. Der Empfänger befindet sich dann in einem Funkloch.

Autofahrer kennen das, wenn sich der Radioempfang beim Anhalten deutlich verschlechtert und beim Anfahren wieder deutlich verbessert. Die Strecke des Funklochs ist gerade so kurz, wie eine halbe Wellenlänge ( $\lambda/2$ ). Beim UKW-Radio beträgt es etwas 1,5 Meter. Beim WLAN ist die Strecke etwa 6 cm lang. Bei einem MIMO-Funksystem kann das bedeuten, dass während eine Antenne sich im Funkloch befindet, eine andere Antenne das Funksignal in bester Qualität bekommt.

Diese Funklöcher können durch eine veränderliche Umgebung entstehen. Schon in einem Raum mit umhergehende Personen oder geöffnete Schranktüren kann es zu erheblichen Schwankungen bei der Signalstärke (Fading) kommen. Diesen Effekt können WLAN-Empfänger bereits durch zwei Empfangsantennen ausgleichen, in dem sie das bessere Signal auswählen.

Intelligente Antennen können Funksignale aus bestimmten Richtungen, zum Beispiel von anderen Nutzern oder Störungen, ausblenden. Und schon allein durch die Strahlformung (Beamforming) reduzieren sich die Interferenzen.

## Diversitätsgewinn

Funklöcher entstehen dadurch, dass sich die elektromagnetischen Wellen des ursprünglichen Signals und die des reflektierten Signals gegenseitig auslöschen. Dass sich eine Antenne in einem Funkloch befinden könnte, lässt sich nicht vermeiden. Die Entstehung von Funklöchern ist nicht nur von der Umgebung, sondern auch von deren Veränderung abhängig. Um zu vermeiden, dass ein Funksystem durch Funklöcher Empfangsprobleme bekommt, arbeitet man mit mehreren Sende- und Empfangsantennen. Durch die Vielfalt (Diversität) wird die Ausfallsicherheit erhöht.

Schon allein mit 2 Antennen kann man einen Diversitätsgewinn von mehreren dB erreichen. Sind die Antennen in einem Abstand von einer halben Wellenlänge angeordnet, dann eignet sich die Antennengruppe für Strahlformung (Beamforming). Ist der Abstand zwischen den Antennen größer, dann eignet sich die Gruppe für Diversität. Nutzt man zwei Gruppen, eine für Strahlformung und eine für Diversität, dann kann man beides miteinander kombinieren. Dann profitiert man von Situationen, in denen Sichtverbindung zwischen den Stationen besteht und gleichzeitig Mehrwegeausbreitung durch ungünstig platzierte Stationen entstehen.

## Multiplexgewinn

Der Multiplexgewinn steigert die Effizienz des MIMO-Verfahren vor allem in einer Umgebung mit erhöhter Mehrwegeausbreitung. Ein Vorteil dann, wenn Sender- und Empfänger keine direkte Sichtverbindung haben und die Übertragung über Reflexionen erfolgt. Dann kommt auch die Teilnehmertrennung voll zum Tragen.

Während bei einem herkömmlichen SISO-System, wie ein WLAN nach IEEE 802.11g bei guter Verbindung auf Anwendungsebene 3 MByte/s übertragen werden, erreicht man bei einem MIMO-System mit zwei Antennen rund 4 MByte/s. Verdreifacht man die Antennen auf Empfänger- und Senderseite, dann kann das zur Verdoppelung der Datenrate führen.

## LTE Advanced

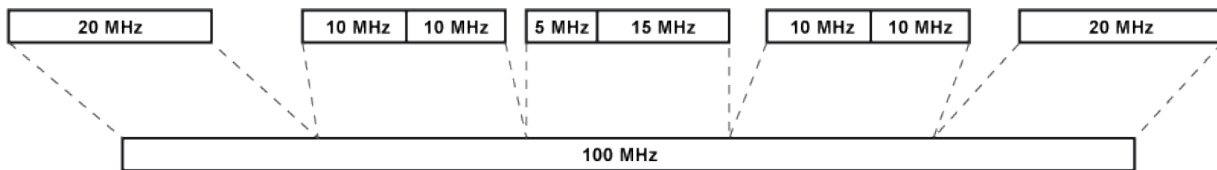
LTE Advanced ist eine Erweiterung von LTE. Mit LTE Advanced soll eine Übertragungsrate von bis zu 1 GBit/s erreicht werden. Diese Übertragungsrate ist erforderlich, weil sich der Bedarf nach schnellen Übertragungsraten und mehr Bandbreite in den Mobilfunknetzen jedes Jahr verdreifacht.

