Volle Beschleunigung mit 5G

Einsatzgebiete, Ziele und Eigenschaften des Mobilfunksystems der 5. Generation

War vor gut 100 Jahren „Elektrifizierung“ der Energieversorgung das Synonym für Fortschritt, so ist es heute in Politik und Wirtschaft wie ein Mantra die „Digitalisierung“ der Informations- und Kommunikationstechniken auf dem Weg zur „Gigabit-Gesellschaft“: „Alles, was digitalisiert werden kann, wird digitalisiert – und vernetzt.“ [1]

Mit 5G allgegenwärtig: „Das Netz“

Mit „Vernetzung“ ist dabei längst kein Knäuel aus Kupferleitungen mehr gemeint, sondern schnellste Glasfasertechnik und die nahtlose Einbeziehung von nahezu überall verfügbaren Funksystemen, insbesondere des in den letzten 25 Jahren rasant gewachsenen Mobilfunks. Mit der nun laufenden Einführung („Roll out“) der 5. Generation (5G) erfährt der Mobilfunk einen Bedeutungswandel, wie er noch vor wenigen Jahren unvorstellbar schien. Die Trennung zwischen Mobilfunk und Festnetz wird aufgehoben, und es wird nur noch das eine, nahezu allgegenwärtige „Netz“ geben. Das Land der unbegrenzten Möglichkeiten – im positiven wie im negativen Sinne – ist nicht mehr Amerika, sondern das soll „das Netz“ sein.

Der Mobilfunk war ursprünglich mit dem Ziel angetreten, Telefonate und später auch den Internetzugriff abseits von Festnetzanschlüssen, unterwegs und mobil zu ermöglichen. Mit der zunehmenden Verbreitung wurden auch mehr und mehr die Festnetzanschlüsse von den Handys und Smartphones zunächst ergänzt und dann immer mehr abgelöst. Benutzt werden Handys und Smartphones von menschlichen Wesen/Personen/Usern/Teilnehmern.

Mit 5G wird sich dieses Szenario massiv ändern: Neben der Mensch-zu-Mensch-Kommunikation wird der Anteil von Mensch-Maschine- und Maschine-Maschine-Kommunikation rasant steigen. Es geht auch gar nicht mehr um „Mobilfunk“ im ursprünglichen Sinne, sondern um das drahtlose „Netz“ schlechthin, das mit unbegrenzt erscheinender Kapazität und schier unbegrenzten Möglichkeiten überall – egal, ob innerhalb oder außerhalb von Gebäuden – für Datenübertragungen aller Art zur Verfügung steht, so wie wir es ganz selbstverständlich von der Luft zum Atmen gewohnt sind.

Die kurze Bezeichnung „5G“ wird im Übrigen vorwiegend nur von Politik und Wirtschaft bzw. Marketing benutzt. In technischen Kreisen spricht man von 5G NR (5G **N**ew **R**adio). Im Englischen bedeutet „Radio“ dabei allgemein „Funk“, und hat nicht – wie im Deutschen – die spezielle Bedeutung des öffentlichen Tonrundfunks.

Die Ahnengalerie des Mobilfunks

<u>Die 1. Generation – Analoge Technik</u>

Das A- und B-Netz, die zur ersten Generation der Mobilfunksysteme zählen, wurden in den 60er, 70er und 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts aufgebaut und betrieben. Sie trugen damals bezeichnenderweise den Namen „Autotelefon“, und die im Kfz eingebauten Geräte waren weit davon entfernt, hinsichtlich Größe, Gewicht und Stromverbrauch mit einem Handy oder Smartphone der zweiten, dritten oder gar vierten Mobilfunkgeneration mithalten zu können, ganz zu schweigen vom Preis der Geräte und den Kosten des Telefonierens – „flat rate“ war damals ein unbekanntes Wort. Das Autotelefon war daher im Wesentlichen einer Elite von besonders bedeutenden und/oder betuchten Geschäftsleuten zur beruflichen Nutzung vorbehalten und das Gegenteil von einem Massenmedium wie dem heutigen Mobilfunk. Die Technik war – den damaligen Möglichkeiten entsprechend – rein analog.

Mit der Einführung des C-Netzes erfolgte ab 1984 ein erster Schritt in Richtung Digitalisierung: Die Sprachübertragung war zwar immer noch analog, aber die Steuerungsdaten des Systems wurden in digitaler Form übertragen. Das C-Netz erreichte auch erstmals eine nahezu vollständige Versorgung in

der Fläche und aufgrund einer drastischen Preissenkung eine größere Teilnehmerzahl in der Bevölkerung (etwa eine Million bei einer Infrastruktur von ca. 2.000 Basisstationen) – nicht zuletzt auch deshalb, weil man bei den Mobilteilen aufgrund fortschreitender Miniaturisierung nun erstmals von einfach zu transportierenden „Handys“ reden konnte.

Abb. 1: Logos der digitalen Mobilfunk-Generationen 2G bis 5G

GSM, die 2. Generation – Ab jetzt voll digital

Inzwischen war durch die Entwicklung komplett digitaler Technik – inklusive der Sprachübertragung – ein Mobilfunksystem entstanden und wurde ab 1992 am Markt eingeführt, das hinsichtlich Komfort, Leistungsfähigkeit und Kosten das alte analoge System binnen kurzer Zeit überflügelte: GSM (**G**lobal **S**ystem for **M**obile Communications) war das Mobilfunksystem der 2. Generation (2G) – in Deutschland eher bekannt als D-Netz (GSM 900) und E-Netz (GSM 1800) –, mit dem die Massennutzung des Mobilfunks den großen Durchbruch erreichte – begleitet vom Aufbau von schätzungsweise rund 45.000 Basisstationen, die für einen flächendeckenden Betrieb erforderlich waren. Die Signalcharakteristik bei GSM ist geprägt durch das Zugriffsverfahren TDMA (**T**ime **D**ivision **M**ultiple **A**ccess), bei dem sich bis zu acht Teilnehmer eine Frequenz teilen und das zu einer periodischen Pulsung des Signals führt; Details siehe [2] und [3].

UMTS, die 3. Generation – High Speed Datenübertragung

Bald schon wurde das Telefonieren zur „Nebennutzung“ des Handys: SMS, Spiele, Empfang und Versand von Bildern und Daten, Internetzugriff usw. erforderten immer höhere Übertragungsraten und Netzkapazitäten. Aus den „Handys“ mit vergleichsweise recht geringer Funktionalität wurden komfortable „Smartphones“ mit vielen neuen Funktionen und überall verfügbarem Internetzugang – der Durchbruch kam mit Apple‘s erstem iPhone.

Als Mobilfunksystem der 3. Generation (3G) trat – nach langen Anlaufschwierigkeiten – nach der legendären Frequenzauktion 2000 UMTS (**U**niversal **M**obile **T**elecommunications **S**ystem) in den heiß umkämpften und mittlerweile zu einem bedeutsamen Wirtschaftsfaktor angewachsenen Mobilfunkmarkt ein, der auch im Sozialverhalten der Bevölkerung und hier insbesondere bei den Jugendlichen deutliche Spuren hinterlassen hat. Mit UMTS erreichte die Durchdringung der deutschen Bevölkerung mit Mobilfunk-Endgeräten statistisch betrachtet erstmals mehr als 100 Prozent! Die Funkübertragung bei UMTS erfolgt mit dem Zugriffsverfahren W-CDMA (**W**ideband **C**ode **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) nach völlig anderen Prinzipien als bei GSM; dementsprechend ist die Signalcharakteristik auch völlig anders. Details hierzu siehe [2] und [3].

Bald war auch schon das „normale“ UMTS zu langsam; daher wurden zur Beschleunigung der Datenraten die „High Speed“-Varianten HSPA/HSPA+ (**H**igh **S**peed **P**acket **A**ccess) entwickelt und innerhalb kurzer Zeit eingeführt.

Und UMTS (3G) ist das erste Mobilfunksystem, das nun fast der Vergangenheit angehört – noch weit vor dem älteren GSM (2G). Telekom und Vodafone schalten nämlich in Deutschland ihre UMTS-Anlagen Ende Juni 2021 ab, Telefónica folgt zum Ende des Jahres 2021.

LTE und LTE Advanced, die 4. Generation

Und wieder ertönt der Ruf nach noch schnelleren Systemen für die von der deutschen Regierung im EU-Konsens vorangetriebene Breitbandversorgung der Bevölkerung auch außerhalb der Ballungsgebiete. Die Antwort der Industrie ist LTE (**L**ong **T**erm **E**volution), für das die Frequenzen in Deutschland im Jahr 2010 versteigert wurden und das als Mobilfunksystem der 4. Generation (4G) vermarktet wird. Und wieder wird mit OFDMA (**O**rthogonal **F**requency **D**ivision **M**ultiple **A**ccess) eine neue Funktechnik mit einer neuen Signalcharakteristik eingesetzt (s. [2] und [3]).

Bei der Zuordnung von LTE zu einer Mobilfunkgeneration gibt es jedoch scheinbare Widersprüche, da es zumeist schon der 4. und manchmal noch der 3. Mobilfunkgeneration zugeordnet wird. Dies liegt jedoch nur daran, dass Marketingstrategen gerne bereits etwas propagieren, das die Technik noch nicht wirklich erfüllen kann. LTE gehört wie UMTS und HSPA/HSPA+ noch zur dritten Mobilfunkgeneration gemäß den technischen Leistungsmerkmalen, welche die ITU (**I**nternational **T**elecommunication **U**nion) festgelegt hat.

Im „einfachen“ LTE-Standard reichen u.a. die Spektraleffizienz und Kanalbandbreitennutzung nicht aus, um die Anforderungen für den 4G-Standard der ITU zu erfüllen. LTE ist demzufolge maximal als 3.8G oder 3.9G einzustufen, wird unter Marketinggesichtspunkten aber trotzdem i.d.R. als 4G bezeichnet, da der potentielle Kunde hiermit höhere Datenraten und leistungsfähigere Technik verbindet. Erst bei der Ausbaustufe „LTE-Advanced“ handelt es sich um eine „echte“ 4G-Technologie, welche die Anforderungen der ITU an diese Mobilfunkgeneration voll erfüllt.

Mit zunehmender „Zahl“ der Generationen steigen die Übertragungsgeschwindigkeit, Datenrate und Netzkapazität. Diese drei Größen sind auch ein wesentlicher Motor für die bisher erfolgte und zukünftige Weiterentwicklung neuer Generationen. Zur Erreichung dieser Ziele wurden die Bandbreiten entsprechend immer größer (Abb. 2): Von 200 kHz bei GSM über 3,84 MHz bei UMTS bis zu 5, 10 oder 20 MHz bei LTE. Und LTE eröffnet schon die Möglichkeit, mehrere Kanäle parallel zu bündeln, um auf Gesamtbandbreiten von 40 MHz, 60 MHz oder noch höher zu kommen. Bei 5G werden im Frequenzbereich unter 8 GHz (**F**requency **R**ange FR1) Bandbreiten bis zu 100 MHz verwendet; im Frequenzbereich über 24 GHz (FR2) sogar bis zu 400 MHz. In Deutschland verfügen die Mobilfunkbetreiber über die folgenden Bandbreiten: Telekom und Vodafone je 90 MHz, Telefónica 70 MHz, Drillisch 50 MHz.

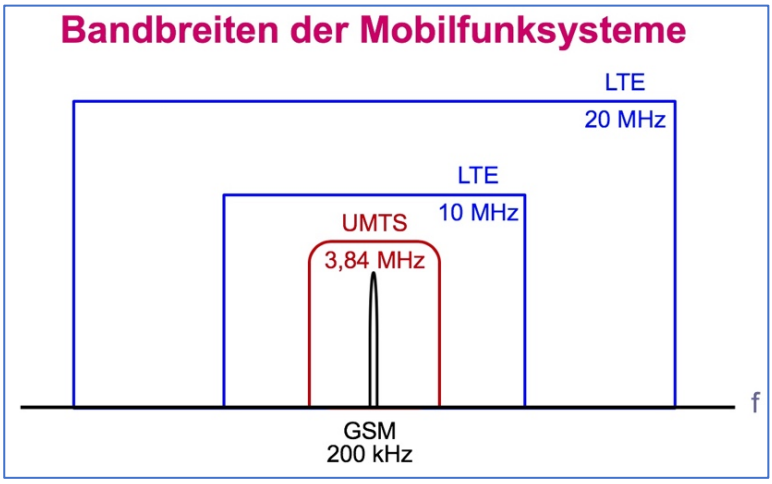

Abb. 2: Bandbreiten der Mobilfunksysteme 2 G bis 4 G

Eine ausführlichere Darstellung dieses Kapitels ist in dem Beitrag „Die 5G-Ahnengalerie – Vom Autotelefon zu LTE und IoT (Internet of Things)“ [4] des Autors zu finden; detaillierte Beschreibungen der einzelnen Signalcharakteristiken in [2] und [3].

5G: Von der Politik gewollt

Die umfassende Digitalisierung und in ihrem Zuge die Breiteneinführung von 5G sind in erster Linie politisch gewollt und als hohes Ziel ausgerufen. So hat das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI im Rahmen der Initiative „Netzallianz Digitales Deutschland“ bereits im Kursbuch „Netzausbau 2016“ verlautbart, dass Deutschland bei der Entwicklung zur Gigabitgesellschaft vor der Herausforderung steht, die hierfür notwendigen Infrastrukturen zu schaffen:

„Die zunehmende Vernetzung von leitungsgebundenen und mobilen Anwendungen stellt stetig erhöhte Anforderungen an die bedarfsgerechte Bereitstellung von Frequenzen dar. Eine besondere Herausforderung bildet hier die Weiterentwicklung zu 5G.“ ([5], zitiert in [6])

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi hat in seiner „Digitalen Strategie 2025“ das Ziel ausgegeben: *„eine zukunftsfähige digitale Infrastruktur [zu] schaffen, die der dreifachen Anforderung von hoher Kapazität, breiter Verfügbarkeit und geringer Latenz genügt.“* ([7], zitiert in [6])

Und die **B**undes**netza**gentur (BNetzA) stellt fest:

„Deutschland soll Weltspitze bei der digitalen Infrastruktur und Leitmarkt für 5G werden. Die neue Mobilfunkgeneration 5G soll die Entwicklung innovativer Dienste und Anwendungen (Industrie 4.0, automatisiertes Fahren, Internet der Dinge) fördern. Dafür werden Frequenzen frühzeitig und bedarfsgerecht bereitgestellt, damit Deutschland bei diesem Technologiesprung voranschreitet.“ [8]

Technische Ziele von 5G

Aus dem o.g. politischen Willen ergeben sich die folgenden technischen Zielsetzungen für 5G:

- Höchste Datenraten und -kapazitäten für hohe Datenvolumina und extrem große Teilnehmerzahlen bei IoT (Internet of Things) und Smart X-Anwendungen,
- Niedrigste Latenzzeiten für die schnelle Reaktion von Regelsystemen (Autonomes Fahren, Industrielle Produktionsprozesse, ferngesteuertes Operieren in der Medizin),
- Quasi überall verfügbar.

