



Prof. Dr.-Ing. Sebastian Matthie

Sebastian Matthie wurde 1986 in Bautzen geboren und machte dort 2004 am Philipp-Melanchthon-Gymnasium das Abitur. Während seines Militärdienstes von 2004-2016 bei der Bundeswehr als Fernmeldeoffizier absolvierte er sein Bachelor- und Masterstudium der Elektro- und Informationstechnik an der Universität der Bundeswehr München im Zeitraum von 2007-2011. Während seiner Militärdienstzeit nahm er 2013 an einem Auslandseinsatz in Afghanistan teil. Danach begann er die wissenschaftliche Arbeit an der Universität der Bundeswehr München für das Institut für Hoch- und Höchstfrequenztechnik. Ergebnis dieser Tätigkeit war seine Doktorarbeit mit dem Titel „Diversity-Konzepte für den Empfang von Diensten des digitalen Satellitenfunks“. Einen Höhepunkt dieser Arbeit bildete eine zweiwöchige Messreise in die USA zur Untersuchung potenzieller Antennenpositionen in Fahrzeugen zum Empfang des amerikanischen Satellitenradios. 2020-2024 war Herr Matthie tätig als Hardware-Entwicklungsingenieur bei der IK Elektronik GmbH in Dresden mit der Spezialisierung auf Antennen- und Funkkomponenten- Design. Seit März 2024 ist er Professor für Elektrotechnik, insbesondere Elektrische Energietechnik an der Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Bautzen.

Kontakt: sebastian.matthie@dhsn.de

Die Grenzen der Mobilfunkintegration – Einordnung und Betrachtung der 5. Generation Mobilfunk

Sebastian Matthie

Abstract

Die Mobilfunktechnik hat sich in den vergangenen drei Jahrzehnten immer stärker in den Alltag der Menschen integriert. Sie hat sich seither zu einem beispiellosen Massenmedium mit ca. 4,8 Mrd. Mobilfunkgeräten [1] entwickelt. In dieser Arbeit wurden die technischen Eigenschaften der verschiedenen Mobilfunkgenerationen gegenübergestellt und jeweilige Besonderheiten hervorgehoben. Am Beispiel der 5. Generation Mobilfunk wurde der aktuelle Stand der Einführung und Nutzung betrachtet sowie der erwartete Ausbau in den kommenden Jahren erläutert. Mit den technischen Möglichkeiten dieses neuen Standards ergeben sich besondere Herausforderungen bezüglich der Infrastruktur als auch ein erhöhter Forschungsbedarf (z.B. bezüglich der Strahlungsbelastung). Aus den Erfahrungen der vergangenen und gegenwärtigen Mobilfunkintegration wurden allgemeine Prognosen zur künftigen Mobilfunkeinrichtung aufgestellt.

Mobile communication technology has increasingly integrated into people's daily lives over the past three decades. It has since evolved into an unprecedented mass medium, with approximately 4.8 billion mobile devices in use [1]. This study compares the technical characteristics of different mobile network generations and highlights their specific features. Using the example of the fifth generation (5G) mobile network, the current state of its deployment and usage is examined, along with the expected expansion in the coming years. The technological capabilities of this new standard present particular challenges regarding infrastructure and necessitate increased research efforts (e.g., concerning radiation exposure). Based on past and present experiences with mobile network integration, general predictions for future mobile network expansion have been formulated.

Generation	2G (seit 1990)			3G (seit 2001)			4G (seit 2011)		5G (seit 2019)
Funktechnik	GSM	GPRS	EDGE	UMTS	HSPA	HSPA+	LTE	LTE-A	New Radio
Zugriffsverfahren	TDMA			CDMA			OFDMA		
Modulationsverfahren	GMSK		8-PSK	QPSK	QPSK, 16-QAM	QPSK, 16-QAM	QPSK, 16-, 64-QAM	QPSK, 16-, 64-, 256-QAM	QPSK, 16-, 64-, 256-, 1024-QAM
Bandbreite	0,2 MHz			5 MHz			1,4-20 MHz	20-100 MHz	35-400 MHz
Kanalbündelung				nein			bis 4		
Datenraten	0,01 Mbps	0,1 Mbps	0,2 Mbps	0,4 Mbps	14 Mbps	42 Mbps	150 Mbps	1000 Mbps	>1000 Mbps
Latenzzeiten	500 ms		300 ms	150 ms	100 ms	50 ms	10 ms	5 ms	1 ms
weitere Eigenschaften							MIMO		MIMO, CA

Abbildung 1: Überblick der digitalen Mobilfunkgenerationen (Daten aus [2]).

Einleitung und Rückblick

Seit 2019 begann der Ausbau der 5. Generation Mobilfunk (5G). Sukzessive übernimmt diese neue Technologie den Anteil der Telefonie und Datenübertragung von ihren Vorgängergenerationen. Während die erste Generation (1G) als reines analoges Telefonesystem ausgestaltet wurde, ermöglichten die folgenden Generationen auch die Übertragung von Daten zwischen mobilen Endgeräten. In der Abbildung 1 ist ein technischer Überblick der verschiedenen Mobilfunkgenerationen (2G – 5G) dargestellt.

