

Mobilkommunikation und Navigation

Schnell denkt man bei dem Thema Digitalisierung an die unverzichtbar gewordenen Smart Phones. Die als revolutionär bezeichnete Einführung des digitalen Mobilfunks in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts ist bis heute die Grundlage für den Siegeszug der Mobilkommunikation. Eine Fülle von technologischen Weiterentwicklungen ermöglichen in naher Zukunft Datenübertragungsraten für mobile Anwendungen, die bis vor kurzem nur mit Glasfaser-Verbindungen möglich waren. Die extrem reduzierten Latenzzeiten der 5G Standards werden auch neue automobilen Anwendungen ermöglichen bis hin zum autonomen Fahren. Die in das Kapitel über Mobilkommunikation integrierte Darstellung zur Satellitennavigation führt auf eine Verbindung zur Relativitätstheorie.

1982 wurde von der CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications) eine Arbeitsgruppe unter dem Namen "Groupe Spéciale Mobile", kurz GSM, eingesetzt mit der Aufgabe ein europäisches Mobilfunksystem zu erarbeiten. Es entstand ein 5000 Seiten starkes Spezifikationswerk für ein hochkomplexes Mobilkommunikationssystem und aus GSM wurde "Global System für Mobile Communications". GSM wurde im März 1989 dem ETSI (European Telecommunications Standards Institute) unterstellt. Im Sommer 1992 begann der Betrieb des GSM Netzes in Deutschland mit digitaler Übertragung von Sprache und Signalen. Die Einführung dieses Standards muss heute rückblickend als eine Revolution bezeichnet werden.

Revolution GSM⁶

Das Mobilteil kommuniziert mit der nächstgelegenen Basisstation. Mehrere Basisstationen werden gebietsweise zusammengefasst und sind gemeinsam einem Base Station Controller unterstellt. Jeder Base Station Controller ist mit einem Mobile Switching Center (Vermittlungsrechner) verbunden, dessen Funktion mit einem Vermittlungsknoten im Festnetz vergleichbar ist. Das Gateway Mobile Switching Center ist für die Verbindung zwischen Fest- und Mobilfunknetz zuständig. Wird zum Beispiel ein Mobilfunkteilnehmer aus dem Festnetz angerufen, so ermittelt das Gateway Mobile Switching Center das zuständige Mobile Switching Center und vermittelt den Ruf weiter. Ein Operation and Maintenance Center überwacht einen Teil des Mobilfunknetzes. Es übernimmt organisatorische Aufgaben wie Steuerung des Verkehrsflusses, Gebührenerfassung, Sicherheitsmanagement, usw.

Das GSM System – es wird auch als Mobilfunksystem der zweiten Generation bezeichnet – bietet den Teilnehmern gegenüber den analogen Systemen der ersten Generation grundlegend neue Funktionalitäten für den Endkunden.

⁶ Jacek Biala, Mobilfunk und intelligente Netze, Vieweg Verlag 1996

Erstmals kann der Teilnehmer von überall aus kommunizieren (internationaler Zugriff). Er kann mit seiner Chipkarte auch andere Mobilfunkstationen, z.B. im Mietwagen, benutzen. Mit dem „handy“ wird eine totale Bewegungsfreiheit erreicht.

Jeder Teilnehmer ist im gesamten Groupe-Special-Mobile-Bereich grenzüberschreitend unter der gleichen Rufnummer erreichbar. Der Anrufer braucht über den Aufenthaltsort des anzurufenden mobilen Teilnehmers nichts zu wissen, denn das Netz übernimmt selbstständig die Lokalisierungs-Aufgaben.

Durch eine bessere Frequenzausnutzung und kleinere Funkzellen im Vergleich mit analogen Vorgängersystemen lassen sich im GSM-System wesentlich mehr Teilnehmer versorgen.