Latenzzeit ist die technisch bedingte Verzögerung, bis eine Datenübertragung nach ihrer Anforderung beginnt. Im Rahmen von 5G werden Latenzzeiten von deutlich unter 10 ms (Millisekunden) angestrebt, möglichst sogar um 1 ms.

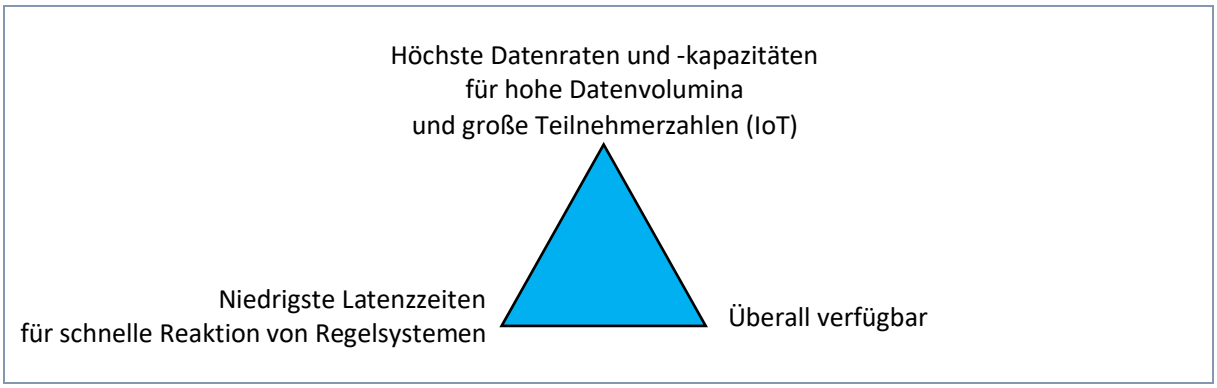

Abb. 3: Technische Ziele von 5G

Die o.g. Ziele sind teilweise widersprüchlich: *„Dazu muss man im Hinterkopf haben, dass 5G nicht gleich 5G ist. Vielmehr ist das, was unter dem Schlagwort 5G zusammengefasst wird, eine Sammlung verschiedener Mobilfunktechniken – jeweils für den richtigen Einsatzzweck konfiguriert. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der genutzten Frequenzen, der möglichen Bandbreite und natürlich hinsichtlich der unterstützten Latenz.“* [9]

Wichtig für die Erreichung der jeweiligen Ziele ist auch die Gestaltung des IT-Umfeldes, wie zentrale oder lokale Cloud-Lösungen und EDGE-Computing.

Die für den Vergleich der Übertragungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Mobilfunksysteme üblicherweise herangezogene Datenrate in Kbps, Mbps oder Gbps (Kilo,- Mega-, Gigabit pro Sekunde) ist für unser Vorstellungsvermögen recht abstrakt. Eine wesentlich bessere Vorstellung erhält man, wenn stattdessen die Zeitdauer angegeben wird, die für die Übertragung eines bestimmten Datenvolumens benötigt wird, wie in Abb. 4 angegeben.

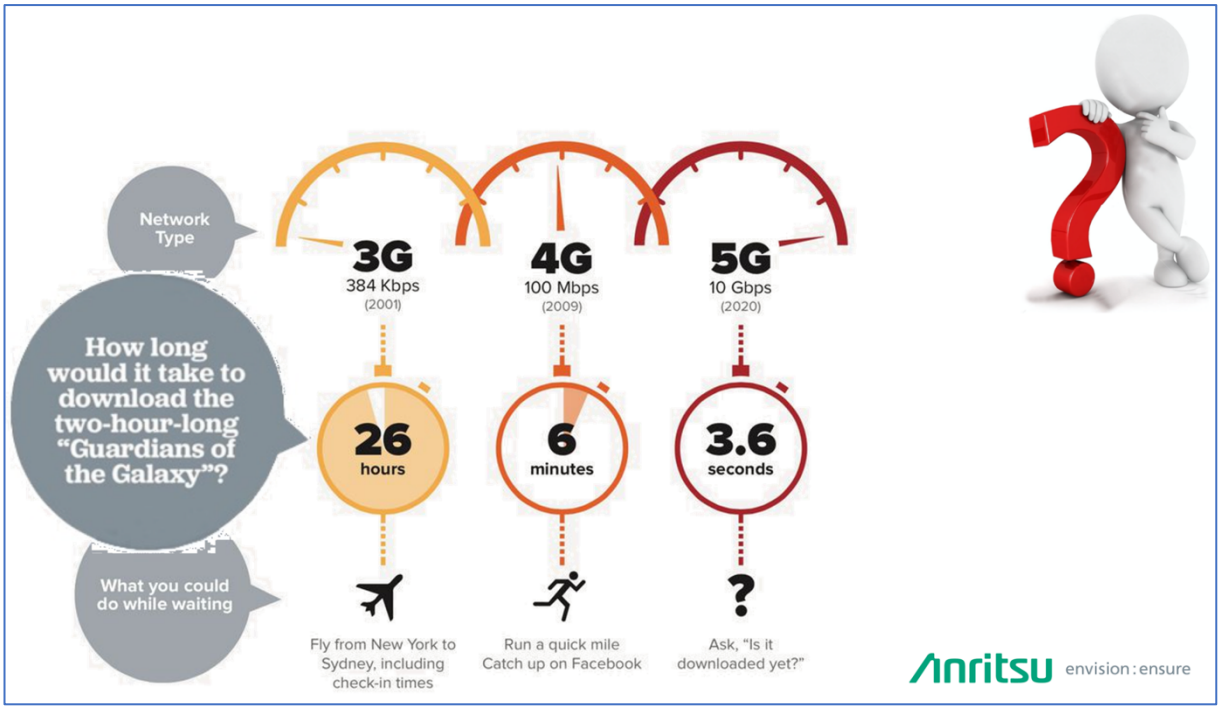

Abb.4: 5G-Übertragungsgeschwindigkeit im Vergleich mit 3G und 4G (Anritsu [10])

Als Hauptanwendungsbereiche von 5G werden insbesondere die in Abb. 5 dargestellten Einsatzfelder genannt.

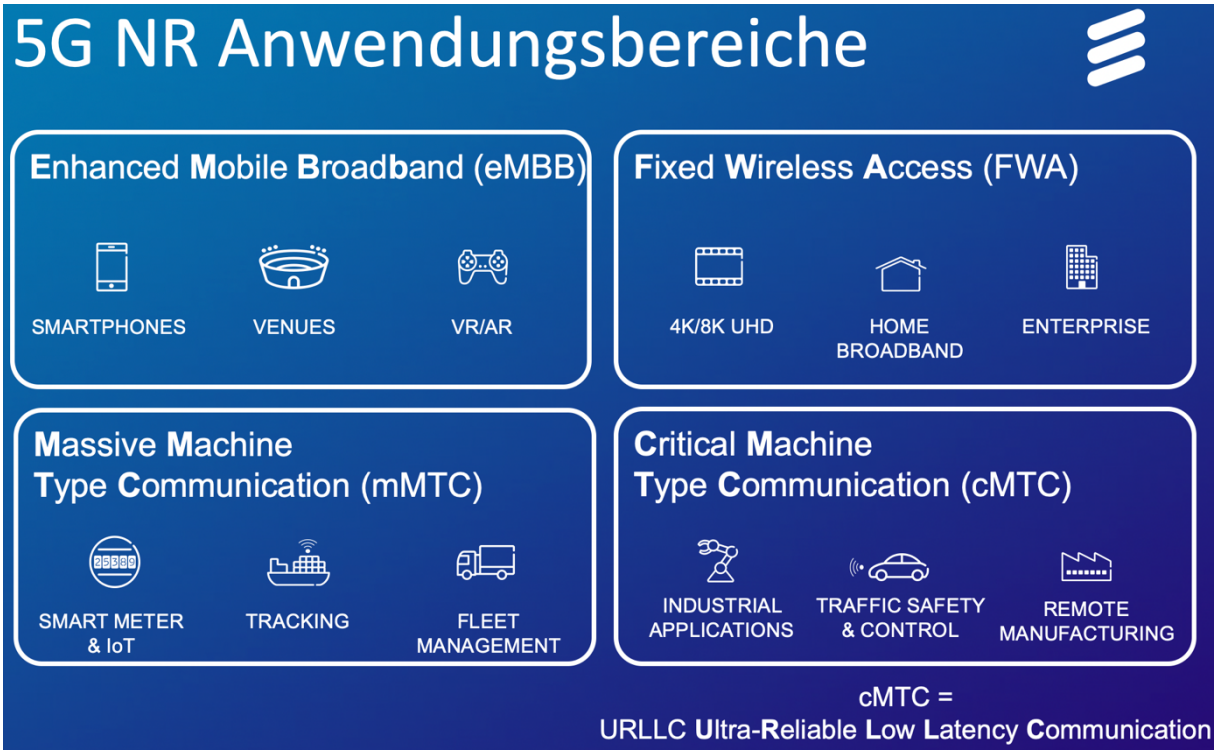

Abb. 5: 5G NR Anwendungsbereiche eMMB, FWA, mMTC und cMTC/URLLC (Ericsson [11])

Zum Beispiel: Die Vision des 5G-Ausrüsters Huawei

„5G-Mobilfunk ist bereit und wird die Wirtschaft verändern

5G ist gebrauchsfertig und wird tiefgreifende Veränderungen verursachen. Aber es gibt noch Hemmnisse, gegen die Regierungen etwas tun müssen, meint Huaweis Rotating CEO Ken Hu.

5G-Mobilfunk ist auf dem Weg, das stellte Ken Hu, Rotating Chairman von Huawei, in seiner Keynote-Rede zur Eröffnung des Global Mobile Broadband Forums (20. bis 21. November 2018) in London klar.

‚Aus allen Blickwinkeln ist 5G bereit', sagte er. ‚Es ist gebrauchsfertig, erschwinglich und vor allem, die Nachfrage ist real. Natürlich gibt es immer noch einige Hindernisse für den Einsatz von 5G.'

Huawei habe bereits über 10.000 5G-Basisstationen ausgeliefert. „5G wird eine technologische Revolution starten", meint Hu. Und weiter: ‚Es wird allen IKT-Technologien neue Kraft verleihen und tiefgreifende Veränderungen in der Wirtschaft auslösen. Es wird neue Möglichkeiten geben, wie wir sie noch nie gesehen haben.'

Ken Hu prognostiziert fünf grundlegenden Änderungen, die 5G bringen wird:

1. *5G wird die Konnektivität in eine Plattform verwandeln. 5G erlaubt allgegenwärtige, nahtlose und unbegrenzte Konnektivität für alle Menschen und alle Dinge.*
2. *Alles wird online gehen. Im Moment sind die meisten Dinge standardmäßig offline, und die meisten elektronischen Geräte sind nicht verbunden. Mit 5G wird online und verbunden zu sein zum Standard für alles.*
3. *Die Welt wird in die Cloud gehen. Die mit 5G aufgeladene Cloud bietet eine enorme Rechenleistung mit blitzschnellen Übertragungsgeschwindigkeiten und nahezu Null Verzögerung. Damit ist Intelligenz auf Abruf (Intelligence on Demand) für jeden und überall verfügbar.*
4. *Geräte werden neu definiert. Mit KI-Unterstützung für Geräte, Netzwerk und die Cloud werden Geräte von Plug and Play zu Plug and Think übergehen. Sie werden Benutzer besser verstehen und in der Lage sein, unsere Bedürfnisse aktiv vorherzusagen, nicht nur passiv. Sie werden auf Befehle reagieren und mit uns auf natürlichere Weise interagieren.*
5. *Das Erlebnis wird nahtlos verlaufen. Bei bestehenden Netzwerken ist unsere Online-Erfahrung von einem Szenario zum anderen fragmentiert. Wenn alle Dinge online und Cloud-basiert sind, fließen Erlebnis und Inhalte nahtlos durch Zeit, Raum und Geräte – für ein wirklich ganzheitliches Erlebnis über alle Szenarien hinweg.*

Ken Hu ging auch auf die Herausforderungen bei der Frequenzzuweisung und der Standortbereitstellung ein. Insbesondere den Mobilfunkbetreibern fehlten die Ressourcen für das Spektrum. Um die Bereitstellung zu beschleunigen, empfahl er den Regierungen, den Prozess der Harmonisierung und Freigabe kontinuierlicher Bänder mit großem 5G-Spektrum und zu Gesamtkosten von weniger als 4G zu beschleunigen. ‚In der Zwischenzeit', wies er die Mobilfunkbetreiber im Publikum darauf hin, ‚können und werden neben dem C-Band auch alle Bänder für 5G genutzt werden, einschließlich 2,3 GHz und 2,6 GHz-Bänder.'

‚Was die Standorte betrifft, so ist die Bereitstellung von Netzwerken ein teures Geschäft', fuhr er fort. ‚Wir ermutigen die Regierungen, mehr öffentliche Ressourcen für den Einsatz vor Ort bereitzustellen. Gemeinsame Versorgungsinfrastrukturen wie Dächer und Lichtmasten können den Carriern helfen, Kosten und Zeit zu sparen und sogar neue Einnahmequellen für Stadtwerke zu erschließen.' " [12]

Und in der Tat gibt es kräftige Unterstützung seitens der Politik bei der Standortsuche für 5G-Basisstationen in den Kommunen und hier insbesondere auf kommunalen Trägern (Straßenlaternen, Verkehrsampeln, Verkehrsschilder, Fahrgastinformationstafeln usw.), wie z.B. mit der Handreichung „Mitnutzungspotentiale kommunaler Träger-infrastrukturen für den Ausbau der nächsten Mobilfunkgeneration 5G – Eine Handreichung der AG Digitale Netze des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur" [13].