Mit dem Global System for Mobile Communications (GSM) wurde ab dem Jahr 1990 ein internationales digitales Telekommunikationsnetz errichtet. Die Digitalisierung der Nachrichtenübertragung ermöglichte in den folgenden Jahren große technologische Sprünge insbesondere bei der Komprimierung von Nachrichteninhalten durch komplexe Zugriffs- und Modulationsverfahren, was sich in der schnellen Erhöhung erreichbarer Datenraten zeigte. Eine parallel voranschreitende Weiterentwicklung der Mikroelektronik im Bereich der Miniaturisierung von Halbleiterstrukturen für Transistorschaltungen trug ebenfalls dazu bei, dass die Komplexität der Datenverarbeitungsmethoden immer höher skaliert werden konnte. Dies kann an der Entwicklung der Modulationsverfahren gut nachvollzogen werden. Zur Kodierung eines Symbols konnten zu Beginn der 2. Generation durch das Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) lediglich vier voneinander unterscheidbare Zustände aus einer komplexwertigen Spannungsebene zur Übertragung innerhalb eines definierten Zeitschlitzes Δt ausgewählt werden. Dies ermöglichte die Übertragung von zwei sogenannten bits, also einer positiven ganzen Binärzahl (aus Nullen: 0 und Einsen: 1) mit zwei Stellen: 00, 01, 10 und 11. In der 5. Generation kommt bereits eine Quadraturamplitudenmodulation mit 1024 Zuständen (1024-QAM) zum Einsatz, welche die gleichzeitige Übertragung von 10 bits ermöglicht. Allein dieser Umstand erhöhte die Datenrate von 2G bis 5G um das 5-fache. Während in der 2. Generation mit Time Division Multiple Access (TDMA) noch ein reines Zeitschlitzverfahren verwendet wurde, arbeitete die 3. Generation bereits mit Code-basierten (CDMA) und die vierte Generation mit frequenzbasierten (OFDMA) Zugriffsverfahren. Dies ermöglichte eine zusätzliche zeitliche Parallelisierung der Nachrichteninhalte und eine bessere Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Kanalbandbreite. Doch auch wenn nur kleine

Datenmengen übertragen werden sollen, kann die große räumliche Ausdehnung des Netzes zu hohen Wartezeiten führen. Die technisch minimal erforderliche Wartezeit zur Datenübertragung wird auch als Latenzzeit bezeichnet. Diese wurde einerseits durch Methoden der Signalverarbeitung wie Zugriffsverfahren und andererseits durch funktchnologische Weiterentwicklungen, wie der Nutzung weiterer Frequenzbänder und dem Einsatz von mehrdimensionaler Send- und Empfangstechnik (Multiple Input Multiple Output – MIMO) schrittweise deutlich reduziert. Während am Anfang der 2. Generation noch eine Latenzzeit von 500 ms angegeben wurde, ist durch 5G nur noch 1 ms zu berücksichtigen.

Aktueller Netzausbau

2019 begann der Umbau der Netzinfrastruktur auf 5G. Viele technische Neuerungen, die bereits in der 4. Generation (seit 2014 mit dem Start der LTE-Advanced-Generation – LTE-A) eingesetzt wurden, konnten durch die 5. Generation fortgesetzt und erweitert werden. So wurde zum Beispiel die Möglichkeit der Kanalbündelung (Carrier Aggregation – CA) geschaffen, aber auch der Einsatz von MIMO-Technologie, wobei mit 8x8 und mehr unabhängigen Signalpfaden oft bereits der Begriff „Massive-MIMO“ verwendet wird [3]. Die technisch potenziellen Leistungsmerkmale der 4. und 5. Generation sind in Abbildung 2 gegenübergestellt. Einen großen Vorteil bei der Einführung der 5. Generation ist ihre Abwärtskompatibilität durch das sog. Dynamic Spectrum Sharing (DSS), wodurch die Infrastruktur der 4. Generationen mit genutzt werden kann. Hierbei wurden die guten Erfahrungen aus der Einführung des „HSPA+“-Systems in der 3. Generation aufgegriffen.

Mit einer Enduser-Datenrate von 100 Mbit/s reicht 5G an die Leistungsmerkmale des sogenannten Fast-Ethernets heran, das in den meisten Haushalten als LAN kabelgebunden eingesetzt wird. Wenn man sich vergegenwärtigt, wie schnell große Datenmengen im Heimnetzwerk verschoben werden können, veranschaulicht dieses Beispiel gut, welche technischen Möglichkeiten diese neue Mobilfunkgeneration bietet. Einen besonders wichtigen technischen Fortschritt, stellt die deutliche Erhöhung der Netzwerk-Energieeffizienz um den Faktor 100 dar. Dadurch können in den kommenden Jahren sowohl Energieerzeugungskosten als auch Ressourcen eingespart werden.