Die Übertragungstechnik hinter LTE Advanced sieht die Trägerbündelung und einen umfassenderen Einsatz der Mehrantennen-Technik MIMO vor. Erst dadurch kann LTE Advanced bis zu 1 GBit/s im Downlink und 500 MBit/s im Uplink erreichen.

- 1 GBit/s im Downlink und 500 MBit/s im Uplink

- Frequenzbereich von 100 MHz durch Trägerkopplung
- MIMO mit je acht Sende- und Empfangsantennen

### Frequenzträgerbündelung



LTE Advanced (Release 10) ermöglicht eine spektrale Bandbreite von bis zu 100 MHz und eine spektrale Effizienz von 30 Bit/s/Hz im Downlink und 15 Bit/s/Hz im Uplink.

Damit Release 10 zu Release 8 und 9 abwärtskompatibel ist, ist die maximale Bandbreite eines einzelnen Frequenzträgers auf 20 MHz begrenzt. Doch lassen sich bis zu 5 dieser 20-MHz-Kanäle bündeln und so ein Frequenzbereich von bis zu 100 MHz erreichen. Und das sogar dann, wenn die Kanäle in verschiedenen Frequenzbändern liegen. Typischerweise liegen die Frequenzbänder bei 800 MHz, 2 GHz und 2,6 GHz. Bei einem Träger von 10 MHz im 800-MHz- und einem 20 MHz breiten Träger im 2,6-GHz-Band wäre ein Frequenzbereich von 30 MHz möglich. Die Datenströme können flexibel auf die einzelnen Frequenzbänder verteilt werden.

LTE Advanced definiert, um den Energieverbrauch und die Komplexität gering zu halten, einen primären Frequenzträger, den jedes Endgerät nutzt. Sollte während einer Verbindung der Bedarf für höhere Übertragungsraten zunehmen, dann werden die sekundären Frequenzträger innerhalb weniger Millisekunden dazugeschaltet.

### Mehrantennentechnik

Eine weitere Maßnahme, um die Übertragungsrate zu steigern, ist die Mehrantennentechnik. Dazu gehört Beamforming. Dabei wird das Funksignal in Richtung des empfangenden Endgeräts gebündelt.

Eine Alternative ist Antennen-Diversität, bei der der Sender jedes modulierte Symbol doppelt überträgt. Den Empfänger erreichen in einem Frequenzgemisch verschiedene Versionen, aus dem er durch eine nachgeschaltete Signalverarbeitung das Optimum herausholt. Auf diese Weise kommt auch bei ungünstigen Empfangsbedingungen noch ein brauchbares Signal beim Empfänger an.

Eine weitere Maßnahme ist MIMO. Mit diesem räumlichen Vielfachzugriff werden mehrere räumlich getrennte Signale gleichzeitig gesendet. Dadurch wird die Übertragungsrate deutlich erhöht. LTE Advanced nutzt MIMO auch im Uplink. Also vom Teilnehmer zur Basisstation.

### Netzarchitektur

Mit LTE Advanced werden netzseitig Relay-Stationen eingerichtet, die das Mobilfunksignal empfangen, dekodieren, aufbereiten und weiter übertragen. So lassen sich die Reichweiten der Basisstationen erhöhen und die Netzabdeckung verbessern. Dadurch sind insbesondere an den Zellenrändern schnelle Verbindungen möglich. Zwar nehmen die Signallaufzeiten etwas zu, doch dem steht eine deutlich bessere Funkverbindung gegenüber. Die Relay-Stationen funktionieren sowohl in Downlink-, als auch in Uplink-Richtung. Für das Endgerät ist das Relay vollkommen unsichtbar.