Zielerreichung mit neuen und alten Frequenzen

Höhere Datenraten lassen sich durch größere Bandbreiten erreichen. Im Frequenzbereich unter 3 GHz ist aber bereits seit Langen kaum noch Platz. Also muss man auf Frequenzen oberhalb von 3 GHz ausweichen. Außerdem steigt bei gleicher prozentualer Bandbreite mit zunehmender Frequenz die absolute Bandbreite: 10 % von 1 GHz sind 100 MHz; 10 % von 20 GHz dagegen schon 2 GHz.

Innerhalb von zwei großen Frequenzbereichen (**F**requency **R**ange FR) sind exakte Bänder für 5G NR-Anwendungen definiert:

- FR1 von 410 MHz bis 7,125 GHz, 26 Bänder für Up- und Downlink und
- FR2 von 24,25 GHz bis 52,60 GHz.

Die Einführung erfolgt in Europa zurzeit ausschließlich in FR1. Der Focus in Presse und Werbung liegt dabei auf dem **neuen Frequenzband 3,6 GHz** für die höchsten Übertragungsraten, das bei der Frequenzauktion im Frühjahr 2019 erstmalig für Mobilfunkanwendungen versteigert wurde. Hier kommt das Duplexverfahren[1] TDD (**T**ime **D**ivision **D**uplex) zum Einsatz, d.h. Basisstationen und Mobilteile senden im schnellen Wechsel auf der gleichen Frequenz, was immer ein gepulstes Signal zur Folge hat (wie z.B. auch bei DECT und WLAN). Basisstationen werden als Mast- und Dachstandorte errichtet, aber auch als „Small Cells" in Gebieten mit hoher Mobilfunk-Teilnehmerdichte.

Die Mast- und Dachstandorte im Bereich 3,6 GHz arbeiten mit einer neuen Antennentechnik, den „Smart Antennas" mit „Massive MIMO[2]" oder „aktivem Beamforming" (s.u.); diese kann auch bei zukünftigen 5G-Anwendungen im Frequenzbereich 2,6 GHz zum Einsatz kommen, der bisher für LTE 2600 genutzt wird. Wenn bei deutschen Mobilfunk-Providern, in der Werbung und in den Medien von 5G die Rede ist, wird pauschal und undifferenziert diese Form von 5G unterstellt. In der Schweiz dagegen wird ehrlicher und differenziert diese Form als „5G fast" bezeichnet. Sie ist erheblich schneller („fast") und leistungsfähiger als die nachfolgend beschriebene Variante „5 G wide", die dafür eine größere Reichweite („wide") und Eindringtiefe in Gebäude hat, da die verwendeten Frequenzen niedriger sind.

Der flächendeckende Ausbau von 5G erfolgt nämlich zunächst gar nicht im Bereich 3,6 GHz, sondern auf den etablierten Mobilfunk-Frequenzen unterhalb von 2,6 GHz. Hier werden Antennen mit aktivem Beamforming nicht eingesetzt, weil aufgrund der größeren Wellenlänge die Antennen viel zu groß und zu schwer wären. In den **bekannten Bändern 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz und 2100 MHz** werden die bisher für GSM (2G), UMTS (3G) und LTE (4G) eingesetzten konventionellen Sektorantennen einfach weiter verwendet.

Hier ist es im Vergleich zu 3,6 GHz, wo erst die neuen Antennen installiert werden müssen, viel einfacher, die schon vorhandenen und in Betrieb befindlichen Mobilfunk-Antennen kurzerhand für 5G zu nutzen. Da bleiben dann die Antennen wo und wie sie sind, und es wird bei älteren Anlagen nur die elektronische Systemtechnik gegen die von 5G getauscht. Ein Beispiel für eine solche Umstellung seitens der Telekom ist in einem Video auf YouTube zu sehen [14].

Bei neueren, entsprechend vorbereiteten Anlagen braucht nicht einmal die Hardware getauscht zu werden, sondern es wird einfach eine neue Software aufgespielt (SDR – **S**oftware **D**efined **R**adio). So kann man mit vergleichsweise niedrigem Aufwand in kurzer Zeit eine große Anzahl von Basisstationen auf 5G umstellen – und braucht nicht einmal neue Standortbescheinigungen der Bundesnetzagentur dafür. Dann hat man auch 5G, aber nicht mit den extrem großen Bandbreiten von 50, 70 oder 90 MHz, sondern im „LTE-Format" um 10 oder 20 MHz und vor allem: **Ohne Massive MIMO und ohne aktives Beamforming.** Die Sektoren werden also ganz konventionell „ausgeleuchtet", wie man es von GSM,

[1] Das Duplexverfahren realisiert zwei gleichzeitig nutzbare Kanäle zwischen den Mobilfunk-Teilnehmern: Den Uplink (Endgerät → Basisstation) und den Downlink (Basisstation → Endgerät). FDD (Frequency Division Duplex) benutzt dazu zwei gepaarte Frequenzbänder, TDD (Time Division Duplex) realisiert den Up- und Downlink auf einer einzigen (ungepaarten) Frequenz im schnellen Wechsel.

[2] MIMO: **M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput; hier kommen mehrere Antennen zum Einsatz, die parallel betrieben werden: 2 bei 2-fach MIMO, 4 bei 4-fach MIMO und 64 bei 64-fach MIMO (= massive MIMO: mMIMO)

UMTS und LTE her kennt; es gibt hier keinen sich bewegenden oder „irrlichternden“ stark fokussierten Beam. Das Duplexverfahren bei „5G wide“ ist i.d.R. FDD (**F**requency **D**ivision **D**uplex), bei dem zwei unterschiedliche Frequenzbänder für Up- und Downlink verwendet werden.

Auch bei Small Cells wird kein aktives Beamforming eingesetzt – der Aufwand stünde in keinem Verhältnis zum Nutzen. Small Cells arbeiten typischerweise mit 4-fach MIMO.

Der erste Bereich, in dem großflächig auf 5G („wide“) umgestellt wird, ist der – schon muss man sagen: ehemalige – UMTS-Frequenzbereich 2100 MHz. Die Tage von UMTS sind gezählt: 3G wird als erstes Mobilfunksystem schon bald verschwinden. Telekom und Vodafone schalten nämlich in Deutschland ihre UMTS-Anlagen Ende Juni 2021 ab, Telefónica folgt zum Ende des Jahres 2021.

Sieht man einmal von den Ballungszentren und Großstädten ab, in denen tatsächlich bereits 5G NR im Bereich 3,6 GHz installiert ist (5G fast), so ist die Wahrscheinlichkeit in der Fläche und in den Nicht-Großstädten auf 5G-Signale zu stoßen, im Frequenzbereich unter 3 GHz viel größer (5G wide).

Bei Anlagen mit „5G wide“ kann im selben Frequenzkanal häufig 5G NR zeitgleich gemischt mit LTE gesendet werden; dieses Verfahren trägt den Namen DSS – D**ynamic** S**pectrum** S**haring**. Im Grundzustand arbeitet die Anlage mit LTE. Kommt dann aber ein Kunde mit einem 5G-Smartphone, so bedient die Anlage genau diesen Kunden mit 5G, während gleichzeitig für die anderen Benutzer LTE weiterläuft. Je höher in Zukunft der Anteil der Kunden mit 5G-Endgeräten wird, um so häufiger und länger schaltet die Basis von LTE auf 5G. So erfolgt ein allmählicher Übergang von 4G auf 5G. DSS wird insbesondere in den Frequenzbereichen 2100 MHz (Telekom) und 700 MHz (Vodafone) angewendet.

Bei sehr hohem Bandbreitenbedarf ist es möglich, dass die Daten für einen Teilnehmer mittels „**Carrier Aggregation**“ (**CA**) nicht nur in einem 5G-Frequenzband übertragen werden, sondern parallel in mehreren verschiedenen Bändern; dabei können die Duplexverfahren FDD und TDD auch gemischt sein.

Mittels **SD**L (S**upplement** D**ownlink** B**and**) stehen bei hohem Bandbreitenbedarf im Downlink zusätzliche Frequenzreserven zur Verfügunglich. Hier sind bestimmte Bänder ausschließlich für den Downlink reserviert, die bedarfsweise genutzt werden; z.B. der Bereich 1,5 GHz, der ursprünglich einmal für regionales und lokales Digitalradio DAB+ vorgesehen war.

Erst in ca. fünf bis sechs Jahren sollen auch die höheren Frequenzen im FR2 für 5G in großem Umfang genutzt werden. Hierfür sind noch internationale Abstimmungen zwischen den zuständigen Behörden erforderlich. In Deutschland können in einem ersten Schritt seit Januar 2021 Frequenzen für 5G im Bereich 24,25 - 27,5 GHz genutzt werden – diese Frequenzen werden aber nicht, wie beim öffentlichen Mobilfunk üblich, in einer Auktion versteigert, sondern müssen bei der Bundesnetzagentur beantragt werden und werden dann von ihr zugeteilt, so wie auch im Frequenzbereich 3,7 - 3,8 GHz.

Die 26-GHz-Frequenzen werden dementsprechend auch nicht öffentlich von den bekannten Mobilfunk-Providern genutzt, sondern stehen in erster Linie für Telekommunikationsdienste von Endkunden, für Campus-Netzwerke, Infrastrukturanbindungen, Industrie 4.0 und **I**nternet **o**f **T**hings (IoT) für die Industrie bereit. Aufgrund der hohen Frequenz ist die Reichweite beschränkt: Sie beträgt bei freier Sicht ca. 600 Meter und ohne Sichtverbindung 300 Meter.

Bei Frequenzen von 24 GHz und höher liegt die Wellenlänge bei 10 - 3 mm (Millimeterwellen). Diese sind kaum in der Lage, Gebäudewände zu durchdringen. Mobilfunkkritische Mediziner führen in’s Feld, dass bei diesen kurzen Wellenlängen relevante biologische Effekte in den obersten Hautschichten stattfinden, die durch das rein thermische Wirkmodell, das den Referenzwerten der ICNIRP[3] und somit den Grenzwerten der 26. BImSchV[4] zugrunde liegt, nicht abgedeckt sind.

Mit zunehmender Frequenz nimmt die Streckendämpfung der elektromagnetischen Welle ebenfalls zu und die Durchdringungsfähigkeit von Materie (z.B. Gebäudehüllen) verschlechtert sich erheblich.

[3] ICNIRP: **I**nternational **C**ommission on **N**on-**I**onizing **R**adiation **P**rotection, privater Verein mit Sitz in München

[4] 26. BImSchV: **26. V**erordnung zur Durchführung des **B**undes-**Im**missions**sch**utzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder)

Bei höheren Frequenzen sinkt demnach die überbrückbare Distanz, und die Zellradien werden kleiner. Damit rücken die Basisstationen näher an die Teilnehmer heran. Gleichzeitig steigt mit kleineren Zellen die verfügbare Kapazität in der Fläche. Für 5G werden bei Anwendungen des öffentlichen Mobilfunks Zellradien in der Größenordnung von 100 m oder gar nur 50 m diskutiert, d.h. alle 50 bis 100 m muss eine Basisstation installiert werden.

Gleiches gilt für das Ziel der kurzen Latenzzeiten. Elektromagnetische Wellen haben zwar eine sehr hohe, aber doch endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit von 300.000 km/s. Für kurze Latenzzeiten müssen demnach die Entfernungen klein sein.

Small Cells

Die o.g. Effekte führen dazu, dass mit 5G die Basisstationen neben den erhöhten Mast- und Dachstandorten in erheblichem Umfang als Small Cells in die Straßen und vor die Häuser wandern werden, so wie man es bisher beim Mobilfunk 2G bis 4G von Mikro- und Nanozellen her kennt (Abb. 6), die in Gebieten mit sehr hohem Kapazitätsbedarf aufgebaut werden, wie z.B. in Fußgängerzonen, Messehallen und Fußballstadien. Statt auf Gebäuden, Fabrikschornsteinen und eigens errichteten Masten werden viele 5G-Small Cells auf Laternenpfählen, Ampeln, Litfaßsäulen und ähnlichen Trägern bzw. „Stadtmöbeln[5]“ installiert. Besonders geeignet sind die Fernmelde-Multifunktionsgehäuse, die im Zuge der Umstellung des „Telefonnetzes“ auf IP/VDSL in großen Stückzahlen installiert wurden (Abb. 7) und die alten „Kabelverzweiger“ abgelöst haben. Sie sind bei den Netzbetreibern besonders beliebt, weil hier die gesamte Infrastruktur schon vorhanden ist, die man für eine Small Cell braucht: Sowohl die 230V-Energieversorgung als auch die Datenanbindung an das schnelle Glasfasernetz.

Die Umrüstung der alten, passiven Kabelverzweiger auf die neuen Multifunktionsgehäuse ist sehr anschaulich in zwei YouTube-Videos der Deutschen Telekom dargestellt ([15] und [16]) sowie in [17].

Abb. 6: Bereits seit Längerem übliche Mikrozelle der Telekom mit LTE-Mobilfunk (Hotspot) in einer Fußgängerzone

[5] *Der Begriff **Stadtmöbel** (auch **Straßenmöbel**) ist der Oberbegriff für jene Gegenstände im Außenbereich, des öffentlichen und privaten Stadtraums, auf Plätzen oder in Parkanlagen, die vergleichbar dem klassischen Mobiliar den Stadtraum möblieren und zweckgebunden sind. Ein Stadtmöbelstück bietet Funktionen, die im öffentlichen Raum benötigt werden (beispielsweise Abtrennungen), oder es ist ein Gegenstand, welcher der Information oder Werbung, dem Verweilen, Erholen oder Spielen dient.* (Quelle: Wikipedia)

Abb. 7: Multifunktionsgehäuse (Outdoorgehäuse) von Berthold Sichert aus Berlin-Marienfelde, fix und fertig vorbereitet für den Einbau von Small Cells [18]

Die Industrie hat das Marktpotential für Small Cells erkannt und bietet bereits viele „unauffällige“ bzw. „angepasste“ Lösungen hierfür an (siehe z.B. Abb. 8). Small Cells an Laternen- und sonstigen Masten sowie an Gebäudefassaden werden mit möglichst unauffälligen Verkleidungen ausgerüstet; ein Produktname hierfür lautet bezeichnenderweise „InvisiWave^{TM}“ [19]. Details sind ausführlich im Beitrag des Autors „5G Aus den Augen, aus dem Sinn – Stadtmöbel als Verstecke für Small Cells“ dargestellt [20].