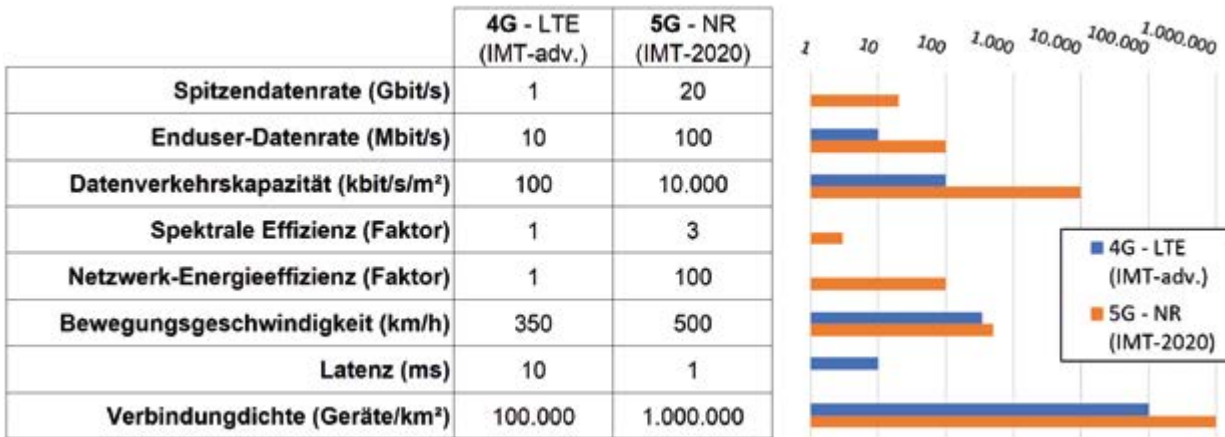


Abbildung 2: Überblick der digitalen Mobilfunkgenerationen (Daten aus [2]).

Wie schnell die Integration der 5G-Infrastruktur von statten geht, zeigt eine von Opensignal veröffentlichte Statistik aus dem Jahr 2020 [4]. Darin wird Süd-Korea als das Land mit der höchsten erreichten Datenrate von 60,5 Mbit/s durch 4G (also ca. 40 % der zu Beginn der 4. Generation techn. erreichbaren Datenrate von 150 Mbit/s) angegeben. Zugleich wird Saudi-Arabien als das Land mit der höchsten erreichten Datenrate von 377,2 Mbit/s durch 5G (also ca. 38 % der zu Beginn der 5. Generation technisch erreichbaren Datenrate von 1000 Mbit/s) genannt. Obwohl sich die vierte Generation zum Vergleichszeitpunkt bereits am Ende ihres Lebenszyklus befand, konnte die technisch nutzbare Datenrate der neueren, 5. Generation bereits in gleichem Anteil ausgeschöpft werden. Dieses Beispiel zeigt einerseits, dass die technische Verfügbarkeit eines Mobilfunkdienstes nicht automatisch bedeutet, dass die maximal erreichbaren Eigenschaften auch ausgeschöpft werden können – hier existieren teilweise hohe regionale Unterschiede. Andererseits wird an diesem Beispiel deutlich, dass auch die Integration von neuer Netzinfrastruktur als Modernisierungsprozess von der Geräteherstellung bis zur Gesetzgebung im Verlaufe der letzten Jahrzehnte optimiert wurde. Daten aus dem April 2024 [5] belegen, dass bereits 91,99 % der deutschen Staatsfläche mit 5G versorgt sind, während 4G eine Flächenversorgung von 97,38 % und 2G auf 99,8% erreicht. Die Netzinfrastruktur der 3. Generation ist seit Juni 2021 deaktiviert und rückgebaut worden. Als Rückfallebene bleibt in Deutschland und einigen anderen Ländern das Netz der 2. Generation vorerst weiter im Dienst. In Deutschland existieren drei Versorgungsdienstleister, die sich die verfügbaren Mobilfunkfrequenzbereiche teilen und jeweils regionale Schwerpunkte in ihrer Netzversorgung setzen. Laut einer Veröffentlichung der Bundesnetzagentur von 2022 [6] sind Sachsens Autobahnen mit 77,1 % am stärksten durch den Netzdienstleister Telefónica versorgt, während Telekom 57,4 % und Vodafone nur 39,1 % versorgen.

Anhand des Ericsson Mobility Visualizers [7] können anhand der weltweiten Anzahl von Mobilfunkverträgen die Lebenszyklen der Mobilfunkgenerationen nachvollzogen werden. Während die

3. Generation ein globales Maximum von ca. 1,8 Mrd. Mobilfunkverträgen im Jahr 2017 erreichte, konnte die 4. Generation mit ca. 5 Mrd. Mobilfunkverträgen im Jahr 2022 deutlich neue Maßstäbe setzen. Es kann daher erwartet werden, dass auch durch das Maximum der 5. Generation wahrscheinlich um die Jahre 2027-2029 eine weitere deutliche Steigerung erreicht wird. Die neuen technischen Möglichkeiten und die einfache und sehr kostengünstige Skalierbarkeit der Mobilfunktechnik zwingen kleine, mittelständische aber Industrieunternehmen fortwährend dazu, konventionelle stationäre Kommunikationstechnik durch moderne, kommerzielle Mobilfunktechnik (z.B. 5G-Router in Lagerstätten oder großen technischen Anlagen anstatt langen kabelgebundenen Bussysteme) zu ersetzen. In einigen Ländern (wie UK, Spanien, etc.) übersteigt die verfügbare Mobilfunkdatenrate bereits die verfügbare Datenrate des technisch um ca. den Faktor 10 potenteren WLAN (Wi-Fi 5 seit 2013 mit max. 1,3 Gbit/s pro Stream und Wi-Fi 6 seit 2020 mit max. 9,6 Gbit/s pro Stream) [8].

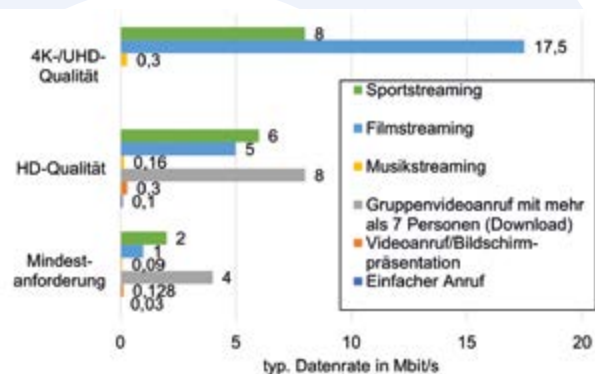


Abbildung 3: Typische Datenraten verschiedener digitaler Dienste (Daten aus [9]).