Die hohe Qualität und Zuverlässigkeit der Übertragung wird durch verschiedene Techniken und Verfahren wie Digitalisierung, aufwendige Codierung mit Fehlerkorrektur, Frequenzsprungverfahren, automatische Kanalwechsel-Verfahren erreicht. Die Frequenzökonomie und Spektraleffizienz wird durch FDMA- und TDMA- (Frequency Division Multiple Access und Time Division Multiple Access) erreicht. Dies erlaubt, mehrere Teilnehmer pro Frequenzband effektiv zu versorgen und Telefonie auch bei hohem Verkehrsaufkommen zu ermöglichen. Im so genannten D-Band (Uplink von 890 bis 915 MHz, Downlink von 935 bis 960 MHz) gibt es in jeder Richtung 124 Kanäle zu je 200 kHz Bandbreite.

Ein Ausschluss von Unbefugten oder unerlaubten Zugriffen wird zum einen durch – Zugangskontrolldienste wie die SIM (Subscriber Identity Modul) Karte mit Passwort und PIN-Angabe (Geheimzahl) und zum anderen durch Authentizität bzw. Identifizierung realisiert. Die Anonymität der Teilnehmer und weitgehende Abhörsicherheit werden durch weitere Maßnahmen unterstützt. Die Anonymität wird durch die im Netz implementierte, automatische Verwendung temporärer Identifizierungsdaten (sog. Pseudonyme) gewährleistet. Die Wahrung des Fernmelde-Geheimnisses wird im Luftraum durch kryptographische Verschlüsselung und zusätzlich durch den Einsatz eines Frequenzsprungverfahrens erreicht.

Die hohen, vorher von einem analogen Mobiltelefonsystem nicht erreichbaren Teilnehmerzahlen ermöglichen die Herstellung verschiedenster Gerätetypen, sowohl für das Auto (z.B. automatischer Notruf), als auch für den Handgebrauch (kleine tragbare Mobiles).

Notrufe können mit höchster Priorität erfolgen. Außerdem können bestimmte Personenkreise (wichtige Institutionen, Bedienungspersonal) bevorzugt behandelt werden. Maßnahmen der Vorranggewährung können bei auftretenden Netzüberlastungen zum Einsatz kommen.

Stromsparende Techniken und eine moderne Technologie erlauben lange Nutzungszeiten der Endgeräte im Batteriebetrieb.

Mobilfunksysteme der dritten, vierten und fünften Generation

Kurz nach der GSM-Einführung zeigte sich, dass der Bandbreitenbedarf zur Nutzung multimedialer Dienste nicht gedeckt werden kann. Die Mobilfunksysteme der dritten Generation sollten über eine größere Bandbreite und eine genügende Reserve an Leistungsfähigkeit verfügen, um auch bei wachsenden Anforderungen eine hohe Dienstegüte (Quality of Service) zu gewährleisten. Als bekanntestes Mobilfunksystem der dritten Generation (3G) ist UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) anzusehen.

Für die nächste, dritte Generation von Mobilfunksystemen wurde der Einsatz des Vielfachzugriffsverfahrens DS-CDMA (Direct Sequence Code Division Multiple Access) Verfahren vorgesehen. Hier wird jedem Sender ein eigener eindeutiger Spreizcode zugeordnet. Alle Sender können dann gleichzeitig senden und der Empfänger kann die individuellen Signale bei Kenntnis des Codes wieder rekonstruieren und die Sender dadurch unterscheiden. Die in Deutschland ausschließlich eingesetzte UMTS-Variante UMTS Terrestrial Radio Access-Frequency Division Duplex (UTRA-FDD) besteht aus je 12 gepaarten Uplink- und Downlink-Frequenzbändern zu je 5 MHz Bandbreite zwischen 1920 MHz und 1980 MHz (Uplink) bzw. zwischen 2110 MHz und 2170 MHz (Downlink).

Das Kürzel LTE steht für "Long Term Evolution" und bezeichnet den auf UMTS nachfolgenden vierten Mobilfunkstandard. Durch die konzeptionelle Neuentwicklung sollte LTE auf lange Zeit („Long Term“) den sich immer weiter erhöhenden Bedarf an Bandbreite und nach höheren Geschwindigkeiten stillen. LTE basiert auf den Mehrfachzugriffsverfahren OFDMA ("Orthogonal Frequency Division Multiple Access") im Downlink bzw. SC-FDMA ("Single Carrier Frequency Division Multiple Access") im Uplink. Die Verwendung dieses Modulationsverfahrens ermöglicht Orthogonalität zwischen den einzelnen Nutzern, was in einer erhöhten Netzwerkkapazität resultiert. Diese Technik führt in Verbindung mit "Multiple Input Multiple Output" (MIMO) zu Spitzendatenraten von 100 Mbit/s im Downlink. Die Mehrantennentechnik MIMO ermöglicht einen räumlichen Vielfachzugriff, da mehrere räumlich getrennte Signale gleichzeitig gesendet werden. Dadurch wird die Übertragungsrate deutlich erhöht. Im 4G Standard LTE Advanced wird MIMO auch im Uplink genutzt, also vom Teilnehmer zur Basisstation.

Für die Fernsteuerung von Maschinen und Anlagen, eine Echtzeitsteuerung von kritischen Abläufen in der Produktion und den Energienetzen und autonom fahrende Fahrzeuge werden sehr geringe Signallaufzeiten (Latenzen) benötigt bei hohen Datenraten, hoher Verfügbarkeit und höchster Zuverlässigkeit. Diese Anforderungen soll der 5G Mobilfunk erfüllen. 5G ist als ein Überbegriff zu verstehen, der verschiedene Netze, Technologien und Anwendungen umfasst. Es existiert eine ganze Familie von Funktechniken für unterschiedliche Anforderungen und unterschiedliche Zugangsmöglichkeiten.

Grundsätzlich können 5G-Mobilfunknetze in allen Frequenzbereichen betrieben werden, die noch für 2G, 3G, und 4G im Einsatz sind oder waren. Da der Frequenzbedarf weiterwächst, vergibt die Bundesnetzagentur freie oder freiwerdende Frequenzbereiche neu. Durch Re-Farming werden Betriebserlaubnisse für 5G mit bereits vergebenen Frequenzen erteilt. Geplante Betriebsfrequenzen liegen bei 700 MHz, 2 GHz, 3,4 bis 3,8 GHz, 24,5 bis 27,5 GHz, 31,8 bis 33,4 GHz und 40,5 bis 43,5 GHz. Erstmals stößt also die Mobilkommunikation in den Millimeterwellenbereich (Frequenzen von 30 GHz bis 300 GHz) vor. Wegen der physikalischen Ausbreitungsbedingungen sind diese Frequenzbereiche nur für Anwendungen mit kurzer Reichweite geeignet. Aufgrund der hohen verfügbaren Bandbreiten werden neue Anwendungen erwartet mit Femto-Zellen und Mobilfunk Hot-spots mit sehr hohen Datenraten. Unter dem Label „Industrie 4.0“ und IoT (Internet of Things) laufen zahlreiche industrielle Entwicklungen.

Generation	2G			3G			4G		5G
Technologie	GSM	GPRS	EDGE	UMTS	HSPA	HSPA+	LTE	LTE-A	NR
Zugriffsverfahren	TDMA	TDMA	TDMA	CDMA	CDMA	CDMA	OFDMA	OFDMA	OFDMA
Modulationsverfahren	GMSK	GMSK	8-PSK	QPSK	QPSK, 16-QAM	QPSK, 16-QM	QPSK, 16-, 64-QAM	QPSK, 16-, 64-, 256-QAM	QPSK, 16-, 64-, 256-QAM
Bandbreite	200 kHz	200 kHz	200 kHz	5 MHz	5 MHz	5 MHz	1.4-20 MHz	20-100 MHz	35-400 MHz
Kanalbündelung	nicht möglich	bis 8	bis 8	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	bis 4	bis 4	bis 4
Max. Datenraten	0.01 Mbps	0.1 Mbps	0.2 Mbps	0.4 Mbps	14 Mbps	42 Mbps	150 Mbps	1000 Mbps	>1000 Mbps
Sonstige Eigenschaften	leitungs-basiert				MIMO	MIMO	MIMO	MIMO, Bänderaggregation	MIMO, Bänderaggregation
Latenzzeit	500 ms	500 ms	300 ms	150 ms	100 ms	50 ms	10 ms	5 ms	1 ms

Abb. 11 - Evolution der Mobilfunk-Technologien. NR: New Radio

Kanalbündelung: Nutzung mehrerer Verbindungen gleichzeitig zur Datenübertragung (gebündelt), um die Datenübertragungsrate zu erhöhen

Bänderaggregation: Zusammenfassung mehrerer Bereiche zu einem virtuellen Frequenzband. Zum Beispiel die Aggregation von 20 MHz bei 1.8 GHz und 20 MHz bei 2.6 GHz, woraus ein virtuelles Nutzband mit 40 MHz Breite entsteht.

Satellitennavigation

Woher weiß das Satellitennavigationssystem, wo wir uns mit unserem Endgerät gerade befinden? Es weiß es nicht ist die richtige Antwort!

Denn die kluge Idee hinter dem vom amerikanischen Verteidigungsministerium betriebenen Global Positioning System (GPS) ist ein Triangulationsverfahren. GPS besteht aus einem Verbund von 24 nicht geostationären Satelliten, die die Erde auf elliptischen Bahnen in ca. 20200 km Höhe (Medium Earth Orbit) umrunden. Die Satelliten besitzen ein Antriebssystem zur Korrektur ihrer Bahnposition. Fliehkraft und Erdanziehung halten sich auf der Umlaufbahn die Waage mit einer

Satellitengeschwindigkeit von $3.9 * 10^3 m/s$ und eines zweimaligen Umlaufs um die Erde innerhalb von 23 Stunden und 56 Minuten und 4,091 Sekunden. Dadurch ist gewährleistet, dass dauerhaft mindestens vier und in der Praxis sechs bis acht Satelliten gleichzeitig empfangen werden können. Jeder Satellit sendet laufend ein Datenpaket aus, das u. a. die Sendezeit und die augenblickliche Position des Satelliten enthält. Der Empfänger auf der Erde bestimmt die Ankunftszeit des Signals. Aus der Laufzeit (zwischen 0,067 s und 0.086 s) ergibt sich dann die Entfernung zum Satelliten. Mit drei solcher Messungen zu verschiedenen Satelliten kann durch Triangulation die Position des Empfängers im Raum bestimmt werden.

Aufgrund der mit Lichtgeschwindigkeit ($c = 3 * 10^{10} m/s$) übertragenen Signale sind die Anforderungen an die Uhrengenauigkeit hoch: Ein Laufzeitfehler von einer tausendstel Sekunde würde einen Distanzfehler von 300 km bewirken und damit das System unbrauchbar machen. Die erforderliche Präzision lässt sich nur mit Atomuhren erreichen. An Bord der Satelliten werden daher Cäsium- und Rubidium-Atomuhren verwendet, die regelmäßig von fünf Bodenstationen kontrolliert und nachgeregelt werden. Zusätzlich müssen die Zeiten relativistisch korrigiert werden.

Um die Verwendung extrem genauer Uhren am Empfängerort zu vermeiden, wird ein vierter Satellit genutzt zur Zeitbestimmung. Durch die codierte Signalübertragung (C/A-Code) kann die Empfängeruhr soweit synchronisiert werden, dass die Entfernung zu dem Satellit mit einer Abweichung von nur wenigen Metern berechnet werden kann.

Die begrenzte Genauigkeit von GPS, die durch den Einsatz von *differential GPS* mit der Verwendung von terrestrischen Hilfssendern in den einstelligen Meterbereich gebracht werden kann und die Kontrolle des amerikanischen Militärs über das System (dessen Genauigkeit in militärischen Konflikten in den 90er Jahren zeitweise vom Betreiber künstlich verschlechtert wurde) motivierten die Europäer zum Aufbau eines eigenen Satellitennavigationssystems unter dem Name Galileo. Betreiber und Finanzier ist die Europäische Union. Derzeit sind 28 Satelliten des Systems im Orbit, wovon 24 in Betrieb sind. Mit einem öffentlichen High Accuracy Service (HAS – Hochgenauer Dienst) stehen allen Nutzern drei Frequenzbänder kostenlos und unverschlüsselt zur Verfügung, womit eine weltweite Genauigkeit von wenigen cm erreicht werden kann. Galileo ermöglicht damit allen Nutzern eine Genauigkeit, die die konkurrierenden Systeme GPS und GLONASS (ein globales Satellitennavigationssystem betrieben von der russischen Föderation) um mehr als den Faktor 10 übertrifft.