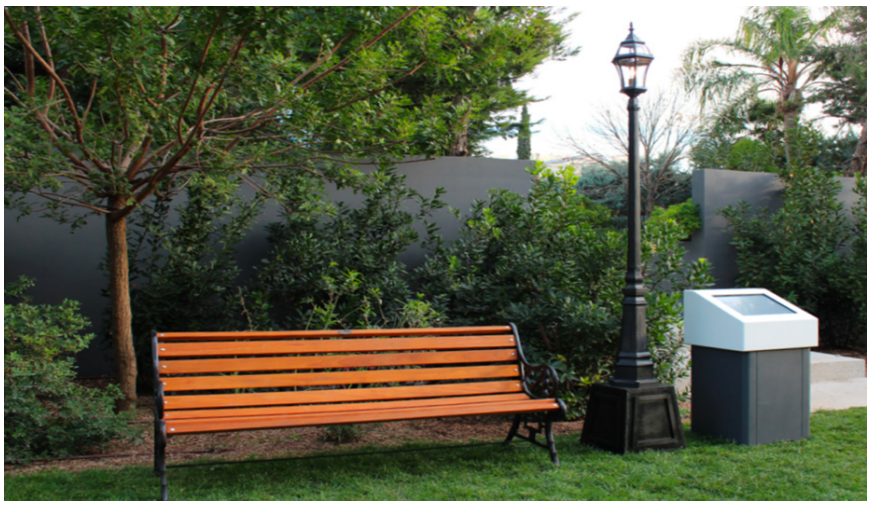

Abb. 8: Stadtmöbel mit getarnter Small Cell, geeignet für alle LTE/5G Frequenzbänder [19]

Insbesondere bei personennah und niedrig installierten Small Cells (z.B. in Multifunktionsgehäusen) ist oft nicht mehr gewährleistet, dass Passanten einen größeren Abstand einhalten; die Antennen können bei niedriger Montage fast an der Oberfläche berührt werden. Dies kann zu Problemen mit der Einhaltung der Grenzwerte gemäß 26. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) führen. In der Nähe von solchen Small Cells können – trotz einer Sendeleistung von weniger als 10 W, so dass keine Standortbescheinigung der Bundesnetzagentur erforderlich ist – sehr hohe Feldstärken auftreten, deutlich höher als bei den bisherigen Mast- und Dachstandorten mit ihren deutlich größeren Entfernungen. Bei Frequenzen über 2 GHz und einer Leistung von 10 W EIRP[6] wird der Grenzwert der 26. BImSchV von 61 V/m in 28 cm Entfernung von der Antenne erreicht.

[6] EIRP: **E**quivalent **I**sotropically **R**adiated **P**ower, Äquivalente isotrope Strahlungsleistung unter Berücksichtigung des Antennengewinns und somit des „Bündelungsfaktors“ der Antenne.

Ein weiterer Effekt von Small Cells: Bei Mast- und Dachstandorten sind die unteren Etagen und das Erdgeschoss eines Gebäudes deutlich weniger exponiert als die höheren Stockwerke. Bei den Small Cells in der Straße kehrt sich dieses Verhältnis um.

Seit dem Jahr 2021 kann man sich im Standortverzeichnis (EMF-Karte [21]) der Bundenetzagentur (BNetzA) auch Small Cells anzeigen lassen, deren Sendeleistung (EIRP) weniger als 10 W beträgt, die daher keine Genehmigung und Standortbescheinigung der BNetzA benötigen und dort nur gemeldet werden müssen.

5G-Frequenzauktion 2019

Im Frühjahr 2019 führte die Bundesnetzagentur eine Frequenzauktion durch, um den Mobilfunkbetreibern die für 5G erforderlichen Frequenzen zu verschaffen.

Zur Auktion zugelassen waren die Provider:

- Telekom Deutschland
- Vodafone
- Telefónica
- Drillisch Netz AG.

Während die drei erstgenannten in der Öffentlichkeit bekannt sind und bereits seit Langem 2G- bis 4G-Mobilfunknetze betreiben, ist der Name „Drillisch“ kaum geläufig – im Gegensatz zur zusätzlichen Bezeichnung „1&1“ im Firmennamen (Abb. 9).

Abb. 9: Unternehmen (links) und Marken (rechts) der 1&1 Drillisch AG [22]

Zur Versteigerung standen die folgenden Frequenzbereiche:

- Acht je 5 MHz breite Frequenzblöcke im UMTS-Bereich oberhalb von 2 GHz. Hier sind die entsprechenden bisherigen UMTS-Nutzungen im Jahr 2020 ausgelaufen.
- Neue Frequenzen im Bereich 3,4 - 3,7 GHz. Hiervon haben Telekom und Vodafone je 90 MHz ersteigert, Telefónica 70 MHz und Drillisch 50 MHz. Wie erwartet wird der „Newcomer“ Drillisch, der bisher über keinerlei Mobilfunk-Infrastruktur verfügt, auf absehbare Zeit kein flächendeckendes eigenes 5G-Netz aufbauen. Vielmehr wird Drillisch zunächst das Telefónica-Netz mitbenutzen. Im Mai 2021 wurde ein entsprechendes **N**ationales **R**oaming **A**bkommen (NRA) zwischen den beiden Providern abgeschlossen [23].

Eine graphische Übersicht über alle Frequenzen des öffentlichen Mobilfunks, mit Zuordnung zu den Betreibern und Angabe, wann die Nutzungszeit für den jeweiligen Betreiber ausläuft, wird von der Bundesnetzagentur unter dem Titel „Drahtloser Netzzugang in den Bereichen von 700 MHz bis 3,8 GHz“ herausgegeben (Abb. 10, [24]).

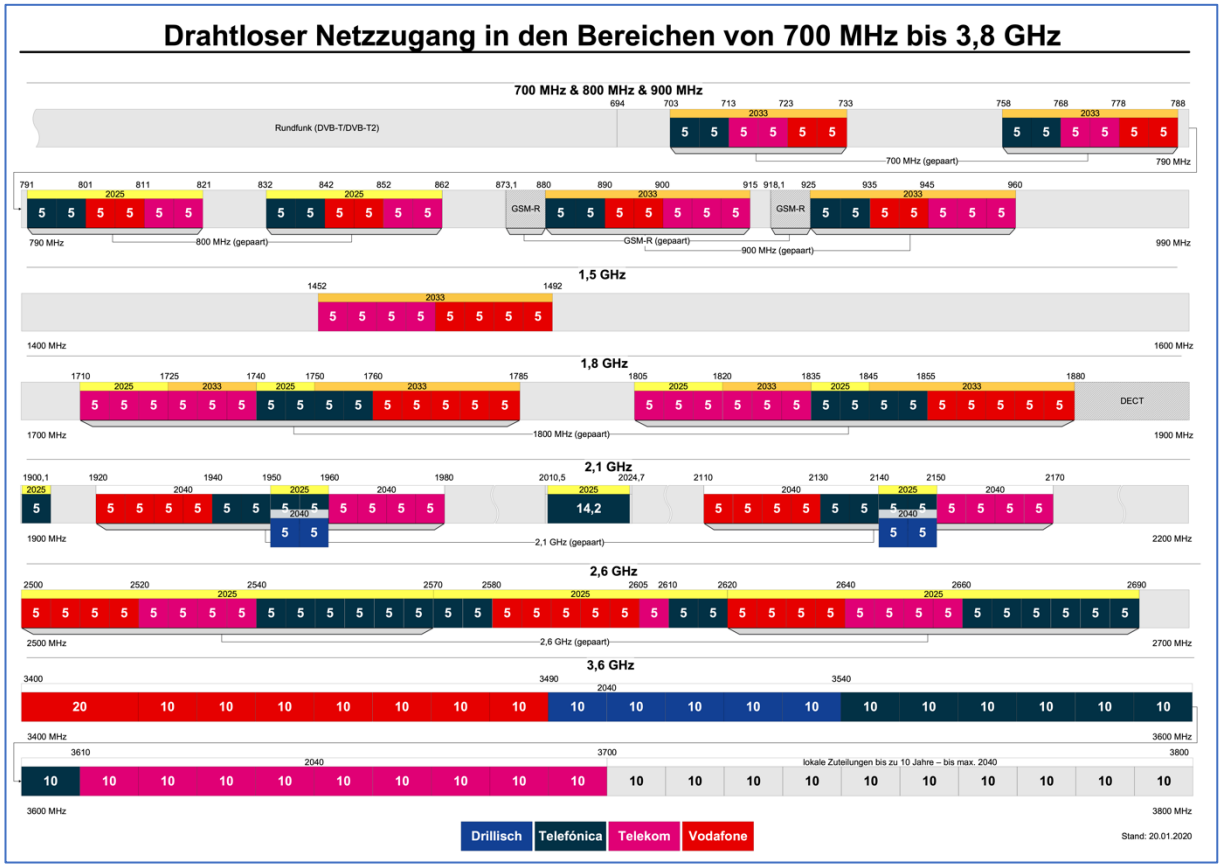

Abb. 10: Frequenzübersicht „Drahtloser Netzzugang in den Bereichen von 700 MHz bis 3,8 GHz“; Bundesnetzagentur [24]

Zusätzlich zur Auktion für die bundesweit operierenden Mobilfunkbetreiber ist für den Frequenzbereich 3,7 - 3,8 GHz ein Antragsverfahren zur lokalen und regionalen Nutzung entwickelt worden. *„Dadurch können auch regionale Netzbetreiber, kleine und mittlere Unternehmen oder Start-Ups, mit einem erst künftig auftretenden Frequenzbedarf, sowie Gemeinden und Vertreter der Land- und Forstwirtschaft das Potenzial der kommenden Mobilfunkgeneration 5G für Anwendungen in der Wirtschaft und Industrie nutzen bzw. die Mobilfunkversorgung im ländlichen Raum verbessern.“* [8]

Die Grundlagen von 5G-Wireless-Netzwerken

Die Grundlagen von 5G-Wireless-Netzwerken sind in dem Beitrag [25] sehr übersichtlich und verständlich dargestellt. Die wesentlichen Punkte sind hier auszugsweise zitiert und nehmen auch Bezug auf die obigen Abbildungen 4 und 5.

„Man erwartet, dass 5G-Mobilfunk, basierend auf drahtlosen LTE-Services (Long Term Evolution) der vierten Generation (4G), ein größeres Datenvolumen über deutlich schnellere Netzwerke mit einer Latenz im Bereich von unter einer Millisekunde überträgt. Mobilfunknetze können bei 4G Daten mit einer Spitzengeschwindigkeit von bis zu 1 GBit/s transportieren. In 5G-Wireless-Netzwerken wird jedoch die Performance drastisch steigen, so dass Daten mit nicht weniger als 10 GBit/s befördert werden – das entspricht einem Tempo wie bei drahtgebundener Kommunikation.

Die Reduzierung von Netzwerkantwortzeiten bringt derweil weitere bedeutende Fortschritte. Als Ergebnis birgt die 5G-Architektur ein beträchtliches Potenzial für neue Technologien – zum Beispiel Remote-Online-Chirurgie –, die Machine Learning und künstliche Intelligenz, virtuelle und erweiterte Realität sowie das Internet der Dinge umfassen.

Typen von 5G Wireless Services

Während das kommerzielle Deployment von 5G-Wireless-Netzwerken näher rückt, bereiten sich die Mobilfunkbetreiber auf das Rollout von zwei Grundtypen neuer 5G-Services vor. Da ist zum einen Fixed Wireless Broadband .... Der zweite Typ ist Mobile 5G Cellular, in einigen Märkten wahrscheinlich ebenfalls ab 2019 verfügbar, wobei die Technologie, die sowohl für mobile Anwender im Allgemeinen wie für Mobilfunknutzer im Besonderen geeignet ist, ab 2020 generell erhältlich sein dürfte. Analysten gehen davon aus, dass die Betreiber bis 2025 über eine vollständige 5G-Wireless-Bereitstellung verfügen werden. ...

Im Folgenden erfahren Sie, wie die zwei Typen von 5G-Wireless-Diensten funktionieren.

Fixed Wireless Broadband 5G. *Diese Services (auch kurz* Fixed Wireless *genannt) sollen für Unternehmen oder Privathaushalte die Internetkonnektivität auf der letzten Meile mit Funksignalen statt einer drahtgebundenen Anbindung direkt vor Ort ermöglichen. Um Fixed Wireless Broadband anzubieten, stellen die Carrier sogenannte 5G New Radios in kleinen Funkzellenstandorten bereit, etwa auf der Straßenbeleuchtung und Telefonmasten. So gelangen die Signale zu drahtlosen Modems, die in Gebäuden und Wohnungen installiert sind. Dadurch entfällt die Notwendigkeit von festen Anbindungen, etwa per Glasfaser oder Kabel, direkt in ein Gebäude.*

5G Mobile Services. *Die Betreiber planen zudem mobile 5G-Funkservices, die durch die nächste Entwicklungsstufe von Evolved Packet Core LTE-Advanced ermöglicht werden. ...*

5G Wireless im Unternehmen

Die Aussicht auf 5G-Funktechnologie für Unternehmen bleibt erst einmal ein Versprechen – bis ... die Betreiber das Rollout von 5G-Wireless-Netzwerken beendet haben. Sobald 5G-Funkeinheiten installiert und 5G-fähige intelligente Geräte verfügbar sind, steht zu erwarten, dass Unternehmen mehr Anwendungsfälle für 5G-Services entwickeln.

Chris Antlitz, leitender Analyst für den Telekommunikationsmarkt bei Technology Business Research Inc. in Hampton, New Hampshire, erwartet, dass große Fortune-2000-Unternehmen unter den ersten sein werden, die ab 2020 mit dem Rollout von 5G-Services beginnen. Eine stärkere Verbreitung im Unternehmensbereich werde erst später stattfinden – zwischen 2025 und 2030.

Um für den Rollout von 5G-Wireless-Netzwerken gewappnet zu sein, beginnen in einigen Unternehmen Mitglieder der Geschäftsleitung und andere IT-Manager damit, sich um potenzielle Anwendungen zu kümmern, die einen Vorteil aus der hohen Performance und geringen Latenz von 5G ziehen.

Wer wird von 5G profitieren?

Nach Angaben von MarketsandMarkets verspricht der Markt für 5G-Infrastruktur ein erhebliches Wachstumspotenzial von 2,9 Milliarden US-Dollar im Jahre 2020 auf 34 Milliarden US-Dollar bis 2026.