Nutzung der Mobilfunkkapazität

Bei der Datenübertragung kann zwischen zwei grundlegenden Kategorien unterschieden werden: 1. einer verbindungsorientierten Übertragung von geschlossenen Datensätzen (z.B. Dateien, Dokumente, etc.), bei denen die Datenintegrität im Vordergrund steht und 2. einer verbindungslosen Übertragung von Unterhaltungsangeboten oder Konversationsinhalten, bei denen die Aktualität im Vordergrund steht. In der ersten Kategorie ist eine schnelle Übertragung zwar wünschenswert, aber meist nicht essenziell. Anders ist es in der 2. Kategorie, wo die verfügbare Datenrate bestimmt, welcher Dienst gerade noch qualitativ akzeptabel und damit funktionsfähig ist, und welcher nicht. Je nachdem welchen verbindungslosen digitalen Dienst ein Nutzer über das Mobilfunknetz abrufen, entstehen unterschiedliche Bedarfe an Datenraten, welche in einem Diagramm in Abbildung 3 gegenübergestellt wurden. Dabei werden deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Diensten sichtbar. Bereits bei minimalen Qualitätsanforderungen erfordert ein Gruppenanruf mit mehr als sieben Personen eine relativ hohe Datenrate von 4 Mbit/s. Mit höheren Qualitätsanforderungen steigen erwartungsgemäß auch die erforderlichen Datenraten an. Insbesondere das HD-Videostreaming (Film- und Sportstreaming) stellt mit ≥ 5 Mbit/s hohe Anforderungen an die verfügbare Datenrate.

Angesichts dieser Rahmenbedingungen stehen die Nutzer selbst in der Verantwortung, wie stark sie die begrenzt verfügbare Ressource „Datenrate“ für ihre Belange nutzen. Muss es immer ein Videotelefongespräch in HD-Qualität sein oder genügen auch geringere Qualitätsanforderungen – oder vielleicht sogar ein einfacher Audio-Telefonanruf? Daraus leitet sich die Frage ab, wie verantwortungsbewusst Nutzer mit dieser begrenzten Ressource umgehen. Mit Nutzern sind natürlich einerseits Privatpersonen als auch Mitarbeiter und Dienstleistungen im unternehmerischen Umfeld gemeint. Die Grenze zwischen diesem privaten und dienstlichen Sektor ist in vielen Fällen aber nicht eindeutig definierbar. Ein einflussreicher Influencer beispielsweise präsentiert zwar sein Privatleben durch verschiedene mediale Ka-

näle für eine große Zuschauerzahl, aber das oft aus kommerziellen Gründen. An diesem Beispiel ist auch erkennbar, dass die mediale Nutzung des Mobilfunks, durch die hohe Verfügbarkeit von relativ hohen Datenraten, insgesamt niederschwelliger und selbstverständlicher geworden ist. Da Nutzer mit entsprechenden Mobilfunktarifen kaum noch Einschränkungen bei der Verwendung medialer Dienste erleben, hinterfragen sie die Art der Nutzung kaum noch bezüglich ihrer Notwendigkeit, Verhältnismäßigkeit und Nachhaltigkeit. Laut einer Untersuchung des Eidgenössischen Departement für Umwelt der Schweiz aus dem Jahr 2019 [10] entfielen mit 23 EB/Monat (23 EB = 23 Exabyte = 23.000 Megabyte) bereits 63,4 % des weltweiten mobilen Breitbandbedarfs auf Videostreaming. In der gleichen Untersuchung wurde für das Jahr 2024 eine Prognose von ca. 80 % des mobilen Breitbandbedarfs für Videostreaming aufgestellt.

Besonderheiten des neuen Standards 5G

Neben den genannten technischen Verbesserungen der 5. Generation gegenüber älteren erfordern die höheren Ansprüche an Datenraten und Latenzzeiten weitere technische Veränderungen. Die bisher genutzten Frequenzbänder im niedrigen Gigahertzbereich ermöglichen nur relativ kleine nutzbare Bandbreiten. Mit Bandbreiten sind zusammenhängende Frequenzbereiche gemeint, die durch verschiedene Methoden der Kommunikationstechnik in sogenannte Kanäle aufgeteilt werden können. Diese Kanäle wiederum stellen voneinander entkoppelte Nachrichtenpfade dar, über welche zeitlich parallele Nachrichtenübertragungen abgewickelt werden können. Dies kann einerseits für die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit (= Robustheit) einer Nachrichtenübertragung verwendet werden (z.B. indem ein und dieselbe Nachricht über mehrere Kanäle übertragen wird = „Redundanz“) oder zur Übertragung möglichst vieler unterschiedlicher Nachrichten (dies wiederum erhöht die Verfügbarkeit der Übertragung und die Datenrate). Durch die Mobilfunkbetreiber wurden bereits Gruppen dieser Einzelkanäle zusammengefasst, sodass für die verschiedenen Nutzeranforderungen sinnvolle Kanalgrößen zur Verfügung stehen, die sich durch die Möglich-