Gründe sind die Nachfrage nach mobilen Datendiensten, die Zunahmen der industriellen Automatisierung und die steigende Nutzung von Software in Kommunikationsnetzwerken.

Für Branchen, bei denen es auf eine geringe Latenz und einen hohen Durchsatz ankommt – zum Beispiel das Gesundheitswesen, Finanzdienstleister, Energieversorger und andere Unternehmen mit Außendiensteinsatz –, dürften 5G-Wireless-Netzwerke beträchtliche Auswirkungen haben. Firmen mit speziellen Kommunikationsanforderungen und Herstellungsprozessen werden wohl als erste von den Vorteilen profitieren.

Techniker in einem 5G-Entwicklungscenter in Oulu, Finnland ... entwickeln beispielsweise 5G-Anwendungsfälle. Forscher arbeiten an Kommunikationsideen wie Rundfunk über 5G und entwickeln Anwendungen für das Gesundheitswesen, etwa Reha-Maßnahmen für Schlaganfallpatienten per virtueller Realität." [25]

Smarte Antennen / Massive MIMO / Aktives Beamforming

Eine wesentliche technische Neuerung bei 5G ist die Möglichkeit der Verwendung von „Smarten Antennen“ (Abb. 11). Während herkömmliche Mobilfunkantennen im Wesentlichen aus „mechanischer Hardware“ bestehen, kommen bei den „Smarten Antennen“ noch elektronische Komponenten und Software hinzu. Dadurch können sie nicht nur – wie bisher – in eine einmal eingestellte Vorzugsrichtung senden, sondern die Hauptstrahlrichtung den aktuellen Gegebenheiten der lokalen Nutzung des Netzes dynamisch anpassen. Wenn sich ein Smartphone-Nutzer im Einwirkungsbereich einer „Smarten Antenne“ fortbewegt, so folgt ihm der Hauptstrahl durch Veränderung der Antennen-Richtcharakteristik. Diese Eigenschaft wird auch als „Aktives Beamforming“ bezeichnet.

Technisch gelöst wird Beamforming durch Verwendung einer Vielzahl von über- und nebeneinander angeordneten kleinen Einzelantennen, so genannten „Arrays“; typisch für 5G ist z.B. eine Anzahl von 8 x 8 = 64 Einzelantennen (Abb. 12). Diese Einzelantennen arbeiten aber nicht unabhängig voneinander, sondern wirken zusammen wie eine einzige Gesamt-Antenne.

Abb. 11:
5G NR-Antenne 3,6 GHz mit Massive MIMO/Beamforming oben (mit Kreismarkierung); darunter zwei konventionelle Sektorantennen 2G - 4G, die aber auch für 5G verwendet werden können – allerdings ohne Beamforming.

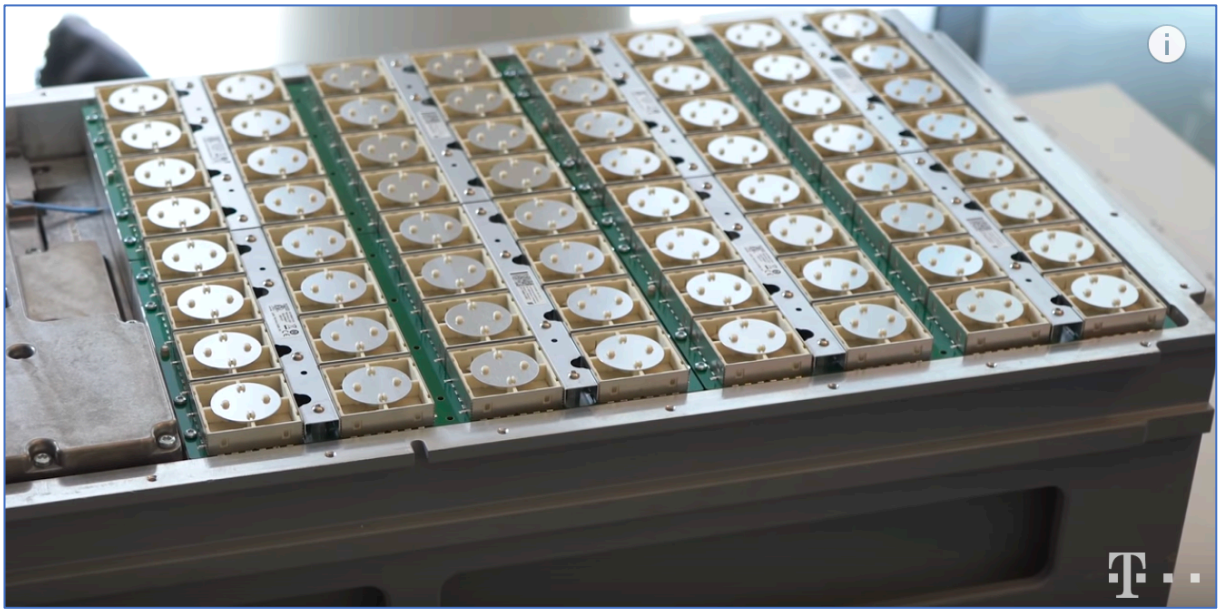

Abb. 12: „Smarte Antenne“ mit aktivem Beamforming, Gehäusedeckel entfernt, so dass das 8 x 8 Array mit 64-MIMO sichtbar ist [26]; Antenne gegenüber Abb. 10 um 90° gedreht.

Durch individuell phasenverschobene Ansteuerung der Einzelantennen mit dem Sendesignal kann die Richtcharakteristik der insgesamt abgestrahlten Welle gesteuert werden, die durch Überlagerung der einzelnen Wellen zu einer gemeinsamen Wellenfront entsteht. Dieses Verfahren wird als „massive MIMO“ (**massive M**ultiple **I**nput – **M**ultiple **O**utput, mMIMO) bezeichnet und in dieser Form bei 5 G erstmalig in der Breite angewendet.

Eine anschauliche Computer-Animation der phasenverschobenen Wellen zur Steuerung der Richtcharakteristik und einen Einblick in eine geöffnete 5G-Antenne mit 64-MIMO zeigt ein YouTube-Video der Telekom „Eine Frage: Was ist eine 5G-Antenne?“ [26].

Antennen mit aktivem Beamforming „leuchten“ einen Raumbereich (Sektor) nicht – wie bei konventionellen Sektorantennen üblich – zeitunabhängig mit der stets gleichen räumlichen Verteilung aus, sondern der Hauptstrahl („Beam“) wird aktuell auf den Nutzer bzw. eine räumlich zusammenhängende Nutzergruppe fokussiert und folgt seiner Bewegung in der Fläche. Außerdem können solche Antennen nicht nur einen, sondern gleichzeitig mehrere dynamische Hauptstrahlen fokussieren, so dass auf der gleichen Frequenz mehrere Teilnehmer, die sich an unterschiedlichen Stellen im Raum befinden, versorgt werden können (Zugriffsverfahren SDMA – **S**pace **D**ivision **M**ultiple **A**ccess / Vielfachzugriff durch räumliche Aufteilung). Hierdurch wird auch die Kapazität einer Mobilfunkzelle deutlich erhöht.

Die nutzlastunabhängigen Synchronisierungs-Signale werden gemeinsam in einem so genannten Synchronization Signal Block (SSB) übertragen, der in einem eigenen, nicht so stark fokussierten Beam zyklisch in mehreren äquidistanten Stufen (im Frequenzbereich von 3 GHz bis 8 GHz typischerweise acht) über den gesamten Sektorbereich schwenkt. Abb. 13 zeigt exemplarisch die Empfangsfeldstärke an einem Messpunkt in Abhängigkeit von der Richtung des SSB Beams. Das Mobilteil ermittelt die Richtung mit der höchsten Empfangsfeldstärke und synchronisiert sich auf diesem SSB Beam bei der Basisstation auf.

Die SSB-Wiederholfrequenz beträgt typischerweise 50 Hz; dies ist daher die dominante 5G-Pulsfrequenz, die sich auch in dem „Geräusch“ von 5G-Basisstationen niederschlägt, wenn man ein Breitband-Messgerät mit akustischer Kontrolle einsetzt (Beispiele siehe [27]).

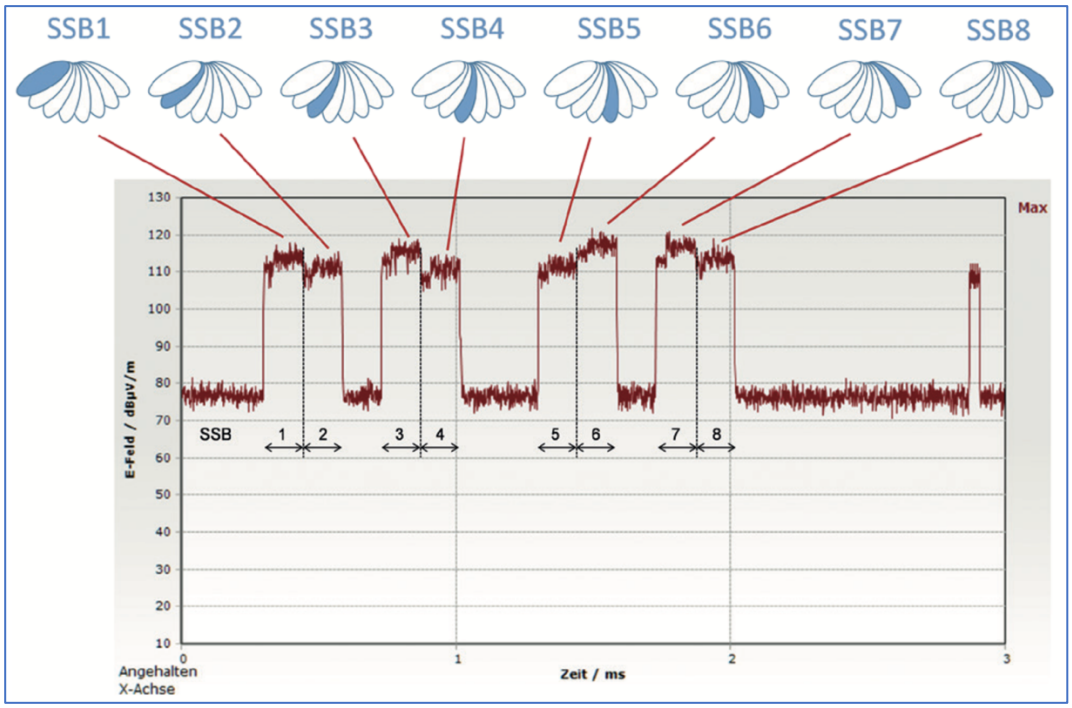

Abb. 13: Exemplarische Zeitbereichsmessung eines aus acht SSB bestehenden SSB-Bursts; die Intensitäten am Empfangsort variieren mit der Richtung des SSB Beams [28]

Der lastabhängige Traffic (Nutzerdaten) wird nach erfolgter Aufsynchronisation des Mobilteils in einem eigenen, wesentlich stärker fokussierten, dynamischen Beam mit hoher Geschwindigkeit in kurzer Zeit übertragen. Dieser Traffic beam folgt eventuellen Bewegungen des Nutzers in der Zelle. Ist die aktuelle Datenübertragung beendet, so wird der Traffic Beam auf einen anderen Nutzer gerichtet oder – im Leerlauf der Basisstation, wenn sie ohne Verkehrslast ist – abgeschaltet. Dann ist nur noch der SSB-Beam aktiv; dies stellt den Zustand der Minimal-Immission dar. Die lokale Strahlungsdichte des Traffic Beams hängt u.a. von der Lage des Immissionspunkts in Relation zum Antennenstandort ab und kann

im vollen Focus laut Literatur bis zu 10 dB (d.h. Faktor 10) und mehr höher sein als die des SSB-Beams [28]. Befinden sich mehrere Nutzer in einer Zelle, so wird die zur Verfügung stehende Sendeleistung auf mehrere, entsprechend ausgerichtete Traffic Beams aufgeteilt. Die höchsten Immissionen sind demnach zu verzeichnen, wenn nur ein einziger 5G-Nutzer in der Zelle aktiv ist.

Alle diese Faktoren zusammen genommen führen dazu, dass die Strahlungsdichte an einem Punkt zwischen dem Minimum (nur SSB, keine Verkehrslast) und Maximum (volle Verkehrslast, im Focus des Traffic Beams) eine riesige Spannweite vom Faktor 200 und mehr aufweisen kann. Bei Mobilfunksystemen 2G bis 4G handelt es sich lediglich um den Faktor vier bis sechs. Bei der Abstrahlung von 5G-Signalen über klassische Sektorantennen ohne Beamforming kann der Faktor zwischen Minimum und Maximum immerhin noch bei 20 und mehr liegen.

Weitere Informationen zur Mobilfunk-Antennentechnik im Allgemeinen und zum aktiven Beamforming im Speziellen sind in dem Beitrag „ ‚Smarte' Antennen bei 5G – Massive MIMO und aktives Beamforming" [29] zu finden.

Aufgrund ihrer Neuartigkeit in der Breitenanwendung fehlen noch Erfahrungen mit dieser Technik, und es ist unklar, ob es nicht vielleicht doch zu Raumbereichen mit überhöhten Feldstärken kommen kann. Ebenso gibt es noch keine klar definierten Messvorschriften für die Messung der Immissionen bei aktivem Beamforming, die nun räumlich nicht mehr konstant, sondern in Abhängigkeit von der Bewegung der gerade aktiven Mobilfunk-Teilnehmer variabel sind, darüber hinaus aufgrund der extrem schnellen Datenübertragung aber auch an einem Ort nur sehr kurz. Hieraus ergeben sich natürlich auch neue, bisher unbekannte Herausforderungen für die reproduzierbare Messung der Immissionen. Lösungen hierfür sind noch in der Entwicklung.

Denn während bei GSM, UMTS und LTE mit den klassischen Sektorantennen die Hochrechnung von den permanent aktiven Steuer- und Pilotkanälen, die die Mindest-Immission verursachen, auf maximale Anlagenauslastung (Maximal-Immission) problemlos möglich ist, stellt 5G mit aktivem Beamforming die Messtechnik vor ein neues, nur kompliziert und aufwändig zu lösendes Problem.

Die höchsten Immissionen treten auf, wenn in der betreffenden Zelle nur ein einziger Teilnehmer aktiv ist und dementsprechend nur ein einziger Traffic Beam mit maximaler Sendeleistung ausgebildet wird. Im Normalbetrieb kann die Basisstation aber nicht „gezwungen" werden, dies genau für den Punkt zu tun, an dem gemessen werden soll.

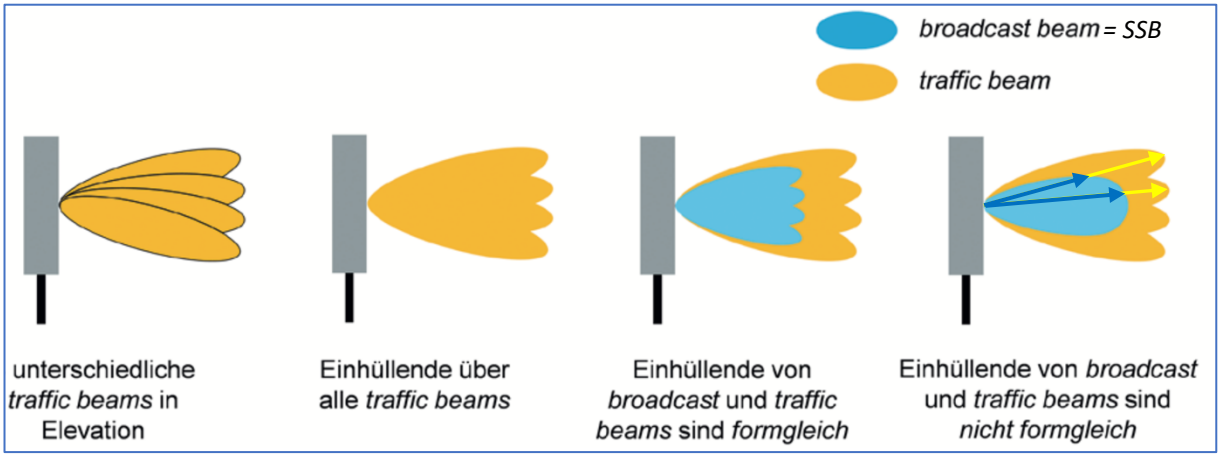

Abb. 14: Formgleichheit bzw. Nicht-Formgleichheit der Einhüllenden von Broadcast Beams (= SSB Beams) und Traffic Beams; bei Nicht-Formgleichheit ist das Verhältnis von SSB zu Traffic Beam nicht konstant, sondern richtungsabhängig (vgl. die Längen der Pfeile im Bild ganz rechts) [28]

Ein weiteres gravierendes Problem besteht darin, dass Einhüllenden von SSB Beam und Traffic Beam i.d.R. nicht formgleich sind. Damit ist das Verhältnis der Intensitäten von SSB Beam (der für die Mindest-immission verantwortlich ist) und Traffic Beam (der das Immissions-Maximum bei Volllast

bestimmt) nicht konstant, sondern richtungsabhängig (s. Abb. 14). Will man von der Messung der Minimal-Immission durch den SSB Beam auf die Maximal-immission des Traffic Beams hochrechnen, so muss der richtungsabhängige Unterschied in den Einhüllenden der beiden Beams berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass der horizontale und der vertikale Winkel vom Messpunkt zur Antennenmitte mit einem geeigneten optischen Messinstrument ermittelt werden müssen, die vom jeweiligen Antennentyp abhängigen Einhüllenden von SSB Beam und Traffic Beam bekannt sein müssen und außerdem die Ausrichtung der 5G-Antenne im Raum. Während der Messende die beiden Winkel zur Antenne mit einem entsprechenden Messgerät – das sich aber bisher kaum in der typischen Hochfrequenz-Messausrüstung befindet – noch selbst bestimmen kann, ist er für die Angaben zu den Antennen-Richtcharakteristiken und der Antennenausrichtung auf die Informationen des Netzbetreibers angewiesen.

Zur vertieften Behandlung des Themas „5G Messtechnik“ sei auf [28] verwiesen sowie auf die Beiträge des Autors „5G Immissionsmessungen mit Breitbandmessgeräten der baubiologischen Messtechnik“ [30] und auf die allgemeinen technischen und messtechnischen Aspekte, die im Entwurf der neuen VDB-Richtlinie „5G NR“ [31] dargestellt sind.

Ein Vorschlag zur Hochrechnung von der Messung des SSB Beams auf maximale Intensität im Traffic Beam unter Berücksichtigung der Winkelabhängigkeit zur 5G-Antenne ist in dem durchaus komplexen Papier des Schweizer METAS (Eidgenössisches Institut für Metrologie) „Technischer Bericht: Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz“ zu finden [32]; zusätzliche Erläuterungen hierzu hat das Schweizer **B**undes**a**mt **f**ür **U**mwelt BAFU in [33] herausgegeben.

Bisher ungekannte Variabilität und Flexibilität von 5G NR-Basisstationen

Der 5G NR-Standard eröffnet eine bisher bei Mobilfunksystemen noch nie dagewesene Variabilität und Flexibilität der Einsatzmöglichkeiten durch eine Fülle von technischen Parametern, die das Verständnis der Funktionsweise nicht gerade erleichtern:

- Standalone-/Non-Standalone-Konfiguration: Gerade zu Beginn des Roll Outs wird 5G NR häufig mit bereits vorhandenen LTE-Basisstationen kombiniert. Bei dieser Non-Standalone-Lösung werden über die 5G-Basisstation nur Verkehrsdaten der Nutzer (Traffic) übertragen; von der LTE-Station als „Master“ werden dagegen Nutzerdaten und Kontrollsignale übertragen; dabei ist der „Master“ mit dem übergeordneten LTE Core Netzwerk verbunden. Bei der Standalone-Lösung arbeitet die 5G NR-Basisstation für sich alleine und ist mit dem 5G Core Netzwerk verbunden.
- Variable Datenraten durch schnellere oder langsamere Datenübertragung, an die Möglichkeiten des 5G-Endgerätes angepasst,
- Variable Bandbreiten, an die Möglichkeiten des 5G-Endgerätes angepasst. D.h. die Signalbandbreite ist nicht mehr fix wie bei 2G - 4 G, sondern kann sehr unterschiedlich sein: Von wenigen Megahertz bis zur vollen Signalbandbreite von 50, 70 oder 90 MHz,
- Bandbreiten-Mix für unterschiedliche 5G-Endgeräte ist möglich (Bandbreiten-Partitionierung BWP),
- Bei Frequenzen unter 2,6 GHz mit konventionellen Sektorantennen ohne Massive MIMO: 5G NR kann im selben Frequenzkanal zeitgleich gemischt mit LTE gesendet werden (DSS – **D**ynamic **S**pectrum **S**haring); nähere Ausführungen hierzu siehe oben im Abschnitt „Zielerreichung mit neuen und alten Frequenzen“,
- „Carrier Aggregation“ bei hohem Bandbreitenbedarf ist möglich; nähere Ausführungen hierzu siehe oben im Abschnitt „Zielerreichung mit neuen und alten Frequenzen“,
- SDL (**S**upplement **D**own**l**ink Band) bei hohem Bandbreitenbedarf im Downlink ist möglich; nähere Ausführungen hierzu siehe oben im Abschnitt „Zielerreichung mit neuen und alten Frequenzen“.

Hinsichtlich der sonst unterschiedlichen Signalcharakteristiken bei den Duplexverfahren FDD (muss nicht gepulst sein, kann aber) und TDD (muss immer gepulst sein) ergibt sich bei 5G NR folgendes „Kuriosum“:

Was die „Deutlichkeit“ der Pulsung durch Steuerkanäle der Basisstation angeht (PSS, SSS, PBCH), so verhält sich 5G NR genauso wie LTE, mit dem es ja nahe verwandt ist: Im Leerlauf (ohne Last) tritt die Pulsung durch die Steuerkanäle glasklar hervor. Mit zunehmender Last werden die Zeitlücken zwischen den Steuerkanälen mit Traffic gefüllt, bis quasi keine Pulsung mehr zu erkennen ist.

Unterschied zwischen 5G NR und LTE:

- Bei LTE werden in kurzen Abständen (wesentlich kürzer als die Abstände zwischen PSS, SSS und PBCH) regelmäßig und über die gesamte Signalbandbreite zusätzlich die RS-Steuersignale gesendet, die es bei 5G NR so nicht gibt. Deswegen kann man nur bei LTE mittels Spektrumanalyse auch im Leerlauf sehen, wie breit das Signalspektrum ist; bei 5G NR kann man das nicht. Im Leerlauf sieht man bei 5G NR nur die Breite des SSB (der aus einem Block von PSS, SSS und PBCH besteht). Die volle Signalbandbreite wird nur durch komplettes Auffüllen mit Traffic sichtbar.
- Aus diesen Eigenschaften folgt, dass es bei 5G NR bezüglich des Pulscharakters völlig egal ist, ob die Anlage mit TDD oder FDD arbeitet, wenn sie sich im Leerlauf befindet oder nur mit geringer Last arbeitet; das Pulsmuster durch die SSBs sieht dann bei TDD und FDD genau gleich aus. Und diese Pulsung hat bei TDD überhaupt nichts mit TDD zu tun, da sie bei FDD genauso auftritt. Erst wenn die Anlage hoch ausgelastet ist und auch die Zeiten zwischen den SSBs mit Traffic gefüllt sind, dann sieht man einen Unterschied zwischen FDD und TDD. Denn bei FDD läuft der Traffic kontinuierlich durch, bei TDD wird er im 50Hz-Rhythmus periodisch unterbrochen. Dann ist der Traffic durch TDD mit 50 Hz gepulst, genauso wie die SSBs.

Für eine tiefer gehende Betrachtung sei auf [31] verwiesen.

5G NR-Spektren und Zeitverläufe

Aufgrund der hohen Variabilität der technischen Parameter bei 5G NR kann die Belegung des Spektrums in einem Kanal und damit das Erscheinungsbild bei der Spektrumanalyse sehr unterschiedlich ausfallen. Dies gilt sowohl für Anlagen mit aktivem Beamforming als auch für solche ohne.

Die folgenden Beispiele, die an derselben Basisstation zu unterschiedlichen Zeiten gemessen wurden, machen dies anschaulich deutlich (Abb. 15 - 19). Es handelt sich um eine Telekom-Basisstation im 90 MHz breiten Kanal 3,61 - 3,70 GHz; die Kanalmitte liegt bei 3,655 GHz.

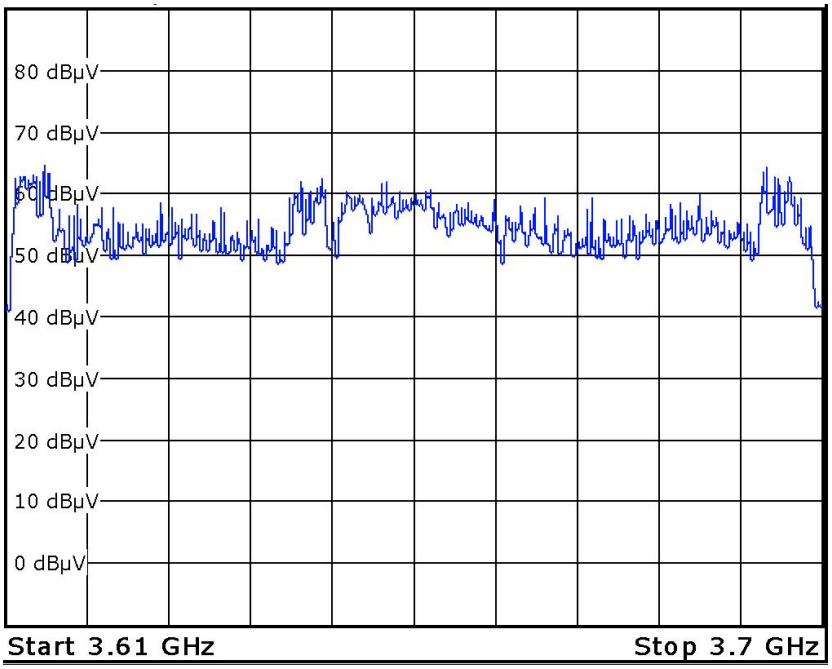

Abb. 15: Die Kanalbandbreite von 90 MHz kann vom Signal maximal zu 95 % ausgeschöpft werden (85,5 MHz), wie es hier der Fall ist

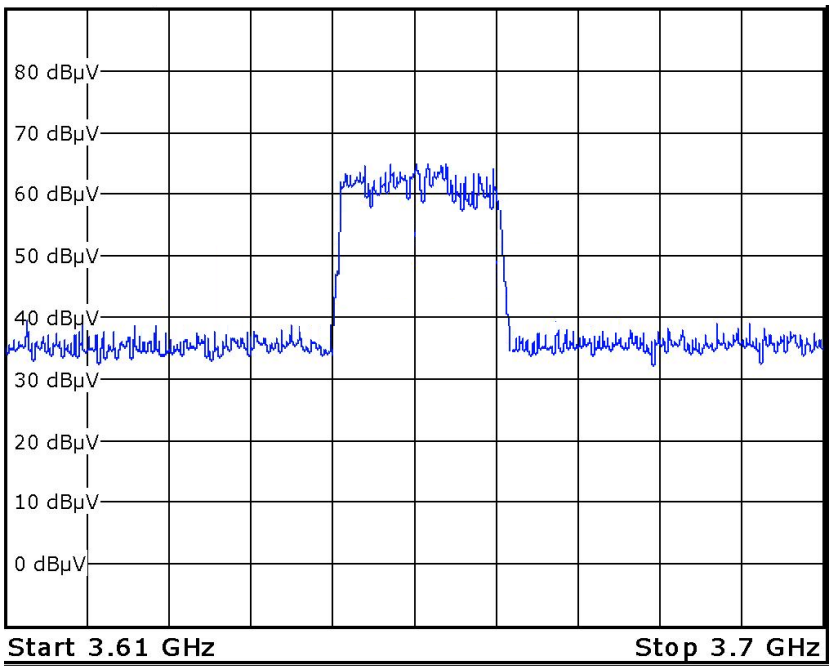

Abb. 16: Zu diesem Zeitpunkt sind nur Endgeräte aktiv, die keine sehr hohen Anforderungen an Übertragungskapazität und Bandbreite haben; die Basisstation passt sich automatisch dem Bandbreitebedarf der Endgeräte an (hier ca. 19 MHz).

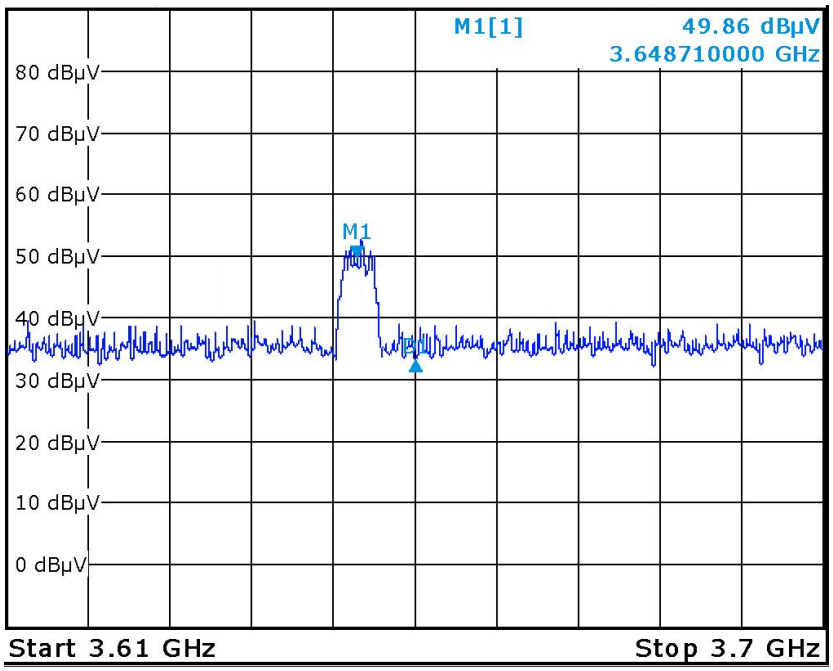

Abb. 17: Hier sind nur die permanent im 50Hz-Rhythmus ausgesendeten, verkehrslastunabhängigen Synchronisierungs-Signale (**P**rimary **S**ynchronization **S**ignal PSS und **S**econdary **S**ynchronization **S**ignal SSS) sowie der **P**hysical **B**roadcast **Ch**annel PBCH aktiv, die gemeinsam im SSB (**S**ynchronization **S**ignal **B**lock) gesendet werden und die Grundlast ausmachen, wenn über die Basisstation keine Verkehrslast (Traffic) läuft und die Anlage sich sozusagen im Leerlauf befindet.

Der SSB liegt typischerweise nicht in der Kanalmitte, sondern abseits davon. In diesem Beispiel liegt die Kanalmitte bei 3,655 GHz, die Mitte des SSB dagegen bei 3,64871 GHz; der Frequenz-Offset beträgt also knapp 6,3 MHz.

Bei einem 90 MHz breiten Kanal ist der SSB 7,2 MHz breit, belegt also nur 8,4 % der Gesamtbandbreite des Signals oder anders ausgedrückt: Die maximale Signalbandbreite beträgt knapp das 12-fache der SSB-Breite.

Berücksichtigt man nun noch, dass

- der SSB nur in einer Polarisationsebene abgestrahlt wird, der Traffic aber in zwei orthogonalen Ebenen, so dass die für den SSB gemessene Strahlungsdichte verdoppelt werden muss (+ 3 dB) und
- der Pegel der Verkehrslast bei aktivem Beamforming im Hauptstrahl des Traffic-Beams bis zum 10-fachen (+10 dB) des SSB-Pegels ausmachen kann,

so ergibt sich bei Anlagen mit aktivem Beamforming ein Unterschied der Strahlungsdichte zwischen Leerlauf (nur SSB, kein Traffic) und Volllast (maximale Bandbreite, maximaler Pegel des Traffic) an einem Messpunkt um den Faktor 240 ($12 \cdot 2 \cdot 10 = 240$)! Bei Basisstationen ohne aktives Beamforming liegt der Faktor immer noch bei 24. Auch dies ist sehr hoch im Vergleich zum Faktor von typischerweise 4 (GSM, LTE) bzw. 6 (UMTS) bei den Mobilfunksystemen 2G - 4G.

In Abb. 18 sind die SSB-Signale bei aktivem Beamforming zu erkennen sowie links und rechts davon Traffic, dessen Pegel bis zu 10 dB und mehr höher sein kann als der Pegel der SSB; dies erschwert die Messungen ungemein, da die SSB-Signale dann leicht im Traffic untergehen.

In Abb. 19 deutlich erkennbar ist die regelmäßige Pulsstruktur alle 20 ms, was einer Pulswiederholfrequenz von 50 Hz entspricht.

Die 50 Hz sind auch deutlich zu hören, wenn man das 5G NR-Signal einer akustischen Analyse mit einem in der baubiologischen Messtechnik gebräuchlichen Breitband-Messgerät unterzieht. Einige Geräuschbeispiele hierfür können unter [27] angehört werden.

Ausführliche Informationen zur Breitbandmesstechnik von 5G NR-Signalen sind unter [30] zu finden, tiefer gehende Informationen zur Technik von 5G NR und zur Messtechnik mittels Spektrumanalyse unter [31].

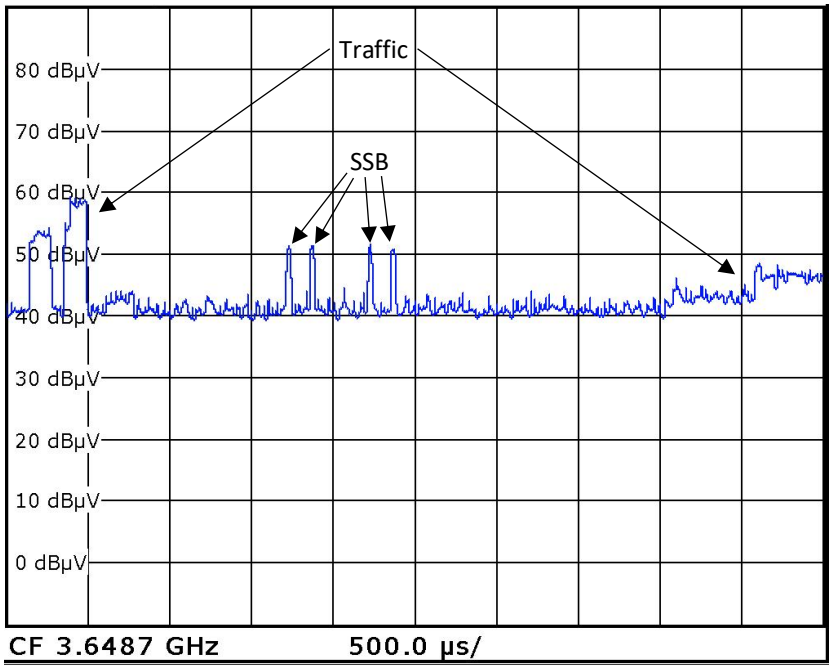

Abb. 18: Zeitverlauf des 5G NR-Signals bei Abstimmung des Analysators auf die Mitte des SSB (**C**enter **F**requenz CF 3,6487 GHz, vgl. Abb. 17), mit Zeitskala 5 ms bzw. 500 µs pro Teilung.

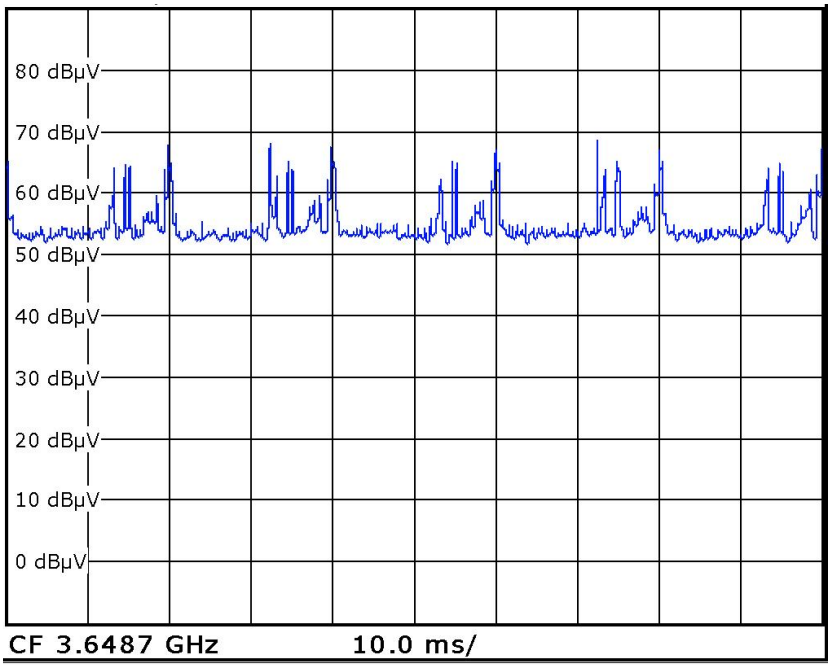

Abb. 19: Zeitverlauf des 5G NR-Signals bei gröberer zeitlicher Auflösung: Zeitskala 100 ms bzw. 10 ms pro Teilung.

5G per Satellit

Im Internet kursieren etliche Informationen, dass parallel zu den terrestrischen 5G-Systemen zurzeit eine zusätzliche flächendeckende 5G-Versorgung über mehrere zehntausend Satelliten hergestellt wird, so dass die Lebewesen auf der Erdoberfläche von diesen Satelliten in naher Zukunft „gegrillt" werden. Besonders in den Schlagzeilen steht dabei das Satellitensystem „Starlink" des Tesla-Chefs und Multi-Unternehmers Elon Musk, der auch Betreiber des erfolgreichsten kommerziellen Unternehmens für Raketenstarts „SpaceX" ist.

Dabei gibt es – international und im globalen Ausmaß – bereits seit etlichen Jahren oder gar seit Jahrzehnten über 30 Anbieter von Telekommunikationsdiensten per Satellit, wie z.B. Inmarsat, Iridium, Thuraya, sky DSL und STARDSL.

Für die Nutzung von Satellitensystemen werden spezielle, für das jeweilige System entwickelte Telefone oder Terminals benötigt. Ursprünglich waren hierfür Endgeräte mit recht großen Antennen erforderlich. Viele Satelliten-Telefone sind aber mittlerweile kaum noch größer als die üblichen terrestrischen Smartphones für 2G - 5G Mobilfunk, haben jedoch häufig etwas größere und auffälligere Antennen. Für sie gelten die gleichen **S**pezifischen **A**bsorptions**R**aten (SAR), die es einzuhalten gilt, wie für die terrestrischen Mobilfunk-Smartphones. Aufgrund der großen Entfernung und der hohen atmosphärischen Streckendämpfung bei den verwendeten Frequenzen über 10 GHz ist die Empfangs-Feldstärke an der Erdoberfläche sehr niedrig, dementsprechend ist der Betrieb nur im Freien möglich und ohne Außenantenne nicht innerhalb von Gebäuden (ähnlich wie beim Empfang von Fernseh-Satelliten).

Wie in dem Beitrag der 10. EMV-Tagung des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB „Mobilfunk per Satellit: Wunsch und Wirklichkeit" [34] gezeigt wird, liegen die von Kommunikationssatelliten verursachten Strahlungsdichten an der Erdoberfläche im Hauptstrahl bei weniger 5Tausendstel µW/m^2 (5 Tausendstel Mikrowatt pro Quadratmeter = 0,005 µW/m^2).

Diese Werte liegen weit unterhalb dessen, was von den üblichen terrestrischen Funkdiensten verursacht wird und sind selbst nach strengsten baubiologischen bzw. umweltmedizinischen Maßstäben als absolut unauffällig anzusehen.

Eine vertiefte Betrachtung des Themas wird im Artikel „5G Mobilfunk und Internet per Satellit – Der Strahlungsgrill von oben?" [35] des Autors durchgeführt.

IoT ist mehr als 5G

Neben dem für höchste Datenraten und -volumina konzipierten 5G steigt zurzeit und in Zukunft noch weiter rasant die Zahl von funkbasierten Anwendungen für das „**I**nternet **o**f **T**hings“ (IoT) und „Smart X“ (z.B. Smart Home, Smart City, Smart Metering für Elektrizität, Wasser, Gas, Wärme und weitere, bisher kaum zu ahnende Applikationen), die nur in größeren Zeitabständen sporadisch kleine und kleinste Datenmengen übertragen. Dafür aber mit einer riesigen Anzahl von „Teilnehmern“, die aber keine menschlichen Wesen sind, sondern technische Sensoren und Geräte (so genannte M2M = Machine-to-Machine Communication). Erwartet werden weltweit in einigen Jahren IoT-Endgeräte im zweistelligen Milliardenbereich. Hierfür werden – auch heute schon – die bestehenden Mobilfunknetze von 2G und 4G unterhalb von 1 GHz mittels spezieller Übertragungsdienste mitbenutzt, wie z.B.:

- NB IoT (LTE **N**arrow**b**and/Schmalband **IoT**), eine LTE-Variante mit nur 200 kHz Bandbreite und bis zu 50.000 Endgeräten pro Funkzelle,
- LTE-M (**LTE** for Machines), auch als LTE-M2M (**LTE M**achine-**to**-**M**achine) oder LTE-MTC (**LTE M**achine-**T**ype **C**ommunications) bezeichnet), eine LTE-Variante mit 1,4 MHz Bandbreite und bis zu 20.000 Endgeräten pro Funkzelle, Reichweite bis zu 2,5 km oder auch 5 km,
- EC-GSM-IoT (**E**xtended **C**overage **GSM IoT**), eine GSM-Variante mit der GSM-typischen Bandbreite von 200 kHz, Reichweite bis zu 15 km.

Zusätzlich werden parallel zu den bestehenden Mobilfunksystemen weitere IoT-Funksysteme in den lizenzfreien ISM-/SRD-Bändern 433 MHz und 860-870 MHz auf kommunaler Ebene aufgebaut, häufig in Regie der lokalen Energieversorger, wie:

- LoRaWAN (**Lo**ng **Ra**nge **W**ide **A**rea **N**etwork for IoT), Reichweite bis über 10 km,
- Sigfox LPWAN (Sigfox **L**ow-**P**ower **W**ide **A**rea **N**etwork for IoT), Ultra Narrow Band-Signal, bis zu 1 Million Endgeräte pro Funkzelle, Reichweite im freien Gelände 30-50 km, in Städten 3-10 km.

Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise und der Immissions-Messtechnik zu den o.g. IoT-Funksystemen wird in [36] gegeben. [37] beschreibt detailliert die Funktionsweise und Messtechnik von LoRaWAN.