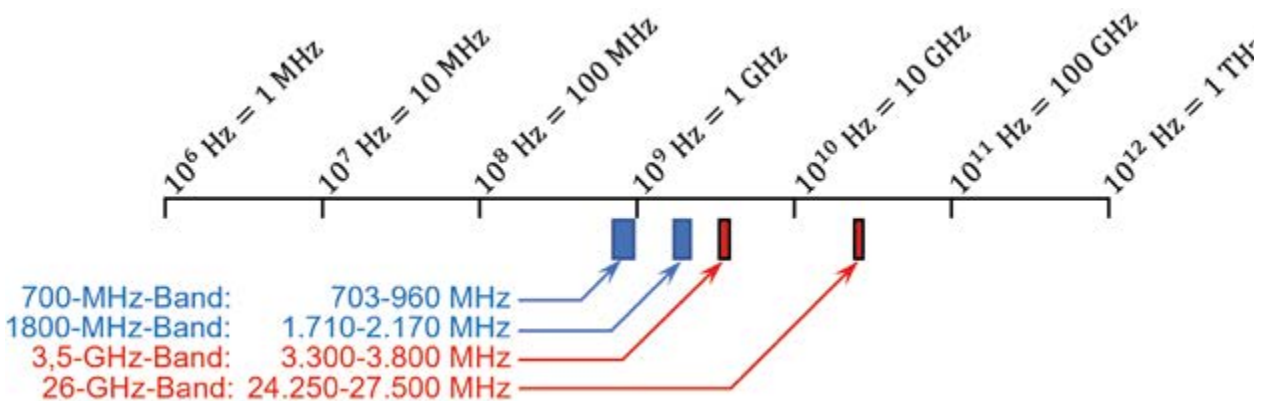


Abbildung 4: Aktuelle (blau) und künftige (rot) Mobilfunkfrequenzbänder in Deutschland.

keit der Kanalbündelung seit 4G sogar kombinieren lassen (siehe Tabelle in Abbildung 1, Spalte 4 und 5). Besonders an Orten, wo viele Menschen aufeinandertreffen, genügen die verfügbaren Kanalbandbreiten und die Kanalanzahl in den zuvor genutzten Frequenzbändern oft nicht mehr. Dadurch wurden neue, höhere Frequenzbänder für die Mobilfunknutzung umgewidmet. In der Abbildung 4 ist eine Übersicht der bisher genutzten und der erst durch 5G nutzbaren Frequenzbänder dargestellt. Neben den in Deutschland zukünftig nutzbaren Frequenzbändern (703-960 MHz und 1710-2170 MHz) stehen nun auch das 3,5- und 26-GHz-Band zur Verfügung. In anderen Staaten wird nach aktueller Planung mit dem 5-GHz-Band (USA, Südkorea, etc.) oder dem 6-GHz-Band (China und Japan) noch ein weiteres für die zukünftige Nutzung zur Verfügung stehen [11].

Mit der Nutzung höherer Signalfrequenzen gehen neue technische Herausforderungen einher. Bei der Übertragung eines Funksignals durch die Luft, verteilt sich die an der Sendeantenne emittierte Strahlung zwangsläufig über ein großes Gebiet. Durch eine gezielte Strahlungskonzentration auf sehr kleine Winkelbereiche an den Sendeantennen (sog. Strahlungskeule), ist die räumliche Verteilung der Sendeleistung auf ungewünschte Empfangsgebiete weitgehend reduziert. Durch sogenannte Patch-Array-Antennen sind die Mobilfunkbasisstationen sogar in der Lage, ihre Strahlungskeulen direkt auf die Mobilfunkgeräte der Nutzer auszurichten. Vergrößert sich der Abstand zur Sendeantenne r , ver-

größert sich auch die durch sie ausgestrahlte Fläche nach $A \sim r^2$. Bezogen auf ein räumlich konzentriertes Empfangssystem führt das dazu, dass sich die empfangene Strahlungsleistungsdichte S indirekt proportional zur Ausstrahlungsfläche und damit indirekt proportional zum Quadrat der Entfernung zur Sendeantenne verhält ($S \sim 1/r^2$). In Abhängigkeit der Frequenz f verändert sich zudem die wirksame Antennenempfangsfläche, wodurch sich eine frequenz- und entfernungsabhängige Dämpfung, die sogenannte Freiraumdämpfung L_{bf} ergibt nach:

$$L_{bf} = \left(\frac{4\pi r f}{c} \right)^2. \quad (1)$$

Die Freiraumdämpfung gibt an, um welchen Faktor die an der Sendeantenne emittierte Strahlungsleistung reduziert worden ist, wenn diese an der Empfangsantenne eintrifft. Anhand der Tabelle in Abbildung 5 ist die Freiraumdämpfung für die in Deutschland verwendeten Mobilfunkfrequenzbänder anhand ausgewählter Entfernungen zur Sendeantenne berechnet worden. Möchte man an einem bestimmten Empfangsort ($r_{Bsp.}$) für alle Frequenzbänder dieselbe Empfangsleistung erreichen, müsste die Sendeleistung bei höheren Frequenzen f_2 gegenüber niedrigeren Frequenzen f_1 um einen Kompensationsfaktor $K_{2,1}$ erhöht werden nach:

$$K_{2,1} = \frac{L_{bf}(f_2, r_{Bsp.})}{L_{bf}(f_1, r_{Bsp.})} = \left(\frac{f_2}{f_1} \right)^2; \quad f_2 > f_1. \quad (2)$$

		f in GHz			
		0,7	1,8	3,5	26
r in m	1	$8,6 \cdot 10^2$	$5,7 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^6$
	2	$3,4 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^4$	$8,6 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^6$
	5	$2,1 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^5$	$5,4 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^7$
	10	$8,6 \cdot 10^4$	$5,7 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^8$
	20	$3,4 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^6$	$8,6 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^8$
	50	$2,1 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^7$	$5,4 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^9$
	100	$8,6 \cdot 10^6$	$5,7 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^{10}$
	200	$3,4 \cdot 10^7$	$2,3 \cdot 10^8$	$8,6 \cdot 10^8$	$4,7 \cdot 10^{10}$
	500	$2,1 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^9$	$5,4 \cdot 10^9$	$3,0 \cdot 10^{11}$
	1000	$8,6 \cdot 10^8$	$5,7 \cdot 10^9$	$2,1 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{12}$