Die als Vorzüge von 5G genannten extrem hohen Datenraten und äußerst kurzen Latenzzeiten werden für die meisten IoT- und Smart X-Anwendungen überhaupt nicht benötigt. Das entspricht dem Leistungsprofil eines Formel-1-Rennwagens. IoT braucht aber das alles nicht, sondern hat Anforderungen, die eher dem Treckerfahren mit zwei voll beladenen Anhängern entsprechen. Gemeinsamer Hintergrund ist natürlich, dass man 900 PS entweder zum rasanten und spurtstarken Fahren mit einem möglichst leichten Wagen verwenden kann oder zum langsamen Fahren mit Massentransport von vielen Rüben.

Hochfrequenzdämpfung von Gebäuden bei 5G-Frequenzen

Der bewährte und einzigartige „Klassiker“ zum Thema Hochfrequenz-Abschirmung ist das Standardwerk von Prof. Peter Pauli und Dr. Dietrich Moldan „Reduzierung hochfrequenter Strahlung im Bauwesen: Baustoffe und Abschirmmaterialien“ [38]. Dieses Buch dient als Nachschlagewerk für Planer, Messtechniker und Betroffene, um sich mit den vielfältigen Aspekten der Hochfrequenzabschirmung intensiv und fachgerecht auseinander setzen zu können. In der aktuellen 3. Auflage enthält es detaillierte, im Labor gemessene Kurven zur Hochfrequenzdämpfung von ca. 150 Produkten im Frequenzbereich 300 MHz - 10 GHz.

Da für 5G auch zukünftige Nutzungen im Frequenzbereich FR 2 von 24 GHz bis 53 GHz vorgesehen sind, stellt sich die Frage, wie es mit dem Dämpfungsverhalten bei diesen extrem hohen Frequenzen im Millimeter-Wellenbereich (mm-Wellen) aussieht.

Als Ergänzung zum o.a. Standardwerk wurden für die 10. EMV-Tagung des VDB e.V. am 17. Mai 2019, die unter dem Leitthema „5G und IoT“ stand, eigens Messungen des Dämpfungsverhaltens von 26 exemplarischen Bau- und Abschirmmaterialien im Frequenzbereich 24 GHz - 40 GHz durchgeführt und unter dem Thema „Abschirmung von 5G-Hochfrequenzwellen“ im Tagungsband der 10. EMV-Tagung vorgestellt [39].

5G in fünf Kapiteln

Der Autor hat das umfangreiche und vielseitige Thema „5G New Radio“ in insgesamt fünf Beiträgen behandelt, die gemeinsam unter dem übergeordneten Titel „5G in fünf Kapiteln“ im „baubiologie magazin“ des **I**nstituts für **B**aubiologie und **N**achhaltigkeit IBN (Rosenheim) erschienen sind [40].

Der hier vorliegende Beitrag dient der orientierenden Einführung in die Thematik. Vertiefende Aspekte sind in den folgenden Beiträgen dargestellt:

- 5G Aus den Augen, aus dem Sinn – Stadtmöbel als Verstecke für Small Cells
- 5G Mobilfunk und Internet per Satellit – Der Strahlungsgrill von oben?
- 5G Immissionsmessungen mit Breitbandmessgeräten der baubiologischen Messtechnik
- 5G NR Technische und messtechnische Aspekte (Entwurf der neuen VDB-Richtlinie „5G NR“).

Literatur und Internetadressen

[1] Deutsche Telekom AG, Spectrum Policy & Projects: 5G: Schlüsseltechnologie für das Internet der Dinge; Juni 2017; https://www.breitband-in-hessen.de/mm/5G_Perspektive_DTAG_publish.pdf

[2] Virnich, Martin: Technische Aspekte der Mobilfunktechnologien; Referat bei der Anhörung zum Thema „Mobilfunk“ im Südtiroler Landtag, 29. April 2015; https://baubiologie-virnich.de → Bibliothek → Fachartikel → Suchbegriff „Technische Aspekte der Mobilfunktechnologien“

[3] Virnich, Martin: Charakteristiken von Funksignalen; in: Audio-Analyse von Funksignalen (interaktive DVD); 2015; https://baubiologie-virnich.de/category/audio-analyse-von-funksignalen/

[4] Virnich, Martin: Die 5G-Ahnengalerie – Vom Autotelefon zu LTE und IoT (Internet of Things); in: Tagungsband der 10. EMV-Tagung „Energieversorgung und Mobilfunk“ des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 17. Mai 2019 in Bergisch Gladbach; S. 5-27; auf CD-ROM; ISBN 978-3-948407-01-8; https://baubiologie.net/publikationen/emv/

[5] BMVI, Kursbuch Netzausbau 2016, 5. Handlungsfeld, 4. Frequenzen, S. 37

[6] Bundesnetzagentur: Frequenz-Kompass – Neue Frequenzen für den weiteren Ausbau digitaler Infrastrukturen; https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/DrahtloserNetzzugang/Mobilfunk2020/Kompasspapier.pdf;jsessionid=770A65C72E722D51792ECF2FB4BFA4AD?__blob=publicationFile&v=1

[7] BMWi: Digitale Strategie 2025, S. 13

[8] Bundesnetzagentur: Mobilfunknetze / Mobiles Breitband – Frequenzen für 5G; https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/Mobilfunknetze/mobilfunknetze-node.html

[9] Jan Raehm: Der Eine-Millisekunde-Mythos im Mobilfunkstandard 5G; 10.12.2018; https://www.golem.de/news/latenz-der-eine-millisekunde-mythos-im-mobilfunkstandard-5g-1812-138027.html

[10] Anritsu Corporation: 5G NR Part I – Webinar: 5G versus LTE – 5G Cellular Systems Overwiew

[11] Hoymann, Christian: 5G – Der neue Mobilfunkstandard; in: Tagungsband der 10. EMV-Tagung „Energieversorgung und Mobilfunk“ des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 17. Mai 2019 in Bergisch Gladbach; S. 29-34; auf CD-ROM; ISBN 978-3-948407-01-8; https://baubiologie.net/publikationen/emv/

[12] Michael Eckert, Editorial Director; https://www.searchnetworking.de/news/252452938/5G-Mobilfunk-ist-bereit-und-wird-die-Wirtschaft-veraendern

[13] Jay, Stephan; Jost, Rüdiger; Kriegeskotte, Nick; Lemke, Michael; Pauli, Olaf; Schramm, Frank; Veith, Ingobert (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.)): Mitnutzungspotentiale kommunaler Träger-infrastrukturen für den Ausbau der nächsten Mobilfunkgeneration 5G – Eine Handreichung der AG Digitale Netze des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur; Juli 2019; https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/mitnutzungspotentiale-kommunale-traegerinfrastrukturen-ausbau-5g.pdf?__blob=publicationFile
und
https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/ag-digitale-netze-mitnutzungspotentiale-kommunale-traegerinfrastrukturen-5g.html

[14] Deutsche Telekom: So verläuft eine 5G-Einschaltung; YouTube Video; https://www.youtube.com/watch?v=WfWWRz-HOCA

[15] Deutsche Telekom: Vor Ort: So sieht es in einem Kabelverzweiger (Kvz) der Deutschen Telekom aus; YouTube Video; https://www.youtube.com/watch?v=OTTMomp-694

[16] Deutsche Telekom: MFG: So sieht ein Multifunktionsgehäuse der Telekom von innen aus; YouTube Video; https://www.youtube.com/watch?v=Pn-pD9S0ABI

[17] STG Group: Aufstellen eines Multifunktions Gehäuses; YouTube Video; https://www.youtube.com/watch?v=g4ITgmRYau4

[18] Multifunktionsgehäuse (Outdoorgehäuse) von Berthold Sichert aus Berlin-Marienfelde mit der Option zum Einbau von Mikrozellen; www.sichert.com, https://www.golem.de/news/berthold-sichert-5g-fuer-die-telekom-aus-dem-berliner-multi-funktionsgehaeuse-1901-138907.html

[19] Raycap – Produkte für Telekommunikationsnetze: Stadtmöbel für Small-Cells und e-Mobility; https://raycap.de/wp-content/uploads/2020/03/Products-Solutions-for-Telecom-DE.pdf

[20] Virnich, Martin: 5G Aus den Augen, aus dem Sinn – Stadtmöbel als Verstecke für Small Cells; baubiologie magazin des IBN – Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit, Rosenheim; Juni 2021; https://baubiologie-magazin.de/5G-in-fuenf-Kapiteln

[21] https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Vportal/TK/Funktechnik/EMF/start.html

[22] https://www.1und1-drillisch.de

[23] Grüner, Sebastian/dpa: Vierter Netzbetreiber – Telefónica und 1&1 Drillisch besiegeln Roaming-Details; golem.de – IT-News für Profis; 22.05.2021; https://www.golem.de/news/vierter-netzbetreiber-telefonica-und-1-1-drillisch-besiegeln-roaming-details-2105-156709.html

[24] Bundesnetzagentur: Drahtloser Netzzugang in den Bereichen von 700 MHz bis 3,8 GHz; https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/DrahtloserNetzzugang/Projekt2018/Frequenzen700bis3600_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4

[25] Jean DerGurahian: Die Grundlagen von 5G-Wireless-Netzwerken; Tech Target; Computer-Weekly.de; https://www.computerweekly.com/de/feature/Die-Grundlagen-von-5G-Wireless-Netzwerken

[26] Deutsche Telekom: Eine Frage: Was ist eine 5G-Antenne?; YouTube Video; https://www.youtube.com/watch?v=neSNVBjPIoY

[27] Virnich, Martin: 5G NR – Signalcharakteristiken und funkdiensttypische akustische Muster; https://baubiologie-virnich.de/category/audio-analyse-von-funksignalen/ → Scrollen bis „Zusätzliche Funksignale“

[28] Bornkessel, Christian: Konzepte für zuverlässige Immissionsmessungen an 5G-Basisstationen mit massivem MIMO; in: ITG-News 1/2020; S. 8-10; https://www.vde.com/resource/blob/1937474/1bfedb494c510507af28571e548811b0/itg - news-januar-2020-pdf-data.pdf

[29] Schüller, Thomas Michael: „Smarte“ Antennen bei 5G – Massive MIMO und aktives Beamforming; in: Tagungsband der 10. EMV-Tagung „Energieversorgung und Mobilfunk“ des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 17. Mai 2019 in Bergisch Gladbach; S. 35-49; auf CD-ROM; ISBN 978-3-948407-01-8; https://baubiologie.net/publikationen/emv/

[30] Virnich, Martin: 5G Immissionsmessungen mit Breitbandmessgeräten der baubiologischen Messtechnik; baubiologie magazin des IBN – Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit, Rosenheim; Juni 2021; https://baubiologie-magazin.de/5G-in-fuenf-Kapiteln

[31] Virnich, Martin: 5G NR Technische und messtechnische Aspekte: Entwurf der VDB-Richtlinie „5G NR“; baubiologie magazin des IBN – Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit, Rosenheim; Juli 2020; https://baubiologie-magazin.de/5G-in-fuenf-Kapiteln
und
https://baubiologie.net/publikationen/info-vdb-richtlinien/ → Leseproben

[32] Schweizer METAS (Eidgenössisches Institut für Metrologie): Technischer Bericht: Messmethode für 5G-NR-Basisstationen im Frequenzbereich bis zu 6 GHz; Version 2.1 vom 20. April 2020; https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/massnahmen-elektrosmog/mobilfunk--vollzugshilfen-zur-nisv.html

[33] Schweizer Bundesamt für Umwelt BAFU – Abteilung Lärm und NIS: Erläuterungen zur Messmethode für adaptive Antennen; 30.06.2020; https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/massnahmen-elektrosmog/mobilfunk--vollzugshilfen-zur-nisv.html

[34] Martínez-Vázquez, Marta (IMST): Mobilfunk per Satellit: Wunsch und Wirklichkeit; in: Tagungsband der 10. EMV-Tagung „Energieversorgung und Mobilfunk“ des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 17. Mai 2019 in Bergisch Gladbach; S. 51-68; auf CD-ROM; ISBN 978-3-948407-01-8; https://baubiologie.net/publikationen/emv/

[35] Virnich, Martin: 5G Mobilfunk und Internet per Satellit – Der Strahlungsgrill von oben?; baubiologie magazin des IBN – Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit, Rosenheim; Juli 2020; https://baubiologie-magazin.de/5G-in-fuenf-Kapiteln

[36] Berufsverband Deutscher Baubiologen VDB e.V. (Hrsg.): VDB-Richtlinien, 3. Auflage 2019, Band 1, Teil A – Physikalische Untersuchungen; https://baubiologie.net/publikationen/info-vdb-richtlinien/

[37] Ridder, Markus (IMST): IoT – Internet of Things – ganz ohne 5G / Lizenzfreies LoRaWAN – Systemeigenschaften, Signalcharakteristik, Emissionen; in: Tagungsband der 10. EMV-Tagung „Energieversorgung und Mobilfunk“ des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 17. Mai 2019 in Bergisch Gladbach; S. 85-103; auf CD-ROM; ISBN 978-3-948407-01-8; https://baubiologie.net/publikationen/emv/

© Martin H. Virnich, Mönchengladbach Juni 2021

[38] Pauli, Peter; Moldan, Dietrich: Reduzierung hochfrequenter Strahlung im Bauwesen: Baustoffe und Abschirmmaterialien; 4. Band der Reihe „EMV-Themen des VDB“, Berufsverband Deutscher Baubiologen VDB e.V. (Hrsg.); 3. Auflage; Im Verlag des AnBUS e.V., Fürth 2015; ISBN 978-3-9814025-9-9;
https://www.drmoldan.de/umweltanalytik/hf-buch/

[39] Moldan, Dietrich: Abschirmung von 5G-Hochfrequenzwellen; in: Tagungsband der 10. EMV-Tagung „Energieversorgung und Mobilfunk“ des Berufsverbandes Deutscher Baubiologen VDB e.V. am 17. Mai 2019 in Bergisch Gladbach; S. 85-103; auf CD-ROM; ISBN 978-3-948407-01-8;
https://baubiologie.net/publikationen/emv/

[40] Virnich, Martin: 5G in fünf Kapiteln; baubiologie magazin des IBN – Institut für Baubiologie und Nachhaltigkeit, Rosenheim; Juni 2021;
https://baubiologie-magazin.de/5G-in-fuenf-Kapiteln

1. Update, Juni 2021

© Dr.-Ing. Martin H. Virnich
ibu – Ingenieurbüro für Baubiologie und Umweltmesstechnik
Mönchengladbach, Juni 2021