Kompensationsfaktor

· 6,61

· 3,78

· 55,2

Abbildung 5: Freiraumdämpfung in Abhängigkeit der Entfernung zur Sendeantenne r und zur Frequenz f sowie Kompensationsfaktoren für die in Deutschland verwendeten Mobilfunkfrequenzbänder.

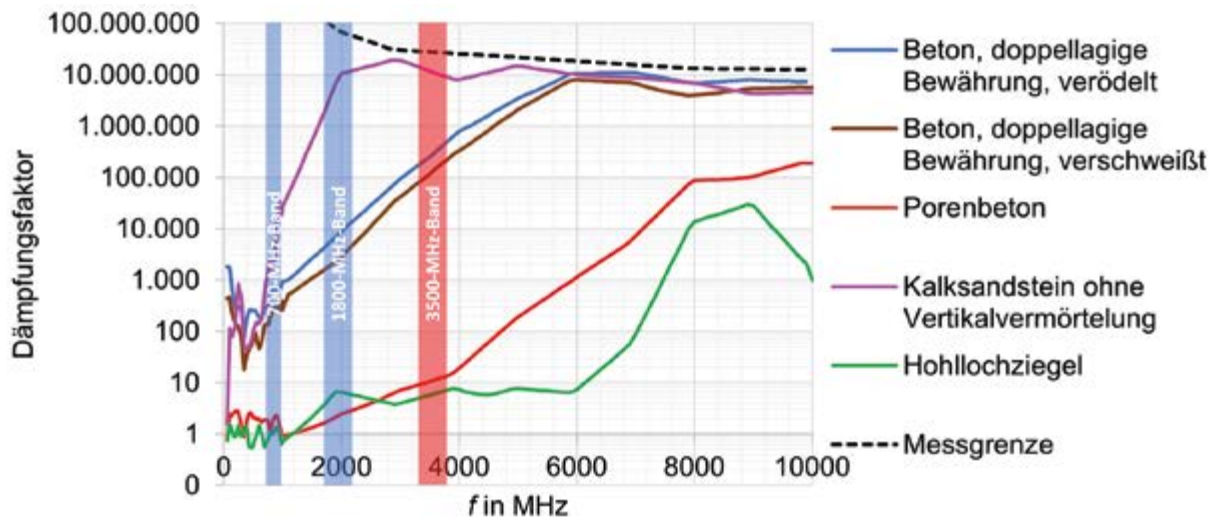


Abbildung 6: Baumaterialspezifischer Wänddämpfungsfaktor in Abhängigkeit der Frequenz (ausgewählte Daten aus [12]).

Für ähnliche Empfangsleistungen im 3,5-GHz-Band (= 3.500 MHz) wie im 1800-MHz-Band (= 1,8 GHz) bedarf es also einer Sendeleistungserhöhung um das 3,78-fache. Um das 26-GHz-Band mit gleicher Empfangsleistung zu versorgen, wäre eine Leistungserhöhung um das 208,7-fache (= $3,78 \cdot 55,2$) nötig.

Neben der frequenzabhängigen Freiraumdämpfung existieren auch andere Effekte, die zur Signalreduktion bei höheren Frequenzen beitragen. Die Längsdämpfung von Gebäudewänden mit den typischerweise verwendeten Baustoffen (Beton für Wand- und Deckenkonstruktionen mit und ohne Stahlbewehrung sowie Hohllochziegel) weisen ebenfalls eine deutliche Frequenzabhängigkeit auf. Ab einer Frequenz von ca. 1 GHz kommt es bei den meisten (besonders in Innenstädten) gängigen Baumaterialien zu hohen Dämpfungsfaktoren. In Messungen des BSI [12] ergaben sich die in Abbildung 6 gezeigten baustoffabhängigen Dämpfungsfaktoren für Außenwände. In dieser Übersicht wurden Leichtbauweisen wie Holz- und Trockenbau sowie Glasfassaden nicht abgebildet. Dämpfungsfaktoren oberhalb von ca. 10 Mio. liegen in der Nähe der Messgrenze, wodurch sich praktisch eine noch höhere Dämpfung als angezeigt ergeben könnte.

Aus den baumaterialspezifischen Daten geht hervor, dass höhere Frequenzen im statistischen Mittel eine geringere Gebäudedurchdringungsfähigkeit aufweisen. Dies gilt insbesondere in Innenstädten, wo wegen der höheren Konstruktionsweisen oft Stahlbeton zum Einsatz kommt. Wie zuvor an der Freiraumdämpfung beschrieben, müsste der Netzdienstleister auch diesbezüglich die Sendeleistung erhöhen, um in allen Frequenzbändern gleiche Empfangsleistungen gewährleisten zu können. Dies würde angesichts der gezeigten hohen Kompensationsfaktoren zur Überschreitung der zulässigen Strahlungsbelastung nach der 26.

Verordnung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) führen. Um die höherfrequenten neuen Funkbänder dennoch im innerstädtischen Gebiet einsetzen zu können, müssen deshalb zwangsläufig viele Sendeanlagen mit einfacher Leistung (Kompensationsfaktor ca. 1) eingesetzt werden [13]. Das sehr hochfrequente 26-GHz-Band soll insbesondere bei Großveranstaltungen wie Musikkonzerten oder in Fußballstadien zum Einsatz kommen, während das 3,5-GHz-Band in den kommenden Jahren flächendeckend in den Zentren der Großstädte ausgerollt werden wird. Im ländlichen Raum, wird weiter auf den Einsatz der niederfrequenten Bänder gesetzt werden (Quelle: Vodafone [14]).

Bezüglich einer andauernden Strahlungsexposition von Menschen für die neuen, höheren Frequenzbänder (3,5- und 26-GHz) existieren gegenwärtig noch keine Langzeituntersuchungsergebnisse. Auch die Einhaltung von maximalen Strahlungsleistungen könnte bei länger andauernder Belastung gesundheitliche Schäden verursachen. Diesbezüglich initiierte Forschungsprojekte (Deutsche Mobilfunk Forschungsprogramm (DMF) sowie INTERPHONE-, MOBI-Kids- oder STOA-Studie) sollen dafür in den kommenden Jahren das Gefährdungspotenzial identifizieren.

Wegen der künftigen niederschweligen Nutzbarkeit (Senden und Empfangen) hoher Signalfrequenzen durch relative günstige kommerzielle Mobilfunkgeräte geraten neue technische Möglichkeiten in den Fokus der Forschung und Entwicklung. Die bislang eher spezielle Radartechnik zur Ortung oder Abstandsmessung von Objekten im Straßenverkehr könnte dadurch künftig einfacher in Fahrzeuge integriert werden [15]. In Kombination mit 5G ließen sich dadurch automatische Kommunikationssysteme zwischen Fahrzeugen („Car2Car“ oder „V2V“) oder zwischen Fahrzeugen und anderen Objekten („V2X“) errichten [16].

Zusammenfassung aktueller und Prognose künftiger Mobilfunkerweiterung

Die durch den Ausbau des Mobilfunknetzes seit 1990 stattfindende fortwährende technische Mobilisierung unserer Gesellschaft wird durch die aktuelle 5. Generation auf eine neue technologische Ebene gerückt. Es werden Datenraten und Latenzzeiten erreicht werden, die dem Nutzer den Eindruck vermitteln, als würde er im kabelgebundenen Heimnetzwerk arbeiten. Diese technischen Möglichkeiten und die finanziell relativ kostengünstigen Endgeräte werden dem Mobilfunk auch in den kommenden Jahren weitreichenderen Zulauf bescheren. Anhand ausgewählter Statistiken konnte gezeigt werden, dass der Ausbau der Mobilfunkinfrastruktur auf 5G regional zwar sehr unterschiedlich weit fortgeschritten sein kann, aber in einigen Industrieländern bereits 4G bei der mobilen Breitbandversorgung abgehängt hat.

Aus den Erfahrungen vergangener Mobilfunkgenerationen und der Integration der aktuellen 5. Generation lassen sich einige Prognosen für die künftige Mobilfunkerweiterung anstellen. In Abbildung 1 ist ersichtlich, dass jede Mobilfunkgeneration im Mittel ca. 10. Jahre andauerte. Vor diesem Hintergrund ist mit dem Start der 6. Generation etwa ab dem Jahr 2029 zu rechnen. Video- und Audiotelefonie sowie Video- und Audiostreaming benötigen auch bei höchsten Qualitätsanforderungen eine endlich hohe Datenrate. Vor diesem Hintergrund könnte irgendwann von einer Selbstlimitierung des Datenratenbedarfs ausgegangen werden, nämlich wenn alle Menschen uneingeschränkt parallel in UHD-Qualität videostreamen können. Dieses theoretische Szenario technisch durch Mobilfunk zu gewährleisten, wird jedoch auch in den kommenden Mobilfunkgenerationen nicht erreicht werden können. Darüber hinaus könnten auch neue, bislang noch unbekannte Formen von Echtzeit-Datenstreaming entstehen, die sehr hohe Datenraten benötigen. Es kann also angenommen werden, dass es auch in den folgenden Mobilfunkgenerationen zu großen Weiterentwicklungen bezüglich der Datenraten, Latenzzeiten und Anzahl von Kanälen kommen wird. Um dies zu erreichen, werden zwangsläufig auch neue Frequenzbänder für die Mobilfunknutzung erschlossen werden müssen. Dies wird einen anhaltenden Forschungsbedarf bezüglich der Langzeitfolgen andauernder Strahlungsexposition des Menschen in den entsprechenden Frequenzbändern mit sich bringen. Weiter im Fokus wird die Erhöhung der spektralen Effizienz liegen, zur besseren Ausnutzung der verfügbaren Bandbreiten durch Methoden der Datenverarbeitung und Weiterentwicklung von Baugruppen im Kleinsignalbereich. Eine höhere räumliche Effizienz wird auch zukünftig dadurch erreicht werden, dass durch die Erhöhung von Einzelantennen in Basisstationen (Stichwort: „Massive MIMO“) immer kleinere Strahlbreiten und Funkzellen erzeugt werden. Das wiederum geht mit der Erhöhung der Anzahl an Basisstationen, insbesondere im Stadtbereich einher. In besonders dicht bebauten Gebieten könnte daher eine lokale Erhöhung der Sendeleis-

tung wegen der eingeschränkten Gebäudedurchdringung höherer Frequenzbänder gegenüber bislang üblichen Sendepiegeln unvermeidlich sein.

An die Vernunft der Menschen zu appellieren, sich bezüglich der Nutzung der begrenzten Mobilfunkressourcen auf das notwendige Maß einzuschränken, wird voraussichtlich nicht den Effekt eines sichtbar verminderten Breitbandbedarfs mit sich bringen. Es lässt sich darüber streiten, ob die regelmäßige Bereitstellung größerer Mobilfunkressourcen durch die Versorgungsunternehmen unvernünftig und unverhältnismäßig sei, anstatt der Gesellschaft einen echten Nutzen zu bringen. Zweifelsfrei ist, dass eine stetige und planbare Erhöhung verfügbarer Möglichkeiten bei der Nutzung höherer Frequenzen und Kommunikationswege viel Raum für neue Ansätze, Erfindungen und Unternehmen bietet und somit zu einer Erschließung immer neuer Arbeitsfelder und technischer Möglichkeiten beiträgt.

Literaturverzeichnis

- [1] „Prognose zur Anzahl der Smartphone-Nutzer weltweit bis 2028“, © Statista 2024, veröffentlicht von F. Tenzer, 03.01.2024, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/309656/umfrage/prognose-zur-anzahl-der-smartphone-nutzer-weltweit/>
- [2] „5G – Der Mobilfunkstandard im Überblick“, Harald Naumann, Michael Eckstein, ELEKTRONIKPRAXIS, 02.07.2018, <https://www.elektronikpraxis.de/5g-der-mobilfunkstandard-im-ueberblick-a-894898beacb2de198456115c7933c3ed/>
- [3] „Was ist Massive MIMO?“, Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, hf-praxis 11-2019, S.52-55, © beam-Verlag Dipl.-Ing. Reinhard Birchel
- [4] „Benchmarking the global 5G user experience – October update“, Ian Fogg, Opensignal Limited, 13.10.2020, <https://www.opensignal.com/2020/10/13/benchmarking-the-global-5g-user-experience-october-update>
- [5] „Flächenanteil in Deutschland mit Mobilfunkversorgung nach Technologie 2024“, Bundesnetzagentur, ID 1346916, April 2024
- [6] „Verfügbarkeit des Mobilfunkstandards 5G auf deutschen Autobahnen (in % der Straßenkilometer)“, Bundesnetzagentur, Ende 2022, abgerufen von <https://de.statista.com/infografik/31362/verfuegbarkeit-des-mobilfunkstandards-5g-auf-deutschen-autobahnen/>
- [7] „Ericsson Mobility Visualizer“, © Ericsson 2024, <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/mobility-visualizer>

- [8] „5G download speed is now faster than Wifi in seven leading 5G countries“, Ian Fogg, Opensignal Limited, 06.05.2020, <https://www.opensignal.com/2020/05/06/5g-download-speed-is-now-faster-than-wifi-in-seven-leading-5g-countries>
- [9] „Infoportal "digital_Länd" zur Digitalisierung in Baden-Württemberg, abgerufen am 18.07.2024 (<https://digital-laend.de/mobilfunk/mobilfunk-grundlagen-downloads/>)
- [10] „Bericht Mobilfunk und Strahlung“, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Schweiz, 18.11.2019, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/dossiers/bericht-arbeitsgruppe-mobilfunk-und-strahlung.html>
- [11] „5G Frequenzen in Europa, Asien und Amerika – internationale Pläne & Nutzung von 5G Frequenzen“, © 5G-Anbieter.info, abgerufen am 02.08.2024, <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-baender-international.html>
- [12] „Elektromagnetische Schirmung von Gebäuden – Praktische Messungen“, Kürzel: BSI TR-03209 - 2, Version 1.3, BSI – Technische Richtlinie, 30.04.2008, https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/TechnischeRichtlinien/TR03209/BSI-TR-03209-2.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [13] „Berliner Handreichung – Mobilfunk unter Berücksichtigung des Immissionsschutzes“, Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe, <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.berlin.de%2Fsen%2Fwirtschaft%2Fdigitalisierung%2Fassets%2Fberliner-handreichung-mobilfunk-und-immissionsschutz.pdf&psig=AOvVaw2ndLZ4iHS8MqWzVMp1OcBL&ust=1721379664126000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=2ahUKEwjOgsCMnbCHAXp6bslHa6JDsoQ3YkBegQIABAV>
- [14] „Was genau ist 5G?“, © Vodafone GmbH, abgerufen am 18.07.2024, <https://www.vodafone.de/unternehmen/5g.html>
- [15] „A Proposed Paradigm for Evaluating Spectrum Sharing Between a Cognitive Radar and 4G/5G Communications“, Jordan A. DeVault, Benjamin H. Kirk, Anthony F. Martone, Ram M. Narayanan, Kelly D. Sherbondy, 21-25 März 2022, 2022 IEEE Radar Conference (RadarConf22)
- [16] „A Compact Wideband Terrestrial MIMO-Antenna Set for 4G, 5G, WLAN and V2X and Evaluation of its LTE-Performance in an Urban Region“, Sertan Hastürkoğlu, Mahmoud Almarashli, Stefan Lindenmeier, 31.03.-05.04.2019, 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP),