

5G

Aceleración total con

Campos de aplicación, objetivos y características del sistema de radiocomunicaciones móviles de quinta generación

Mientras que hace 100 años la "electrificación" del uso de la energía era sinónimo de progreso. Hoy en día en la política y en la economía se repite sin cesar como un mantra la "digitalización" de las tecnologías de la información y la comunicación en el camino hacia una "sociedad del gigabit": "Todo lo que se puede digitalizar se digitaliza - y se pone en red". [1]

Estar omnipresente con 5G: "La red"

Hace tiempo que la "conexión en red" dejó de significar una maraña de cables de cobre, hoy en día se refiere más bien a la tecnología de fibra óptica más veloz y la integración sin fisuras de sistemas radioeléctricos digitales disponibles en casi todas partes, especialmente la telefonía móvil, que en los últimos 25 años ha crecido a pasos agigantados. Con el despliegue de la 5ª generación (5G), actualmente en marcha, la telefonía móvil está experimentando un cambio de importancia que hace solo unos años parecía inimaginable. Se suprimirá la separación entre las comunicaciones móviles y la red fija, y habrá una sola "red" casi omnipresente. El país de las posibilidades ilimitadas, tanto en sentido positivo como negativo, ya no es América, sino "la red".

La telefonía por radiofrecuencias se inició originalmente con el objetivo de permitir las llamadas telefónicas, más tarde también el acceso a Internet, independiente de las conexiones de red fija. Con la creciente difusión de los teléfonos móviles y los teléfonos inteligentes, las conexiones de la red fija inicialmente se complementaron y luego fueron sustituidas cada vez más por los teléfonos móviles y los teléfonos inteligentes. No obstante, los móviles y los smartphones seguían siendo utilizados por seres humanos /personas/ participantes/ usuarios/as).

Con 5G, este escenario cambiará enormemente: Además de la comunicación entre personas, se incrementará vertiginosamente la proporción de comunicación entre personas y máquinas y entre máquinas. Ya no se trata de la "telefonía móvil" en el sentido original, sino de la "red" inalámbrica por excelencia, que con su capacidad aparentemente ilimitada y su miríada de posibilidades estará disponible por doquier para las transmisiones de datos de todo tipo (ya sea dentro o fuera de los edificios), casi con tanta cotidianidad como respirar el aire que nos rodea.

Por cierto, el término corto "5G" se utiliza sobre todo en política, en economía o en marketing. En círculos técnicos se llama 5G NR (5G New Radio). En inglés, "radio" significa generalmente "comunicación por ondas de radio", y carece del significado específico del sistema público de radiodifusión sonora, como, por ejemplo, como en la lengua alemana.

La galería de los ancestros de la telefonía móvil

La primera generación - La tecnología analógica

Las redes A y B, que pertenecen a la primera generación de sistemas móviles de telecomunicación, fueron construidas y explotadas en los decenios de 1960, 1970 y 1980. En esa época, se les llamaba "teléfonos para automóviles". En términos de tamaño, peso y consumo de energía, estos dispositivos instalados en los coches estaban lejos de poder competir con un teléfono móvil o un smartphone de segunda, tercera o incluso cuarta generación, sin mencionar el precio de los dispositivos y gasto de las llamadas - "tarifa plana" era una palabra desconocida en aquel momento. Por lo tanto, el teléfono del automóvil estaba esencialmente reservado para el uso profesional de un grupo de élite, empresarios particularmente importantes y/o adinerados, es decir, lo contrario de un medio masivo de comunicación como la telefonía móvil actual. La tecnología era, según las posibilidades de la época, puramente analógica.

Con la introducción de la red C en 1984, se dio un primer paso hacia la digitalización: la transmisión de voz seguía siendo analógica, pero los datos de control del sistema se transmitían en forma digital. La Red

C también logró por primera vez una cobertura territorial casi completa, y debido a la drástica reducción de los precios, un número mayor de abonados entre la población (alemana, NdT) (alrededor de un millón con una infraestructura de unas 2.000 estaciones base), entre otras cosas porque la progresiva miniaturización ha hecho posible por primera vez hablar de teléfonos "móviles" fáciles de transportar.



Fig. 1: Logotipos de las generaciones de teléfonos móviles digitales 2G a 5G

GSM, la segunda generación - ahora completamente digital

Entretanto, el desarrollo de la tecnología completamente digital -incluida la transmisión de voz- había dado lugar a la creación de un sistema de telefonía móvil, que se introdujo en el mercado en 1992, que pronto superó al antiguo sistema analógico en cuanto a comodidad, rendimiento y gastos. El Sistema Global de Comunicaciones Móviles GSM (según las siglas en inglés para Global System for Mobile Communications) fue el sistema de telefonía móvil de segunda generación, más conocido en Alemania como la red D (GSM 900) y la red E (GSM 1800), el cual significó un gran avance en cuanto al uso masivo de la telecomunicación móvil, implicando la instalación de unas 45.000 estaciones base, para su funcionamiento en toda Alemania. La característica de la señal del GSM se caracterizaba por el método de acceso TDMA (Time Division Multiple Access o Acceso múltiple por división de tiempo), en el que hasta ocho personas abonadas comparten una frecuencia y que conduce a una pulsación periódica de la señal; para más detalles, véanse [2] y [3].

UMTS, la 3ª generación - Transmisión de datos a alta velocidad

Pronto, la telefonía se convirtió en un "uso secundario" del teléfono móvil: Los SMS, los juegos, la recepción y el envío de imágenes y datos, el acceso a Internet, etc., requerían tasas de transmisión y capacidades de red cada vez más elevadas. Los "teléfonos móviles", con una funcionalidad comparativamente baja, se convirtieron en cómodos "smartphones" con muchas nuevas funciones y acceso a Internet disponible en todas partes - el gran avance llegó con el primer iPhone de Apple.

Después de un largo período con problemas iniciales, tras la legendaria subasta de frecuencias del año 2000, el UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles) entró en el disputado mercado como tercera generación (3G) de la telefonía móvil, el cual se había convertido en un importante factor económico y que también estaba dejando una clara huella en el comportamiento social de la población, especialmente entre la juventud. Estadísticamente hablando, con el UMTS, la presencia de la población alemana con terminales de telefonía móvil, alcanzó por primera vez más del 10 por ciento. El UMTS utiliza el método de acceso W-CDMA (Acceso múltiple por división de código de banda ancha) para transmitir señales de radio de acuerdo con principios completamente distintos a los del GSM; en consecuencia, las características de la señal son completamente diferentes. Para más detalles, véase [2] y [3].

Pronto, también el UMTS "normal" resultó demasiado lento; por lo tanto, en poco tiempo se desarrollaron e introdujeron las variantes de "alta velocidad" HSPA/HSPA+ (High Speed Packet Access) para acelerar las velocidades en la transmisión de datos.

LTE y LTE Advanced, la cuarta generación

Una vez más, se alzó la voz en favor de unos sistemas que dieran un suministro de banda ancha aún más veloz para la población fuera de las conglomeraciones urbanas que el gobierno alemán estaba impulsando en consenso con la UE. La respuesta de la industria fue el sistema LTE (Long Term Evolution), para el cual las frecuencias en Alemania fueron subastadas en 2010 y que empezó a ser comercializado como un sistema de comunicaciones móviles de 4ª generación (4G). Con el OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales), se empleaba una tecnología innovadora de transmisión de datos de radio con una nueva característica de señal (ver [2] y [3]).

Sin embargo, surgieron ciertas contradicciones a la hora de asignar el LTE a una determinada generación de telefonía móvil: aunque en su gran mayoría se lo asignaba a la 4ª generación, a veces todavía se lo adjudicaba a la 3ª generación. Sin embargo, esto es solo porque las estrategias del marketing gustan de propagar algo que la tecnología aún no es realmente capaz de cumplir. Según las características técnicas de rendimiento definidas por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) LTE, al igual que UMTS y HSPA/HSPA+, sigue formando parte de la tercera generación de radiocomunicaciones móviles.

En el estándar LTE "normal", la eficiencia espectral y la utilización del ancho de banda del canal, entre otras cosas, no son suficientes para cumplir los requisitos de la norma 4G de la UIT. Por lo tanto, el LTE puede clasificarse como un máximo de 3.8G o 3.9G, pero, sin embargo, desde el punto de vista de la comercialización se lo denomina generalmente 4G, ya que la clientela potencial asocia a ello tasas de datos más altas y una tecnología más potente. Sólo la etapa de expansión "LTE-Avanzada" o 4G+ es una "auténtica" tecnología 4G que cumple plenamente los requisitos de la UIT para esta generación de comunicaciones móviles.

A medida que el "número" de generaciones aumenta, también lo hacen la velocidad de transmisión, la tasa de transmisión de datos y la capacidad de la red. Estas tres variables son también una importante fuerza motriz para el desarrollo de las nuevas generaciones, tanto en el pasado como en el futuro. Para alcanzar estos objetivos, los anchos de banda se han hecho cada vez mayores (Fig. 2): de 200 kHz para el GSM y 3,84 MHz para el UMTS a 5, 10 o 20 MHz para el LTE. Y el LTE ya abre la posibilidad de combinar varios canales en paralelo para lograr anchos de banda totales de 40 MHz, 60 MHz o incluso más. Y en la 5ª generación, se utilizan anchos de banda de hasta 100 MHz en el rango de frecuencia por debajo de 8 GHz, e incluso hasta 400 MHz en el rango de frecuencia por encima de 24 GHz.

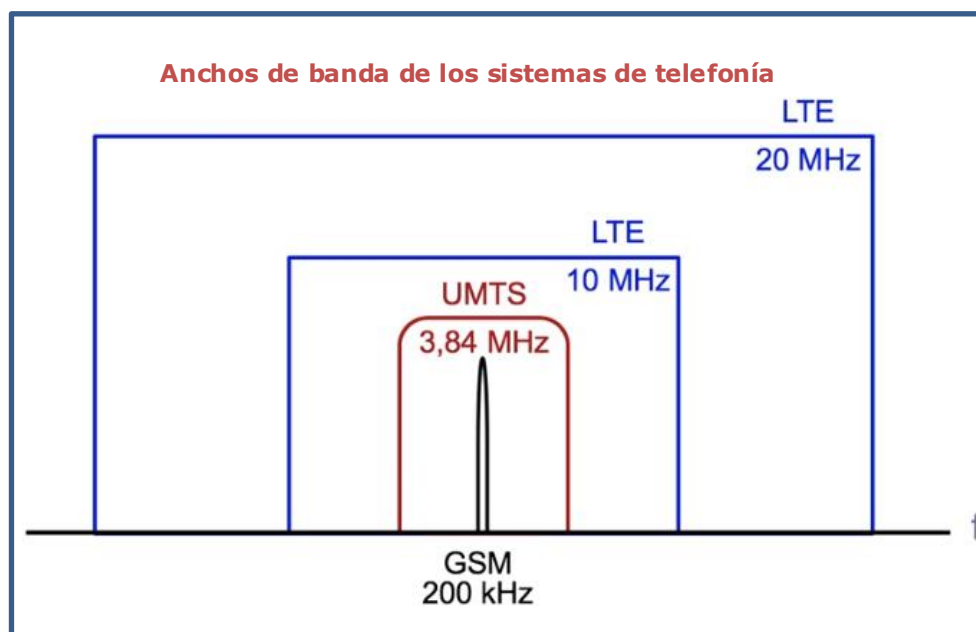


Fig. 2: Anchos de banda de los sistemas de telecomunicaciones móviles 2G a 4G

Una descripción más detallada de este capítulo se puede encontrar en "La galería de los antepasados del 5G: de los teléfonos de los coches al LTE y al IoT (Internet de las cosas)" [4] escrito por el autor este artículo; descripciones detalladas de las características de señal individuales se dan en [2] y [3].

5G: Un proyecto político intencionado

El proceso de digitalización integral y en su transcurso, la introducción generalizada de 5G, responde a una clara intención política y han sido declarados como objetivos de alta prioridad. En el marco de su iniciativa "Alianza Alemania Digital", el Ministerio Federal de Transporte e Infraestructura Digital (BMVI), por ejemplo, anunció en su guía sobre la ampliación de las redes digitales "Netzausbau 2016", que Alemania se enfrenta al reto de crear la infraestructura necesaria para convertirse en una sociedad de Gigabit:

"La creciente conexión en red de las aplicaciones alámbricas y móviles plantea exigencias cada vez mayores en cuanto a la provisión de frecuencias orientadas a la demanda. Un desafío especial consiste aquí en el desarrollo ulterior hacia el 5G". ([5], citado en [6])

En su "Estrategia Digital 2025", el Ministerio Federal de Economía y Energía (BMWi) se ha fijado el objetivo de "crear una infraestructura digital sostenible que cumpla el triple requisito de alta capacidad, amplia disponibilidad y baja latencia". ([7], citado en [6])

Y la autoridad reguladora alemana responsable de las comunicaciones electrónicas (Bundesnetzagentur - BNetzA- o "Agencia Federal de Redes") declara:

"Alemania debería convertirse en el líder mundial en infraestructura digital y en el mercado líder del 5G. La nueva generación 5G de comunicaciones móviles debería promover el desarrollo de servicios y aplicaciones innovadores (Industria 4.0, conducción autónoma, Internet de las Cosas). Con este fin, las frecuencias se pondrán a disposición en una etapa temprana y según las necesidades, para que Alemania pueda avanzar en este salto tecnológico". [8]

Objetivos técnicos de la tecnología 5G

La voluntad política anterior se traduce en los siguientes objetivos técnicos para 5G:

- Las mayores velocidades y capacidades para la transmisión de grandes volúmenes de datos y un número extremadamente grande de solicitudes del IoT (Internet de las Cosas) y aplicaciones Smart X,
- Tiempos de latencia más bajos para una respuesta rápida de los sistemas de control (conducción autónoma, procesos de producción industrial, operaciones remotas en la medicina)
- Disponibilidad casi ubicua.

La latencia es la suma de retardos técnicos temporales dentro de una red hasta que se inicia una transmisión de paquetes de datos. En el contexto del 5G, se pretenden conseguir unos tiempos de latencia significativamente inferiores a 10 ms (milisegundos), si es posible incluso alrededor de 1 ms.

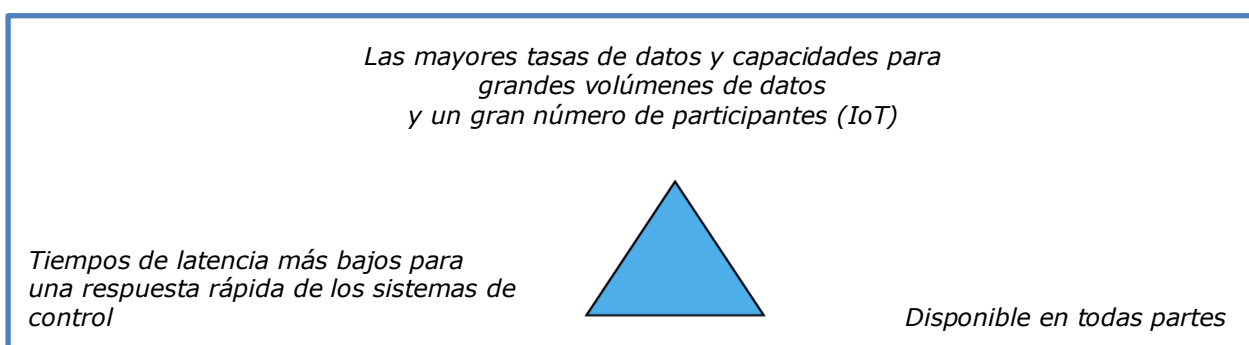


Figura 3: Objetivos técnicos del 5G

Los objetivos mencionados son, en parte, contradictorios: "Para ello hay que tener en cuenta que 5G no es lo mismo que 5G. Más bien, lo que se engloba bajo la palabra clave 5G es una colección de diferentes tecnologías de comunicaciones móviles, cada una de las cuales está configurada para su finalidad de uso específico. Se diferencian en cuanto de las frecuencias utilizadas, el posible ancho de banda y, por supuesto, la latencia soportada." [9]

Para lograr los respectivos objetivos, resulta también importante, el diseño del entorno informático, como las soluciones de nubes centrales o locales y la computación EDGE (NdT.: Ésta consiste en "acercar el

poder de procesamiento lo más cerca posible del lugar donde los datos están siendo generados”, “acercar la nube hasta el usuario, hasta el mismo borde (edge, en inglés) de la red” (<https://empresas.blogthinkbig.com/edge-computing-que-es/>).

Para nuestra imaginación, la tasa de transmisión de datos en Kbps, Mbps o Gbps (Kilo,- Mega-, Gigabit por segundo) que se suele utilizar para comparar las velocidades de transmisión de los diferentes sistemas de telefonía móvil, resulta bastante abstracta. Se puede obtener una idea mucho más clara, si en lugar de ello, se indica el tiempo necesario para la transmisión de un determinado volumen de datos, tal como se muestra en la Fig. 4.

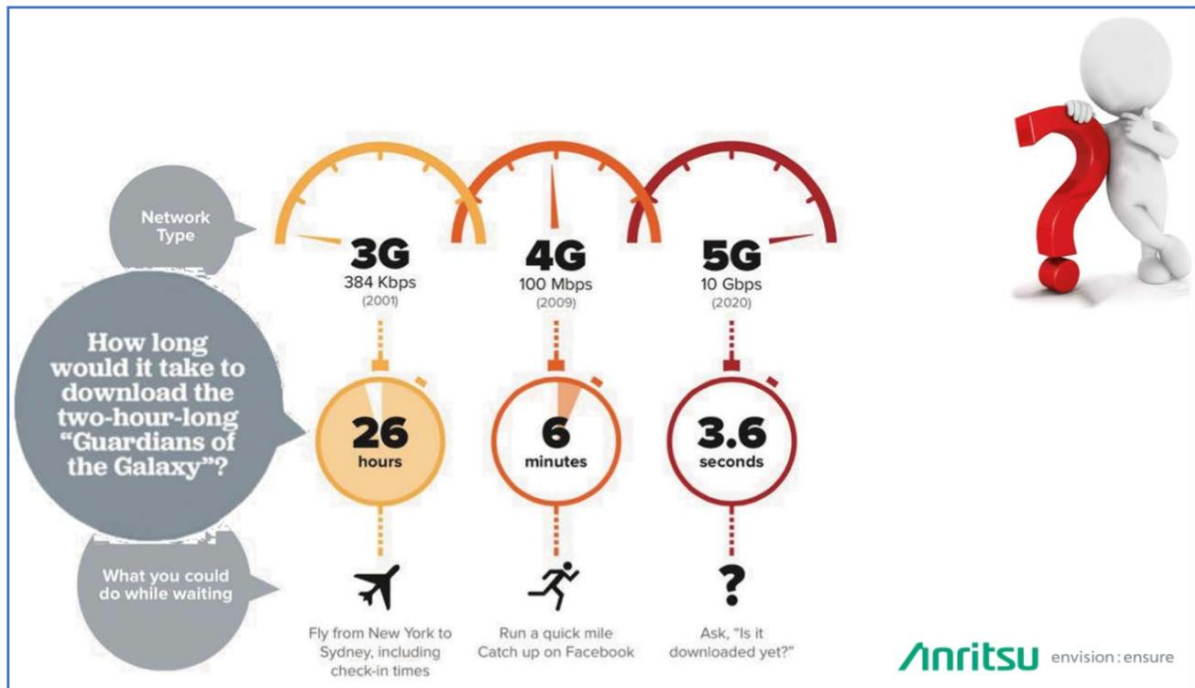


Fig.4: Velocidad de transmisión de 5G comparada con la de 3G y 4G (Anritsu [10])

Las principales áreas de aplicación del 5G son especialmente las que se muestran en la Fig. 5.

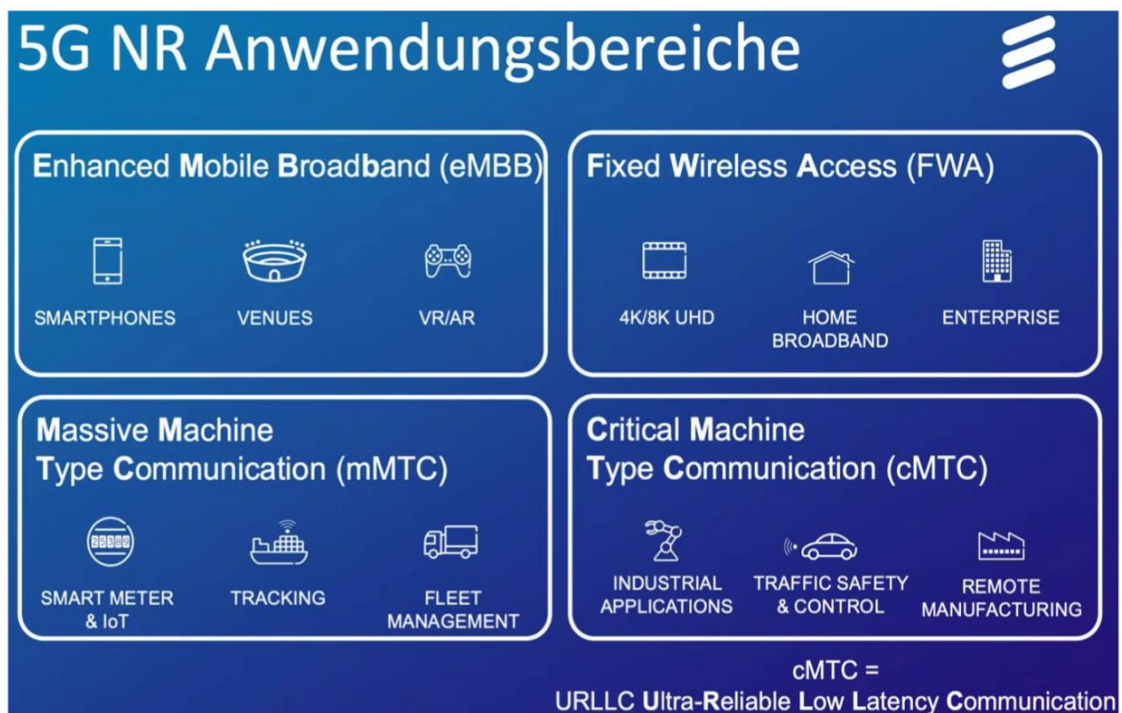


Fig. 5: Aplicaciones de 5G NR eMBB, FWA, mMTC y cMTC/URLLC (Ericsson [11])

Por ejemplo: La visión de Huawei, proveedor de 5G

"La telefonía móvil 5G está lista y cambiará la economía"

"El 5G está listo para ser usado y causará profundos cambios. Pero todavía hay inhibiciones contra las que los gobiernos han de actuar", dice el director ejecutivo rotativo de Huawei, Ken Hu.

"La tecnología inalámbrica 5G está en camino", dejó claro Ken Hu, Presidente de Huawei, en su discurso de apertura del Foro Mundial de la Banda Ancha Móvil (20-21 de noviembre de 2018) en Londres.

"5G está listo desde todos los ángulos", dijo. "Está listo para ser usado, es asequible y sobre todo, la demanda es real. Por supuesto, todavía hay algunos obstáculos para el despliegue del 5G".

Huawei ya ha suministrado más de 10.000 estaciones base 5G. "5G iniciará una revolución tecnológica", dijo Hu. "Dará un nuevo poder a todas las tecnologías de las TIC y desencadenará profundos cambios en la economía. Habrá nuevas oportunidades como nunca antes hemos visto".

Ken Hu predice que 5G trae sobre todo, los siguientes cinco cambios fundamentales:

- 1. 5G convertirá la conectividad en una plataforma. 5G permitirá una conectividad ubicua, perfecta e ilimitada para todas las personas y todas las cosas.*
- 2. Todo estará en online. Ahora mismo la mayoría de las cosas están desconectadas por defecto, y la mayoría de los dispositivos electrónicos no están conectados. Con 5G, estar online y conectado/a se convertirá en el estándar para todo.*
- 3. El mundo se convertirá en una nube. Las nubes cargadas mediante 5G ofrecerán una potencia de cálculo estándar con velocidades de transferencia veloces como el rayo y unos tiempos de retardo casi nulos. Esto significa que la "Inteligencia en Previsión de Demanda" (Intelligence on Demand) está disponible para todos/as y en todas partes.*
- 4. Se redefinen los dispositivos. Con el soporte de la IA (Inteligencia Artificial) para los dispositivos, la red y la nube, la utilización de los dispositivos cambiarán del principio de "plug and play" al del "plug and think". Entenderán mejor a los/as usuarios/as y serán capaces de predecir activamente nuestras necesidades, no solo de forma pasiva. Responderán a las órdenes e interactuarán con nosotros/as de forma más natural.*
- 5. La experiencia será fluida. Con las redes existentes, nuestra experiencia online está fragmentada saltando de un escenario a otro. Si todo está online y en la nube, la experiencia y el contenido fluirán sin problemas a través del tiempo, el espacio y los dispositivos - para una experiencia verdaderamente holística abarcando y conectando todos los escenarios.*

Ken Hu también abordó los desafíos de la asignación de frecuencias y el aprovisionamiento de emplazamientos. Los operadores de telefonía móvil, en particular, carecían de los recursos para el espectro. Para acelerar el despliegue, recomendó a los gobiernos que aceleraran el proceso de armonización y liberación de las bandas continuas con un gran espectro de 5G a un costo total menor que el del 4G. Mientras tanto", dijo a la audiencia, "además de la banda C, para 5G se podrán usar (y se usarán) también todas las bandas existentes hasta ahora, incluyendo las bandas de 2,3 GHz y 2,6 GHz.

"En lo que respecta a los emplazamientos, el despliegue de la red es un negocio caro," continuó. "Estamos alentando a los gobiernos a que asignen más recursos públicos para el despliegue sobre el terreno. Las infraestructuras de servicios públicos compartidos, como los tejados y los postes de alumbrado, pueden ayudar a las empresas operadoras a ahorrar costes y tiempo e incluso a abrir nuevas fuentes de ingresos para los servicios públicos". [12]

Y, de hecho, existe un fuerte apoyo político en la búsqueda de localizaciones para las estaciones base 5G en los municipios aprovechando para ello especialmente las bases de soporte municipales ya existentes (farolas, semáforos, señales de tráfico, paneles informativos para el público, etc.), por ejemplo, con un manual específico del Grupo de Trabajo "Redes Digitales" del Ministerio Federal de Transporte e Infraestructura Digital. [13].

Alcanzar los objetivos con las nuevas y viejas frecuencias

Se pueden lograr velocidades de datos más altas gracias a un mayor ancho de banda. Sin embargo, desde hace bastante tiempo, apenas queda espacio en el rango de frecuencias por debajo de 3 GHz. De allí viene la necesidad de desviarse hacia frecuencias superiores a 3 GHz. Además, con el incremento de la frecuencia, aunque se mantenga el mismo porcentaje de ancho de banda, aumentará el ancho de banda absoluto: el 10% de 1 GHz son 100 MHz; el 10% de 20 GHz ya son 2 GHz.

Dentro de dos grandes rangos de frecuencia (Frequency Range FR) se definen bandas exactas para aplicaciones de 5G NR:

- FR1 de 410 MHz a 7,125 GHz, 26 bandas para el enlace ascendente y descendente y
- FR2 de 24,25 GHz a 52,60 GHz.

En Europa, la introducción del 5G actualmente se está llevando a cabo exclusivamente en el FR1. La prensa y la publicidad se centran en la **nueva banda de frecuencias de 3,6 GHz** para las tasas de transmisión más altas, que por primera vez se subastó para aplicaciones de telefonía móvil en la subasta de frecuencias en la primavera de 2019. En este caso, se utiliza el método dúplex división por tiempo TDD¹ (Time Division Duplex), es decir, las estaciones de base y los teléfonos móviles transmiten en la misma frecuencia en rápida alternancia, lo que da lugar a una señal pulsada (como también ocurre con DECT y WLAN, por ejemplo). Las estaciones base se instalan en mástiles y tejados, pero también como "pequeñas celdas" (small cells) en zonas con una alta densidad de abonados/as a la telefonía móvil.

Los emplazamientos en mástil y cubierta en la gama de 3,6 GHz utilizan una nueva tecnología de antenas, las "antenas inteligentes" con "MIMO² masivo" o "formación activa de haces" (véase más abajo); esta tecnología también se utiliza para aplicaciones de 5G en la gama de frecuencias de 2,6 GHz.

Sin embargo, al comienzo el despliegue territorial completo del 5G no se realiza en la gama de 3,6 GHz, sino más bien en las frecuencias de telefonía móvil ya establecidas por debajo de los 2,6 GHz. Aquí no se instalan las antenas con "formación activa de haces" porque las antenas serían demasiado grandes y pesadas debido a la mayor longitud de onda. En las **conocidas bandas de 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz y 2100 MHz**, simplemente se siguen utilizando las antenas sectoriales convencionales que antes se utilizaban para GSM (2G), UMTS (3G) y LTE (4G).

En comparación con 3,6 GHz, donde primero tienen que ser instaladas las nuevas antenas, es mucho más fácil utilizar para 5G las antenas de telefonía móvil existentes y en funcionamiento. Las antenas entonces permanecen donde y como están, y sólo en los sistemas más antiguos la tecnología del sistema electrónico es reemplazada por la del 5G. Un ejemplo de este cambio de Telekom se puede ver en un video en YouTube [14].

Con los sistemas más modernos ni siquiera hay que cambiar el hardware, sino que simplemente se instala un nuevo software (SDR - Software Defined Radio). De esta manera, un gran número de estaciones base pueden ser cambiadas a 5G en comparativamente en poco tiempo y con poco esfuerzo - y ni siquiera se necesitan para ello unos nuevos certificados de localización emitidos por parte de la Agencia Federal de Redes. Entonces también tienes 5G, pero no con los anchos de banda extremadamente grandes de 50, 70 o 90 MHz, sino más bien en el "formato LTE" alrededor de 10 o 20 MHz y sobre todo: **sin MIMO masivo y sin formación de haces activos**. Así, los sectores son "iluminados" de manera convencional, como es usual en el GSM, UMTS y LTE; aquí no existe ningún rayo móvil o "errante" altamente enfocado. El procedimiento dúplex para "5G wide" suele ser FDD (Frequency Division Duplex), que utiliza dos bandas de frecuencia diferentes para el enlace ascendente y el descendente.

El beamforming o formación de haces activo tampoco se utiliza con las células pequeñas: el esfuerzo sería desproporcionado en relación con el beneficio. Las células pequeñas suelen trabajar con MIMO cuádruple.

¹ El método dúplex proporciona dos canales utilizables simultáneamente entre abonados/as de telefonía móvil: El enlace ascendente (terminal a estación base) y el enlace descendente (estación base a terminal). FDD (Frequency Division Duplex) utiliza dos bandas de frecuencia emparejadas para este fin, TDD (Time Division Duplex) establece el enlace ascendente y descendente en una sola frecuencia (no emparejada) en rápida alternancia.

² MIMO: (Multiple Input Multiple Output) Entrada múltiple Salida múltiple; Aquí se utilizan varias antenas que funcionan en paralelo: 2 para MIMO de 2 vías, 4 para MIMO de 4 vías y 64 para MIMO de 64 vías (= MIMO masivo: mMIMO)

La primera zona que se convertirá en 5G ("amplia o wide") a gran escala es el -hay que decirlo: antiguo- rango de frecuencias UMTS de 2100 MHz. Los días del UMTS están contados: el 3G será pronto el primer sistema de telefonía móvil en desaparecer. Telekom y Vodafone apagarán sus sistemas UMTS en Alemania a finales de junio de 2021, y Telefónica lo hará a finales de 2021.

Si descartamos las metrópolis y grandes ciudades en las que el 5G NR está realmente instalado en el rango de 3,6 GHz (5G fast), la probabilidad de encontrar señales 5G en el campo y en zonas no metropolitanas es mucho mayor en el rango de frecuencias por debajo de 3 GHz (5G wide).

En los sistemas con "5G wide", el 5G NR puede a menudo transmitirse simultáneamente mezclado con LTE en el mismo canal de frecuencias; este procedimiento se denomina **DSS - Dynamic Spectrum Sharing**. En el estado básico, el sistema funciona con LTE. Sin embargo, si un/a cliente/a lleva un smartphone 5G, el sistema sirve exactamente a este/a cliente/a con 5G, mientras que LTE sigue funcionando para los/as demás usuarios/as al mismo tiempo.

Cuanto mayor sea la proporción de clientes/as con terminales 5G en el futuro, más frecuentemente y durante más tiempo la base cambiará de LTE a 5G. Así, se produce una transición gradual de 4G a 5G. El DSS se aplica sobre todo en las gamas de frecuencias de 2100 MHz (Telekom) y 700 MHz (Vodafone).

En el caso de necesidades de ancho de banda muy elevadas, es posible que los datos de un/a abonado/a se transmitan mediante la "Carrier Aggregation" (CA) no sólo en una banda de frecuencia 5G, sino en paralelo en varias bandas diferentes. Los procedimientos dúplex FDD y TDD también pueden ser mixtos.

Mediante el SDL (Supplement Downlink Band), se dispone de reservas de frecuencia adicionales para las necesidades de gran ancho de banda en el enlace descendente. En este caso, se reservan ciertas bandas exclusivamente para el enlace descendente, que se utilizan según las necesidades; por ejemplo, la gama de 1,5 GHz, originalmente destinada a la radio digital regional y local DAB+.

Sólo dentro de unos cinco o seis años las frecuencias más altas de la FR2 se utilizarán también a gran escala para el 5G. Para ello sigue siendo necesaria la coordinación internacional entre las autoridades competentes. En Alemania, las frecuencias para el 5G en el rango de 24,25 a 27,5 GHz pueden utilizarse en un primer paso desde enero de 2021 -sin embargo, estas frecuencias no se subastan, como es habitual para la telefonía pública, sino que deben solicitarse a la Agencia Federal de Redes y son asignadas por ella, al igual que en el rango de frecuencias de 3,7 a 3,8 GHz.

En consecuencia, las frecuencias de 26 GHz no son utilizadas públicamente por los conocidos proveedores de telefonía móvil, sino que están disponibles principalmente para servicios de telecomunicaciones para clientes finales, para redes de campus, conexiones de infraestructura, Industria 4.0 e Internet de las Cosas (IoT) para la industria. Debido a la alta frecuencia, el alcance es limitado: es de unos 600 metros con una línea de visión clara y de 300 metros sin línea de visión.

A partir de 24 GHz, la longitud de onda es de 10 a 3 mm (ondas milimétricas). Estas son apenas capaces de penetrar las paredes de los edificios. Especialistas en medicina con una actitud crítica con la telefonía móvil afirman que en estas cortas longitudes de onda se producen efectos biológicos relevantes en las capas superiores de la piel. Estos efectos no están cubiertos por el modelo causal basado únicamente en los efectos puramente térmicos en los que se basan los valores de referencia de la ICNIRP³ y, por tanto, los valores límite del 26º BImSchV⁴.

Con el aumento de frecuencia se incrementa también la atenuación de la trayectoria de la onda electromagnética y se disminuye considerablemente la capacidad de penetrar la materia (por ejemplo, las fachadas de los edificios). A frecuencias más altas, la distancia abarcable disminuye y los radios de las celdas se hacen más pequeños. Esto hace que las estaciones base han de acercarse más a los/as abonados/as. Al mismo tiempo, con células más pequeñas la capacidad disponible de emplazamientos en la zona aumenta. Para la 5G, se habla de radios de influencia de cada celda del orden de 100 m o incluso de solo 50 m para las aplicaciones telefonía móvil pública, es decir, hay que instalar una estación base cada 50 o 100 m.

³ ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) Comisión Internacional de Protección contra las Radiaciones No Ionizantes, asociación privada con sede en Munich

⁴ 26 BImSchV: 26ª Ordenanza sobre la aplicación de la Ley Federal de Control de Inmisiones (Ordenanza sobre campos electromagnéticos)

Lo mismo ocurre con el objetivo de conseguir unos períodos de latencia cortos. Las ondas electromagnéticas tienen una velocidad de propagación muy alta pero finita de 300.000 km/s. Por lo tanto, para períodos de latencia cortos, las distancias deben ser pequeñas.

Celdas pequeñas (“small cells”)

Los efectos mencionados llevan a que con 5G, las estaciones base, además de las ubicaciones elevadas en mástiles y tejados, se trasladen en gran medida como “small cells” a las calles y delante de las casas, comparables a las conocidas micro y nano células en la telefonía móvil de 2G a 4G a (Fig. 6), las que se instalan en áreas con requisitos de capacidad muy elevados, tales como zonas peatonales, salas de exposiciones y estadios de fútbol. En lugar de instalarse en edificios, chimeneas de fábricas y mástiles especialmente levantados, muchas small cells de la red 5G se instalan en farolas, semáforos, pilares publicitarios y soportes similares o "mobiliario urbano"⁵. Especialmente adecuadas son las carcasas multifuncionales de telecomunicaciones, que se instalaron en gran número durante la conversión de la "red telefónica" a IP/VDSL (Fig. 7) y que han sustituido a los antiguos "divisores de cable". Son particularmente populares entre los operadores de redes porque toda la infraestructura necesaria para una pequeña célula ya está disponible aquí: tanto la fuente de alimentación de 230 V como la conexión de datos a la rápida red de fibra óptica.

La conversión de los antiguos divisores de cable pasivos a las nuevas carcasas multifuncionales se muestra muy claramente en dos vídeos de YouTube de Deutsche Telekom ([15] y [16]) y en [17].



Fig. 6: La microcélula de Telekom con telefonía móvil LTE (hotspot) en una zona peatonal, lo cual ha sido una práctica común desde hace bastante tiempo.

⁵ El término mobiliario urbano es el término genérico que designa los objetos situados en zonas exteriores, en espacios urbanos públicos y privados, en plazas o en parques, que amueblan el espacio urbano de forma comparable al mobiliario clásico y tienen una finalidad. Un elemento de mobiliario urbano ofrece funciones necesarias en el espacio público (por ejemplo, las mamparas), o es un objeto que sirve para informar o anunciar, para entretenerse, para relajarse o para jugar. (Fuente: Wikipedia)



Outdoorgehäuse von Berthold Sichert aus Berlin-Marienfelde

(Bild: Berthold Sichert)

Fig. 7: Carcasa multifuncional (para el emplazamiento al aire libre) de Berthold Sichert de Berlín-Marienfelde, lista para la instalación de small cells [20].

La industria ha descubierto el potencial de mercado de las celdas pequeñas y ya ofrece muchas soluciones "discretas" o "adaptadas" para ellas (véase, por ejemplo, la Fig. 8). Las small cells instaladas en los postes de luz y otros mástiles, así como en las fachadas de los edificios, están equipadas con revestimientos lo más discretos posible; muestra significativa de ello es que el nombre de uno de tales productos "InvisiWave™" [18]. Los detalles se describen en el artículo del autor "5G Ojos que no ven, corazón que no siente: el mobiliario urbano como escondite para Small Cells" [19].

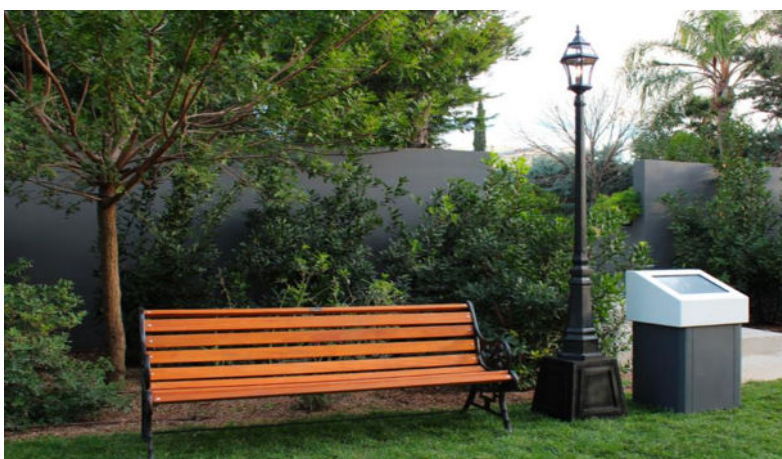


Fig. 8: Ejemplo de mobiliario urbano con una célula pequeña camuflada, apto para todas las bandas de frecuencia LTE/5G [18]

En particular, con celdas pequeñas instaladas cerca de las personas y a escasa altura (por ejemplo, en carcasas multifuncionales), a menudo ya no es posible garantizar que los y las transeúntes mantengan una mayor distancia; las antenas pueden tocarse casi en la superficie cuando están instaladas a baja altura. Esto puede llevar a problemas con el cumplimiento de los valores límite según la 26ª Ordenanza Federal de Control de Inmisiones (BImSchV). En las proximidades de esas celdas de radio tan pequeñas pueden producirse intensidades de campo muy elevadas -a pesar de que la potencia de transmisión sea inferior a 10 W EIRP⁶-, de manera que no se requiere ningún certificado de localización de la Agencia Federal de Redes (BNetzA)-, las cuales son claramente más altas que en las anteriores localizaciones de mástiles y tejados, con sus distancias significativamente mayores. A frecuencias superiores a 2 GHz y una potencia de 10 W EIRP, el valor límite del 26º BImSchV de 61 V/m se alcanza a una distancia de 28 cm de la antena

⁶ EIRP: Equivalent Isotropically Radiated Power, potencia isotrópica radiada equivalente teniendo en cuenta la ganancia de la antena y, por tanto, el "factor de agrupación" de la misma.

Otro efecto de las pequeñas celdas pequeñas: En ubicaciones en mástiles y tejados, los pisos inferiores y planta baja de un edificio están significativamente menos expuestos que los pisos superiores. Esta proporción se invierte para las small cells instaladas en la calle.

Desde 2021, también es posible ver las células pequeñas en el directorio de emplazamientos (mapa CEM [21]) de la Agencia Federal de Redes (BNetzA) cuya potencia de transmisión (EIRP) es inferior a 10 W, por lo que no requieren la aprobación y la certificación del emplazamiento por parte de la BNetzA y sólo es necesario informar de ello.

Subasta de frecuencia 5G 2019

En la primavera de 2019, la Agencia Federal de Redes realizó una subasta de frecuencias para proporcionar a los operadores de redes móviles las frecuencias necesarias para la tecnología 5G.

Los proveedores admitidos en la subasta fueron los siguientes:

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

Mientras que los tres primeros son bien conocidos por el público y han estado operando redes inalámbricas de 2G a 4G durante mucho tiempo, el nombre "Drillisch" es apenas familiar - en contraste con la designación adicional "1&1" en el nombre de la compañía (Fig. 9).



Fig. 9: La empresa (izquierda) y las marcas (derecha) de 1&1 Drillisch AG [21]

Los siguientes anchos de banda de frecuencia fueron subastados:

- Ocho bloques de frecuencia de 5 MHz de ancho cada uno en el rango UMTS por encima de 2 GHz. Aquí, los correspondientes usos anteriores de UMTS expiraron en 2020.
- Nuevas frecuencias en la gama de 3,4 a 3,7 GHz. Telekom y Vodafone compraron 90 MHz cada una, Telefónica 70 MHz y Drillisch 50 MHz. Como era de esperar, el "recién llegado" Drillisch, que todavía no tiene ninguna infraestructura inalámbrica, no construirá su propia red 5G a nivel nacional en un futuro próximo. En cambio, Drillisch compartirá inicialmente la red de Telefónica. En mayo de 2021, se celebró el correspondiente Acuerdo Nacional de Itinerancia (ANR) entre ambos proveedores [23].

La Agencia Federal de Redes publica un resumen gráfico de todas las frecuencias de la radio móvil pública, con la asignación a los operadores y la indicación de cuándo expira el periodo de uso para el operador respectivo, bajo el título "Acceso a la red inalámbrica en los rangos de 700 MHz a 3,8 GHz" (Fig. 10, [24]).

Drahtloser Netzzugang in den Bereichen von 700 MHz bis 3,8 GHz



Fig. 10: Resumen de frecuencias "Acceso a la red inalámbrica en los rangos de 700 MHz a 3,8 GHz"; Agencia Federal de Redes [24]

Además de la subasta para los operadores de telefonía móvil que operan a nivel nacional, se ha desarrollado un procedimiento de solicitud de uso local y regional para la gama de frecuencias de 3,7 - 3,8 GHz. "Esto también permitirá a los operadores de redes regionales, a las pequeñas y medianas empresas o a las empresas de nueva creación, con una necesidad de espectro que solo surgirá en el futuro, así como a los municipios y a los representantes de la agricultura y la silvicultura, utilizar el potencial de la próxima generación de comunicaciones móviles 5G para aplicaciones en la empresa y la industria o para mejorar la cobertura de las comunicaciones móviles en las zonas rurales." [8]

Las bases técnicas de las redes inalámbricas 5G

Los fundamentos de las redes inalámbricas 5G se presentan en el artículo [25] de forma muy clara y comprensible. Los puntos esenciales se citan aquí en extractos y también se refieren a las figuras 4 y 5.

"Se espera que la telefonía móvil 5G, basada en los servicios inalámbricos LTE (Long Term Evolution) de cuarta generación (4G), transmita un mayor volumen de datos a través de redes significativamente más rápidas, con una latencia en el rango de menos de un milisegundo. Con la tecnología 4G, las redes móviles pueden transportar datos a una velocidad máxima de hasta 1 Gbit/s. Sin embargo, en las redes inalámbricas 5G, el rendimiento aumentará drásticamente, de modo que los datos se transportarán a no menos de 10 Gb/s, la misma velocidad que para la comunicación por cable.

Mientras tanto, la reducción de los tiempos de respuesta de la red traerá más avances significativos. Como resultado, la arquitectura 5G ofrece un potencial considerable para las nuevas tecnologías - como la cirugía remota online - que incluyen el aprendizaje automático (Machine Learning) y la inteligencia artificial, la realidad virtual y aumentada, y el Internet de las Cosas".

Tipos de servicios inalámbricos 5G

A medida que se acerca el despliegue comercial de las redes inalámbricas 5G, los operadores de telefonía móvil están desarrollando dos tipos básicos de nuevos servicios 5G. Uno es el Fixed 5G Wireless Broadband (banda ancha inalámbrica fija). (...) El segundo tipo es el Mobile 5G Cellular; que también es probable que esté disponible para algunos mercados a partir de 2019, y se espera que la tecnología, que es adecuada tanto para usuarios/as de móviles en general como para los/las de celulares en particular, esté disponible de forma general a partir de 2020. Los/as analistas esperan que será para el 2025 cuando los operadores podrán facilitar el 5G inalámbrico completo (...)

A continuación aprenderás cómo funcionan los dos tipos de servicios inalámbricos 5G.

Banda ancha inalámbrica fija 5G (Fixed Wireless Broadband 5G). Estos servicios (también conocidos como Fixed Wireless) están diseñados para proporcionar conectividad a Internet a las empresas o los hogares “en la última milla” utilizando señales de radio en lugar de una conexión por cable instalada directamente en el lugar. A fin de ofrecer banda ancha inalámbrica fija, las empresas operadoras proporcionan las llamadas “5G New Radios ubicadas en pequeños emplazamientos de pequeñas radioceldas, por ejemplo, en las farolas y los postes de teléfono. Así, las señales son enviadas a los módems inalámbricos instalados en edificios y hogares. Esto elimina la necesidad de llevar conexiones fijas directamente hacia el interior de los edificios, por ejemplo a través de fibra óptica o cable.

Servicios móviles 5G (5G Mobile Services). Además, los operadores también están planeando ofrecer unos servicios de radio 5G móviles, que serán posibles gracias a la próxima etapa de desarrollo del Evolved Packet Core LTE-Advanced. (...)

5G inalámbrico en la empresa

Por el momento, las perspectivas para la utilización de la tecnología inalámbrica 5G en empresas sigue siendo una promesa - hasta que (...) los operadores hayan completado el despliegue de las redes inalámbricas 5G. Una vez que se instalen las unidades inalámbricas 5G y se disponga de dispositivos inteligentes habilitados para 5G, se puede esperar que las empresas desarrollen más opciones de uso para los servicios 5G.

Chris Antlitz, analista principal del mercado de las telecomunicaciones en Technology Business Research Inc. en Hampton, New Hampshire, espera que las grandes empresas de Fortune 2000 estén entre las primeras en comenzar a desplegar servicios 5G en 2020. El uso más generalizado en el sector empresarial solo se producirá más tarde, entre 2025 y 2030.

Preparándose para el despliegue de las redes inalámbricas 5G, en algunas empresas, los miembros de la junta directiva y otros gerentes de TI están empezando a estudiar posibles aplicaciones que saquen provecho del alto rendimiento y la baja latencia de la red 5G.

¿Quién se beneficiará de la tecnología 5G?

Según MarketsandMarkets, el mercado de la infraestructura 5G promete un potencial de crecimiento significativo de 2.900 millones de dólares en 2020 a 34.000 millones de dólares en 2026.

Las razones de ello son la demanda de servicios de datos móviles, el crecimiento de la automatización industrial y el creciente uso de software en las redes de comunicación.

Para las industrias que requieren baja latencia y una alta tasa de transmisión de datos - como las de la salud, servicios financieros, servicios públicos y otras empresas con operaciones de campo - se espera que las redes inalámbricas 5G tengan un impacto significativo. Es probable que las empresas con requisitos específicos de comunicación y procesos de fabricación sean las primeras en cosechar los beneficios.

Por ejemplo, técnicos/as de un centro de desarrollo 5G en Oulu, Finlandia (...) están desarrollando propuestas de cómo aplicar la tecnología 5G. Los/as investigadores/as trabajan en ideas innovadoras para la comunicación, como la radiodifusión 5G, además de unas aplicaciones para el sector de la atención de la salud, como las medidas de rehabilitación de pacientes con accidentes cerebrovasculares a través de la realidad virtual. [22]

Antenas Inteligentes / MIMO Masivo / Formación de Haces Activa



Una importante innovación de la tecnología 5G es la posibilidad de utilizar "antenas inteligentes" (Fig. 10). Mientras que las antenas de telefonía móvil convencionales consisten esencialmente en "hardware mecánico", las "antenas inteligentes" también incluyen componentes electrónicos y software. Así, no sólo pueden transmitir en una dirección preferente -como ha sido el caso hasta ahora- sino también adaptar dinámicamente la dirección principal de la radiación a las condiciones actuales del uso local de la red. Si un usuario o usuaria de un teléfono inteligente se mueve dentro del rango de influencia de una "antena inteligente", el haz principal le sigue cambiando la característica direccional de la antena. Esta propiedad también se conoce como "Formación de Haces Activa".

El Beam Forming (la formación de haces) se resuelve técnicamente utilizando un conjunto de pequeñas antenas individuales, las "Matrices", dispuestas por encima y al lado de las demás; lo típico para 5G, por ejemplo, es un número de $8 \times 8 = 64$ antenas individuales (Fig. 12). Sin embargo, estas antenas individuales no funcionan de forma independiente unas de otras, sino que trabajan juntas como una sola antena global.

Fig. 11: Antena 5G NR 3,6 GHz con MIMO masivo/formación de haz en la parte superior (círculo amarillo); por debajo se encuentran dos antenas sectoriales convencionales 2G - 4G, que también pueden ser utilizadas para 5G - pero sin formación de haz.

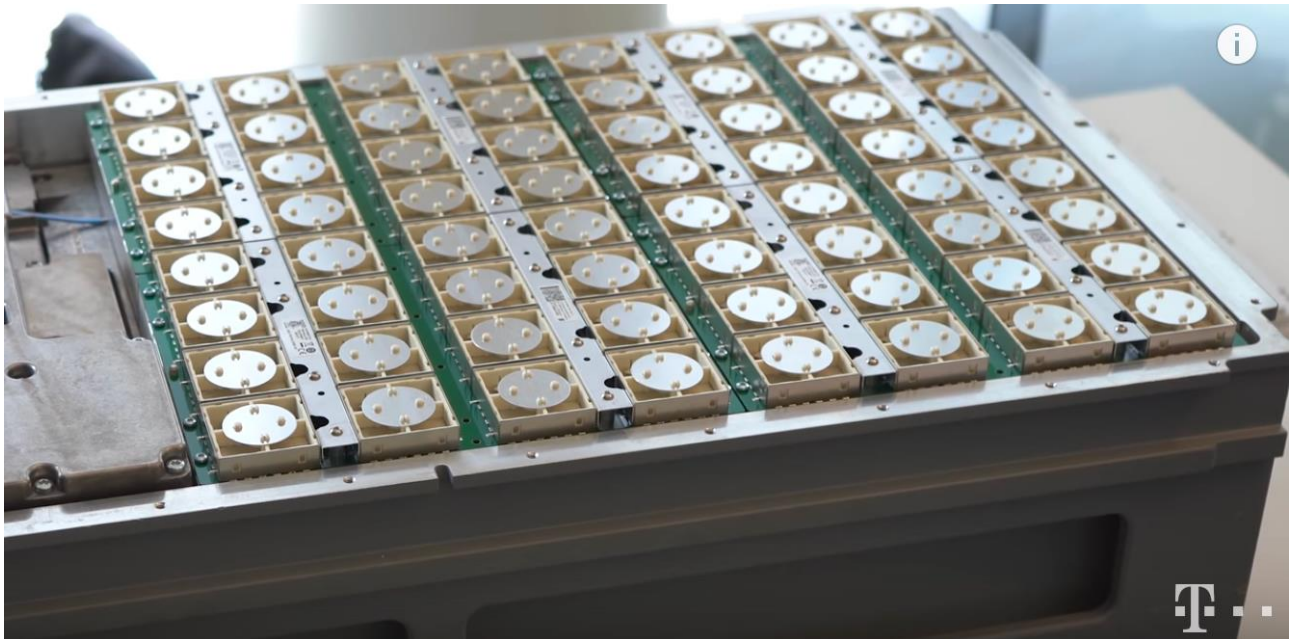


Fig. 12: "Antena inteligente" con formación activa del haz. Se ha retirado la tapa para hacer visible el conjunto 8×8 con 64-MIMO [26]; antena girada en 90° en comparación con la Fig. 11.

Al desfazar el funcionamiento de las antenas individuales con la señal transmitida, se puede controlar la característica direccional de la onda radiada global, que se crea al superponer las ondas individuales para formar un frente de onda común. Este procedimiento se conoce como "MIMO Masivo" (Entrada Múltiple - Salida Múltiple); y es en la tecnología 5G donde por primera vez se utiliza ampliamente de esta manera.

El vídeo de YouTube de la Telecom "Eine Frage: Was ist die 5G-Antenne? (Una pregunta: ¿Qué es una antena de 5G?) [26] muestra una vívida animación por ordenador de las ondas de desplazamiento de fase para controlar las características direccionales y una vista de una antena 5G con 64 MIMO abierta.

Las antenas equipadas con Beam Forming Activo no irradian sobre un área espacial (sector), con la misma distribución espacial e independiente del tiempo, como es habitual en las antenas sectoriales convencionales, sino que el haz principal se centra actualmente en el/la usuario/a o en un grupo espacialmente contiguo de usuarios/as y sigue su movimiento en la zona. Además, esas antenas pueden focalizar simultáneamente no solo uno sino varios haces principales dinámicos, de modo que se pueda proporcionar la misma frecuencia a varios/as usuarios/as situados/as en diferentes lugares del espacio (método de acceso Space Division Multiple Access, SDMA). Esto también aumenta significativamente la capacidad de una celda de emisión.

Las señales de sincronización, independientes de la carga útil, se transmiten juntas en el llamado Bloque de Señal de Sincronización (Synchronisation Signal Block, SSB), que oscila cíclicamente en varias etapas equidistantes (normalmente ocho en el rango de frecuencias de 3 GHz a 8 GHz) en todo el rango del sector en un haz separado propio y no tan fuertemente focalizado. La Fig. 13 muestra un ejemplo de la intensidad de campo recibida en un punto de medición en función de la dirección del haz del SSB. El teléfono determina la dirección con la mayor intensidad de campo recibida y se sincroniza con este haz del SSB en la estación base.

La frecuencia de repetición SSB es de 50 Hz; por lo tanto, esta es la frecuencia de pulsación dominante de la tecnología 5G produciendo también el típico "ruido" de las estaciones base 5G cuando se utiliza un dispositivo de medición de banda ancha con control acústico (véase [27] para ejemplos).

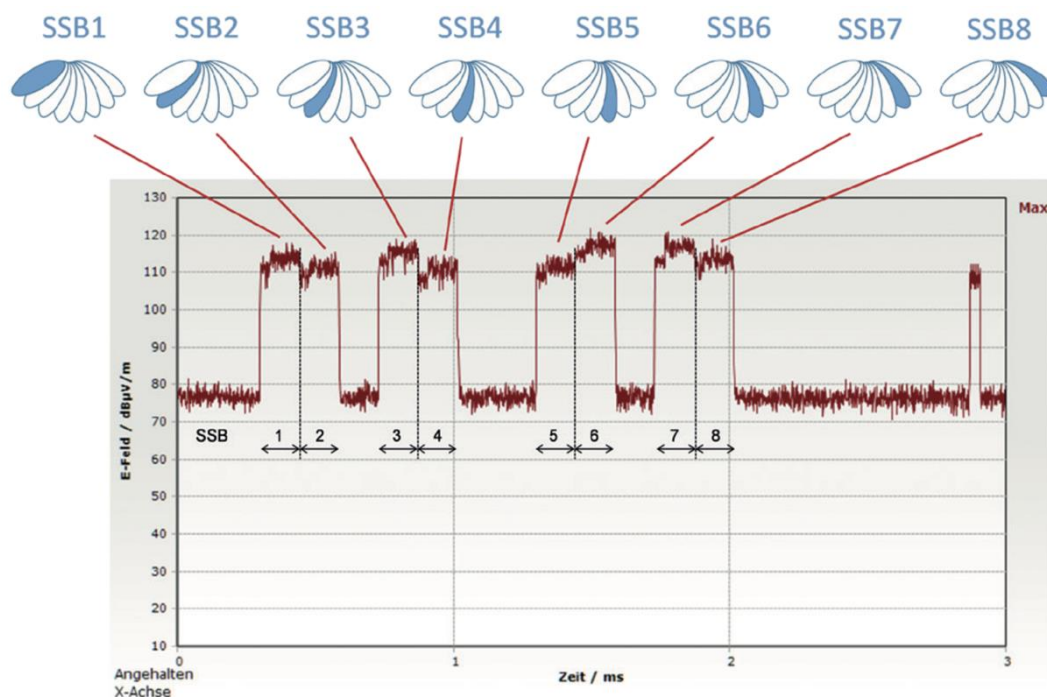


Bild 2: Zeitbereichsmessung eines aus acht SSB bestehenden SSB-Bursts

Fig. 13: Medición puntual de una ráfaga de SSB compuesta por ocho SSB; las intensidades en el lugar de recepción varían con la dirección del haz de SSB [28].

El tráfico dependiente de la carga (datos del/a usuario/a) se transmite en un haz separado, mucho más concentrado y dinámico, a gran velocidad y poco tiempo después de que el terminal se haya sincronizado. Este haz de tráfico sigue los movimientos del/a usuario/a en la célula. Cuando la transmisión de datos en curso finaliza, el haz de tráfico se dirige a otro/a usuario/a o, cuando la estación base está inactiva, se apaga. Entonces sólo el haz del SSB está activo; esto representa el estado de mínima emisión. La densidad de radiación local del haz de tráfico depende, entre otras cosas, de la posición del punto de inmisión en relación con la ubicación de la antena y, según la bibliografía, puede ser hasta 10 dB (es decir, un factor de 10) o superior a la del haz del SSB en pleno foco [28]. Si hay varios/as usuarios/as en una célula, la potencia de transmisión disponible se divide entre varios haces de tráfico que se alinean en consecuencia. Por tanto, las inmisiones más elevadas se registran cuando sólo hay un/a usuario/a 5G activo en la célula.

El conjunto de todos estos factores hacen que la densidad de radiación en un punto entre el mínimo (sólo SSB, sin carga de tráfico) y el máximo (carga de tráfico completa, con el haz de transmisión de datos de usuarios/as focalizado) pueda tener un enorme rango de un factor de 200 o más. Para los sistemas de telefonía 2G a 4G se trata sólo de un factor de 4 a 6. Cuando se irradian señales 5G a través de antenas sectoriales “clásicas”, sin Beam Forming Activo, el factor entre el mínimo y el máximo puede ser de 20 o más.

Para más información sobre la tecnología de antenas de radio móviles en general y el Beam Forming Activo en particular, puede consultarse el artículo "Antenas 'inteligentes' en 5G - MIMO Masivo y Beam Forming Activo" [29].

Debido a la falta de experiencias con esta tecnología, cuya aplicación generalizada es un hecho novedoso, no está claro si, después de todo, puede haber áreas con intensidades de campo excesivas. Asimismo, no existen reglamentos claramente definidos para la medición de inmisiones con Formación de Haces Activo, puesto que éstas ya no son constantes en el espacio sino que varían en función del movimiento de las personas abonadas a la telefonía móvil activas en cada momento. Además, la extrema velocidad de transmisión de datos hace que ésta se realice solo por períodos de tiempo muy cortos. Por supuesto, de todo ello surgen nuevos desafíos, anteriormente desconocidos, para la medición reproducible de las inmisiones. Las soluciones para ello están todavía en desarrollo.

Mientras que con GSM, UMTS y LTE la extrapolación de los canales de control y piloto permanentemente activos, que provocan la mínima inmisión, a la máxima utilización del sistema (máxima inmisión) es posible sin problemas con las antenas sectoriales clásicas, 5G con beamforming activo enfrenta a la tecnología de medición a un nuevo problema que sólo puede resolverse de forma complicada y costosa.

Las inmisiones más elevadas se producen cuando sólo hay un/a abonado/a activo/a en la célula en cuestión y, en consecuencia, sólo se forma un haz de tráfico con la máxima potencia de transmisión. Sin embargo, en el funcionamiento normal, no se puede "forzar" a la estación base a hacer esto para el punto exacto en el que se van a realizar las mediciones.

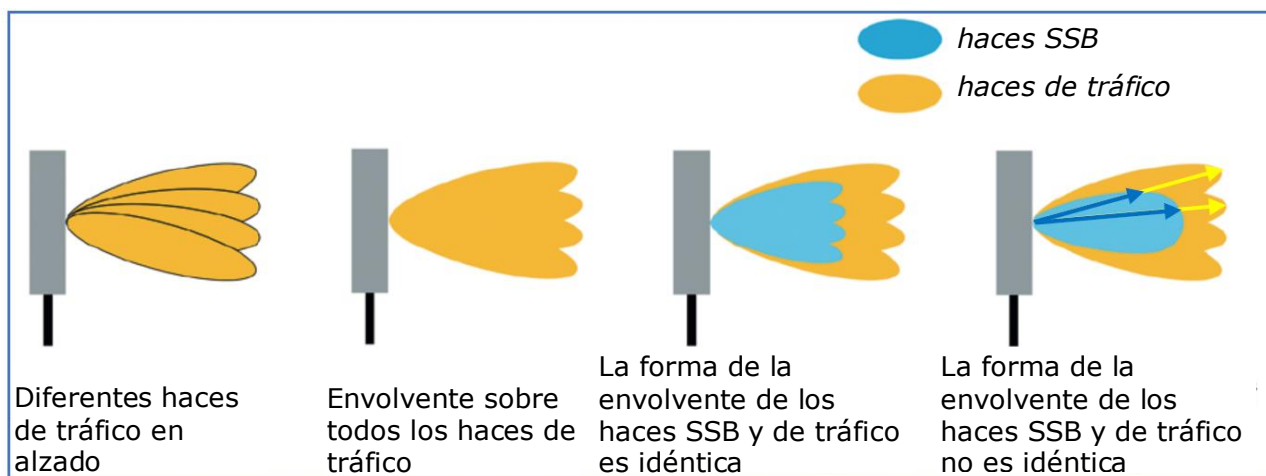


Fig. 14: Forma idéntica o diferente de las envolventes de los haces de emisión (= haces de SSB) y de los haces de tráfico; si la forma no es idéntica, la relación entre SSB y el haz de tráfico no es constante, sino que depende de la dirección (véanse las longitudes de las flechas en la imagen del extremo derecho) [28]

Otro problema grave es que las envolventes del haz de SSB y del haz de tráfico no suelen tener la misma forma. Esto significa que la relación de las intensidades del haz de SSB (responsable de la inmisión mínima) y del haz de tráfico (que determina la inmisión máxima a plena carga) no es constante, sino que depende de la dirección (véase la Fig. 14). Si se quiere extrapolar la medición de la inmisión mínima del haz de SSB a la inmisión máxima del haz de tráfico, entonces hay que tener en cuenta la diferencia de las envolventes de los dos haces en función de la dirección.

Esto significa que hay que determinar los ángulos horizontal y vertical desde el punto de medición hasta el centro de la antena con un instrumento de medición óptico adecuado, conocer las envolventes del haz de SSB y del haz de tráfico, que dependen del tipo de antena respectivo, y, además, la orientación de la antena 5G en el espacio. Aunque la persona que realiza las mediciones puede determinar por sí misma

los dos ángulos de la antena con un instrumento de medición adecuado -que, sin embargo, casi nunca se encuentra en los equipos de medición de alta frecuencia típicos-, depende de la información del operador de la red para conocer las características direccionales de la antena y su orientación.

Para un tratamiento más detallado del tema "tecnología de medición 5G", se pueden consultar las contribuciones del autor " Mediciones de inmisión con dispositivos de medición de banda ancha de la técnica de medición en bioconstrucción " [28], así como los aspectos técnicos y de medición generales que se presentan en el proyecto de la nueva directriz de la Asociación Alemana de especialistas en bioconstrucción (Berufsverbandes Deutscher Baubiologen, VDB) "5G NR" [31].

Una propuesta de extrapolación de la medición del haz de SSB a la intensidad máxima en el tráfico teniendo en cuenta la dependencia angular de la antena 5G, se da en el bastante complejo Documento del METAS (Instituto Federal Suizo de Metrología) "Informe técnico: Método de medición para estaciones base 5G-NR en la gama de frecuencias de hasta 6 GHz" [32]; explicaciones adicionales sobre este tema han sido publicadas por la Oficina Federal del Medio Ambiente de Suiza BAFU en [33].

La variabilidad y flexibilidad de las estaciones base de 5G NR, anteriormente desconocida.

El estándar 5G NR abre una variabilidad y flexibilidad sin precedentes en cuanto a las posibilidades de aplicación en los sistemas de radiocomunicaciones móviles, gracias a una gran cantidad de parámetros técnicos que precisamente no facilitan la comprensión de su funcionamiento:

- Configuración 5G Stand-alone (SA)/5G Non stand-alone (NSA): Especialmente al principio del despliegue, la tecnología 5G NR se combina a menudo con las estaciones base LTE ya existentes. En esta solución 5G Non stand-alone (NSA), a través de la estación base 5G solo se transmiten los datos de tráfico de los/as usuarios/as, mientras que la estación LTE, empleadas como "maestras" (master), transmite los datos de usuarios/as y las señales de control; la "maestra" está conectada a la red central LTE de nivel superior. En la solución 5G Stand-alone (SA), la estación base 5G NR trabaja por sí sola y está conectada a la red central 5G.
- Velocidades de datos variables a través de una transmisión de datos más rápida o más lenta, adaptada a las capacidades del terminal 5G.
- Anchuras de banda variables, adaptadas a las capacidades del terminal 5G; es decir, la anchura de banda de la señal ya no es fija como con 2G - 4 G, sino que puede variar enormemente.
- A través de la partición del ancho de bandas (Bandwidth Part, BWP) es posible la mezcla de anchos de banda para diferentes dispositivos finales 5G.
- En frecuencias inferiores a 2,6 GHz con antenas sectoriales convencionales sin MIMO masivo: 5G NR puede transmitirse simultáneamente mezclado con LTE en el mismo canal de frecuencia (DSS - Dynamic Spectrum Sharing); Para más detalles, véase el apartado " Alcanzar los objetivos con las nuevas y viejas frecuencias".
- La "agregación de portadoras" (Carrier Aggregation) es posible en el caso de gran demanda de ancho de banda; Para más detalles, véase el apartado " Alcanzar los objetivos con las nuevas y viejas frecuencias".
- SDL (Supplement Downlink Band) para requisitos de gran ancho de banda en el enlace descendente es posible; para más detalles, Para más detalles, véase el apartado " Alcanzar los objetivos con las nuevas y viejas frecuencias".

En cuanto a las características de la señal, por lo demás diferentes, en los procedimientos dúplex FDD (no tiene que ser pulsado, pero puede) y TDD (debe ser siempre pulsado), surge la siguiente "curiosidad" con 5G NR:

En cuanto a la "claridad" de la pulsación a través de los canales de control de la estación base (PSS, SSS, PBCH)⁷, 5G NR se comporta de la misma manera que LTE, con la que está estrechamente relacionada: En el modo de reposo (sin carga), la pulsación a través del control los canales de control es muy clara. A

⁷ Señal de sincronización: PSS (señal de sincronización primaria), SSS (señal de sincronización secundaria). PBCH: Physical Broadcast Channel, Este canal transporta información básica sobre la red.

medida que la carga aumenta, los espacios de tiempo entre los canales de control se llenan de tráfico hasta que prácticamente no se detectan pulsaciones.

Diferencia entre 5G NR y LTE:

- Con LTE, las señales de control de RS (señal de referencia) también se envían regularmente a intervalos cortos (mucho más cortos que los intervalos entre PSS, SSS y PBCH) y a lo largo de todo el ancho de banda de la señal, lo que no existe de esta manera con 5G NR. Por lo tanto, sólo con LTE se puede ver la amplitud del espectro de la señal mediante el análisis del espectro, incluso en modo inactivo; con 5G NR esto no es posible. En el modo inactivo del 5G NR solo es visible el ancho del SSB (que consiste en un bloque de PSS, SSS y PBCH). El ancho de banda de la señal sólo es visible si se llena completamente de tráfico.
- De estas propiedades se deduce que con 5G NR no importa en absoluto en cuanto al carácter del pulso si el equipo está operando con TDD o FDD cuando está en reposo o sólo operando con una carga ligera; el patrón de pulso a través de las SSD entonces se ve exactamente igual con TDD y FDD. Y esta pulsación no tiene nada que ver con el TDD, ya que ocurre exactamente igual con el FDD. Sólo cuando el sistema está muy utilizado y los tiempos entre las SSB se llenan de tráfico se ve una diferencia entre FDD y TDD. Con FDD el tráfico es continuo, con TDD se interrumpe periódicamente al ritmo de 50Hz. Entonces, el tráfico a través de TDD se pulsa a 50 Hz, al igual que las SSB. Para una consideración más profunda, consulte [31].

Espectros y cursos temporales de 5G NR

Debido a la gran variabilidad de los parámetros técnicos en la 5G NR, la ocupación del espectro en un canal y, por tanto, la aparición en el análisis del espectro pueden resultar muy diferentes. Esto se aplica tanto a los sistemas con formación de haces activa como a los que no la tienen.

Los siguientes ejemplos, que fueron medidos en diferentes momentos en la misma estación base, lo ilustran claramente (Figs. 15 - 19). Esta es una estación base de la Telekom alemana en el canal de 90 MHz de ancho 3,61 – 3,70 GHz; el centro del canal está en 3,655 GHz.

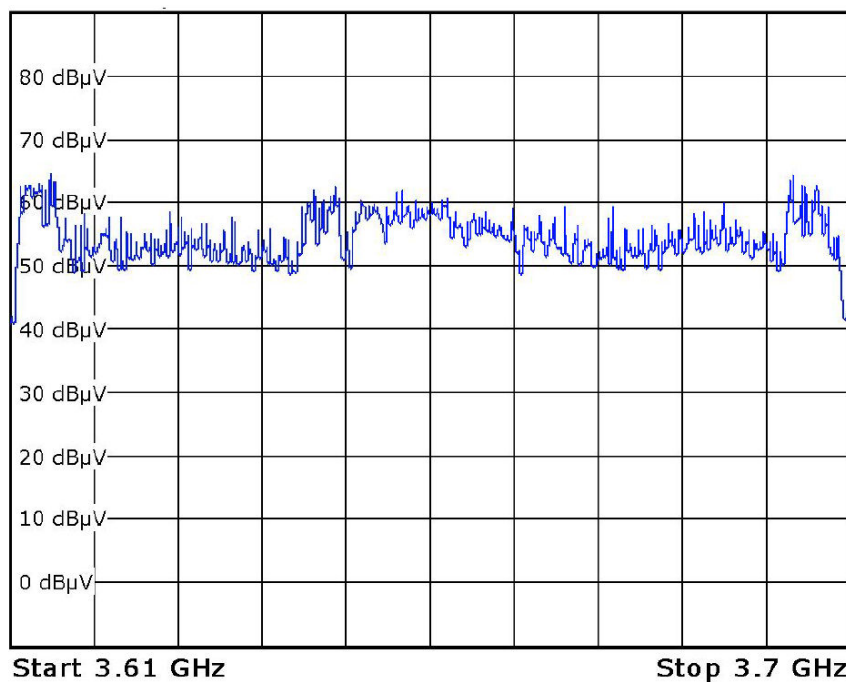


Fig. 15: El ancho de banda del canal de 90 MHz (de 3.610 MHz a 3.700 MHz) puede ser utilizado por la señal hasta un máximo del 95 % (85,5 MHz), como en este caso

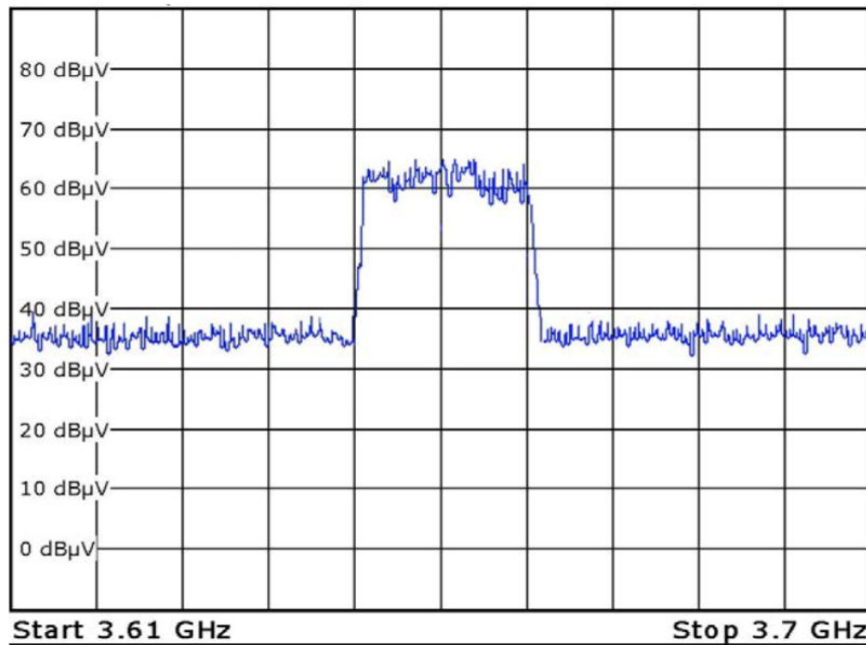


Fig. 16: En este momento, sólo están activos los terminales con un nivel menor de exigencias en cuanto a la capacidad de transmisión y ancho de banda; la estación base se adapta automáticamente a los requisitos de ancho de banda de los dispositivos terminales.

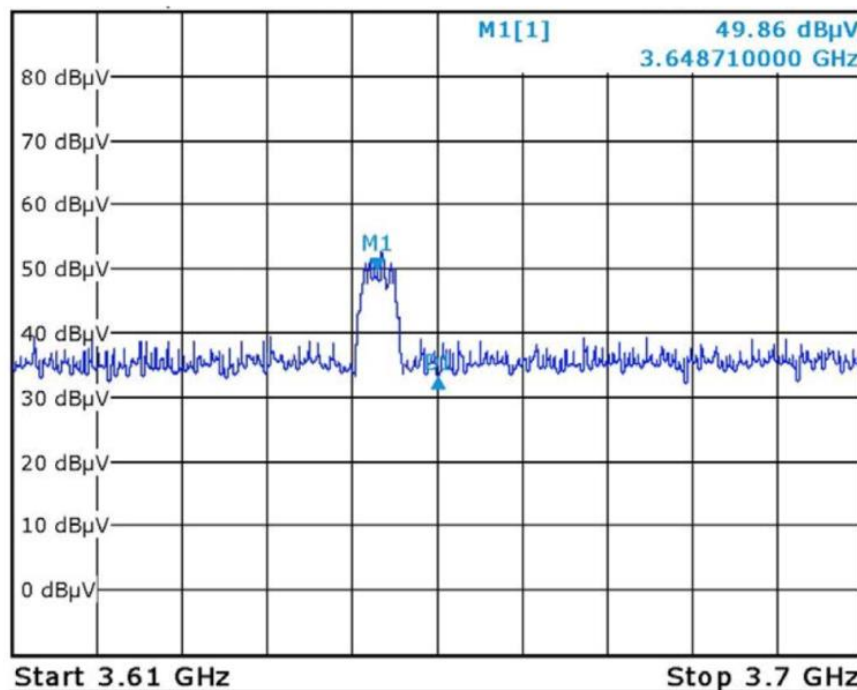


Fig. 17: Aquí sólo están activas las señales de sincronización independientes de la carga de tráfico (la señal de sincronización primaria (Primary Synchronization Signal, PSS) y la señal de sincronización secundaria (Secondary Synchronization Signal, SSS), que se transmiten permanentemente a intervalos de 50 Hz, y el canal de transmisión física (Physical Broadcast Channel, PBCH). Estas señales se transmiten juntas en el bloque de señales de sincronización (SSB) y constituyen la carga base cuando no hay tráfico de datos (Traffic) sobre la estación base encontrándose el sistema para decirlo así, en estado de inactividad.

Normalmente, el bloque de señales de sincronización (SSB) no se encuentra en medio del canal, sino fuera de él. En este ejemplo, el centro del canal se encuentra en 3,655 GHz, mientras que el centro del SSB es 3,64871 GHz; por lo tanto, el desplazamiento de la frecuencia está justo por debajo de 6,3 MHz.

Para un canal con un ancho de banda de 90 MHz, el SSB tiene 7,2 MHz de ancho, es decir, ocupa sólo el 8,4 % del ancho de banda total de la señal, o en otras palabras: el ancho de banda máximo de la señal es poco menos de 12 veces el ancho del SSB.

Si ahora también se tiene en cuenta que

- el SSB se irradia en un solo plano de polarización, pero el tráfico se irradia en dos planos ortogonales, de modo que la densidad de radiación medida para el SSB debe duplicarse (+ 3 dB), y
- el nivel de la carga de tráfico puede ser hasta 10 veces (+10 dB) el nivel del SSB cuando el Beam Forming está activo en el haz principal del haz de tráfico

para los sistemas con Beam Forming Activo hay una diferencia en la densidad de radiación entre inactivo (sólo SSB, sin tráfico) y plena carga (máximo ancho de banda, máximo nivel de tráfico) en un punto de medición de 240 veces ($12 \times 2 \times 10 = 240$)! Para las estaciones base sin Beam Forming Activo, el factor sigue siendo 24, que también es muy alto comparado con el factor típicos de 4 (GSM, LTE) o 6 (UMTS) para los sistemas de telefonía 2G - 4G.

La Fig. 18 muestra las señales SSB con Beam Forming Activa, y con el tráfico de datos a la izquierda y a la derecha de ellas, cuyo nivel puede ser hasta 10 dB mayor que el nivel del SSB; esto hace que las mediciones sean mucho más difíciles, ya que las señales SSB se pierden fácilmente en el tráfico.

La Fig. 19 muestra claramente la estructura regular de los pulsos cada 20 ms, lo que corresponde a una frecuencia de repetición de pulsos de 50 Hz.

Los 50 Hz también son claramente audibles cuando la señal de 5G NR es sometida a un análisis acústico empleando un instrumento de medición de banda ancha utilizado habitualmente en la técnica de medición en bioconstrucción. Algunos ejemplos sonoros se pueden escuchar en [27].

En [30] se encuentra información detallada y más profunda sobre la medición de la banda ancha de las señales de 5G NR, y, en [31], sobre la técnica de 5G NR y la técnica de medición utilizando el análisis del espectro.

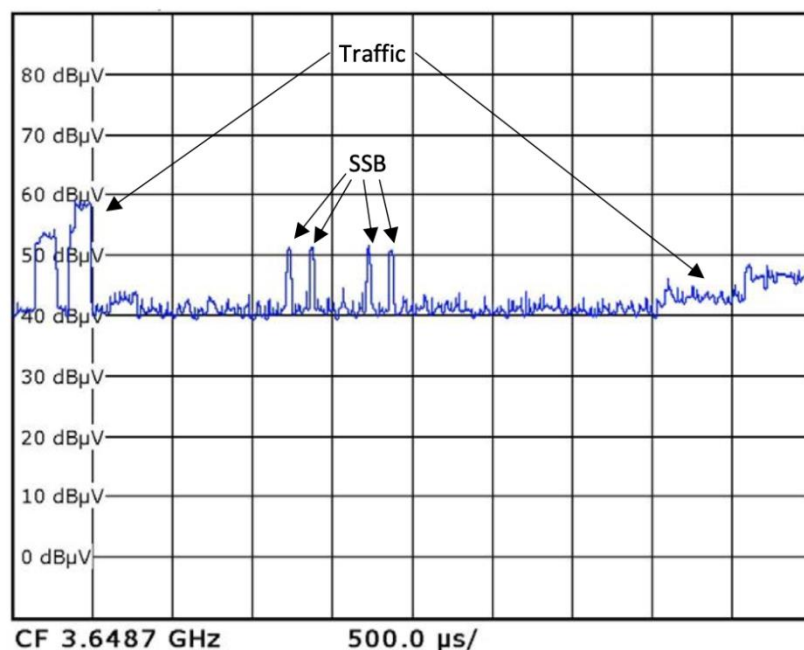


Fig. 18: Desarrollo temporal de la señal de 5G NR cuando el analizador está sintonizado en el centro del SSB (frecuencia central CF 3,6487 GHz, ver Fig. 17), con una escala de tiempo de 5 ms o 500 μ s por división.

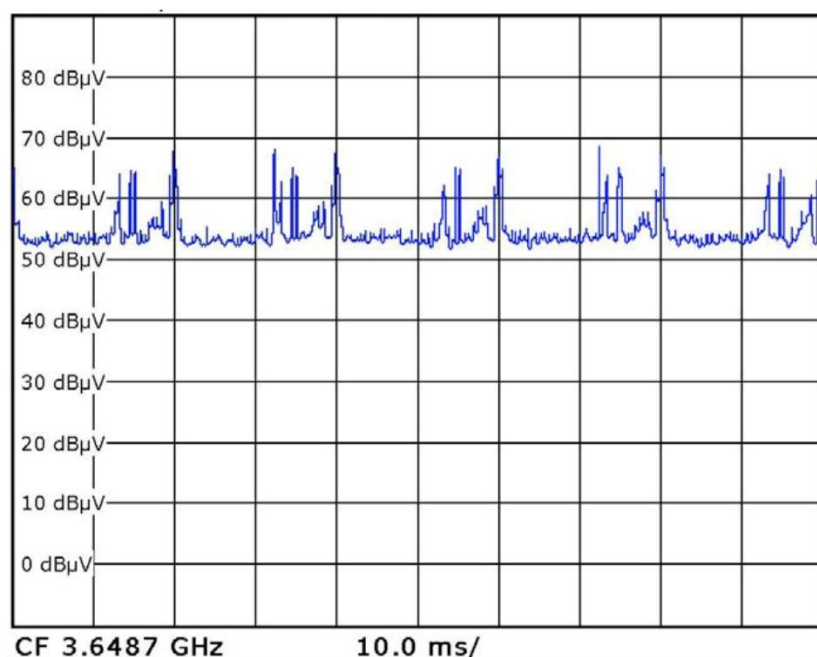


Fig. 19: Desarrollo temporal de la señal de 5G NR con una resolución temporal más amplia: escala de tiempo de 100 ms o 10 ms por división.

5G vía satélite

En Internet circula mucha información acerca de que, paralelamente a los sistemas terrestres 5G, se está estableciendo actualmente una adicional cobertura 5G completa a través de decenas de miles de satélites, de modo que los seres vivos de la superficie terrestre serán "asados" por estos satélites en un futuro próximo. En los titulares de las noticias encontramos particularmente el sistema de satélites "Starlink" del jefe de Tesla y multiempresario Elon Musk, que también es el operador de la empresa de lanzamiento de cohetes comerciales más exitosa "SpaceX".

No obstante, desde hace varios años, o incluso desde hace diez años, ya existen - internacionalmente y a escala mundial - más de 30 proveedores de servicios de telecomunicaciones vía satélite, como Inmarsat, Iridium, Thuraya, sky DSL y STARDL.

El uso de los sistemas de satélites requiere teléfonos o terminales especiales desarrollados para el respectivo sistema. Originalmente, esto requería terminales con antenas bastante grandes. Sin embargo, muchos teléfonos vía satélite son ahora apenas más grandes que los teléfonos inteligentes terrestres habituales para las comunicaciones móviles de 2G - 5G, pero a menudo tienen antenas ligeramente más grandes y más visibles. Se les aplican los mismos coeficientes de absorción específicas (SAR) que a los teléfonos móviles terrestres inteligentes. Debido a la gran distancia y a la alta atenuación del trayecto atmosférico en las frecuencias utilizadas por encima de 10 GHz, la intensidad del campo de recepción en la superficie terrestre es muy baja. Por consiguiente, el funcionamiento sólo es posible en el exterior (similamente a la recepción de los satélites de televisión); sin antena exterior la señal no llega al interior de edificios.

Como se muestra en la contribución de la 10ª conferencia EMV de la Asociación Alemana de especialistas en bioconstrucción VDB " telefonía móvil vía satélite: deseo y realidad " [30], las densidades de radiación en la superficie terrestre en el haz principal causadas por los satélites de comunicación son inferiores a 5 milésimas de $\mu\text{W}/\text{m}^2$ (5 milésimas de microvatio por metro cuadrado = $0,005 \mu\text{W}/\text{m}^2$).

Estos valores están muy por debajo de lo que ocasionan los servicios de radio terrestre habituales y deben considerarse absolutamente no significativos incluso según las normas más estrictas de la bioconstrucción y la medicina medioambiental.

Una consideración profunda del tema se da en el artículo del autor con el título " Telefonía 5G e Internet por satélite - ¿la parrilla de radiación desde arriba?" [35].

El “Internet de las Cosas” (IoT) es más que 5G

Además de la tecnología 5G, que está diseñada para las mayores velocidades y volúmenes de datos, el número de aplicaciones basadas en radiofrecuencias para el "Internet de las Cosas" (Internet of Things, IoT) y la "Smart X" (por ejemplo, Smart Home, Smart City, Smart Metering para la electricidad, el agua, el gas, la calefacción y otras aplicaciones que antes eran casi inimaginables), que sólo transmiten esporádicamente cantidades pequeñas y diminutas de datos a intervalos más largos, está aumentando rápidamente en la actualidad y seguirá haciéndolo en el futuro. Sin embargo, con un gran número de "participantes" que no son seres humanos sino sensores y dispositivos técnicos (los llamados M2M = comunicación de máquina a máquina). En unos pocos años, se espera que en todo el mundo haya terminales de IoT en un número alrededor de los mil millones. Con este fin - aún hoy - las actuales redes de radiocomunicaciones móviles de 2G y 4G por debajo de 1 GHz serán utilizadas por medio de servicios especiales de transmisión, tales como:

- NB IoT (LTE Narrowband IoT), una variante de LTE con un ancho de banda de sólo 200 kHz y hasta 50.000 terminales por célula de radio,
- LTE-M (LTE para máquinas, también conocido como LTE-M2M (LTE Machine-to-Machine) o LTE-MTC (LTE Machine-Type Communications), una variante de LTE con un ancho de banda de 1,4 MHz y hasta 20.000 terminales por célula de radio, con un alcance de hasta 2,5 km o incluso 5 km,
- EC-GSM-IoT (Extended Coverage GSM IoT), una variante de GSM con el típico ancho de banda de 200 kHz, con un alcance de hasta 15 km.

Además, se están instalando a nivel municipal otros sistemas de radio de IoT en las bandas ISM/SRD sin licencia de 433 MHz y 860-870 MHz, en paralelo a los sistemas de radio móviles existentes, a menudo bajo la dirección de proveedores de energía locales, como por ejemplo:

- LoRaWAN (Long Range Wide Area Network for IoT), con un alcance hasta más de 10 km,
- Sigfox LPWAN (Sigfox Low-Power Wide Area Network for IoT), señal de banda ultra estrecha, hasta 1 millón de terminales por célula de radio, su alcance en el espacio abierto alcanza 30 a 50 km, en ciudades 3 a 10 km.

Una descripción detallada de la funcionalidad y de la tecnología de medición de inmisión de los sistemas radioeléctricos de IoT antes mencionados se da en [36]. [37] describe la funcionalidad y la tecnología de medición de la LoRaWAN.

Para la mayoría de las aplicaciones de IoT y Smart X, las velocidades de datos enormemente altas y los tiempos de latencia extremadamente cortos que se mencionan como ventajas de la tecnología 5G no son en absoluto necesarios. Esto corresponde al perfil de rendimiento de un coche de carreras de Fórmula 1. Sin embargo, el IoT no necesita todo esto, sino que tiene requisitos que son más como conducir un tractor con dos remolques completamente cargados. El trasfondo común, por supuesto, es que los 900 CV pueden utilizarse tanto para ir rápido y esprintar con un coche lo más ligero posible como para una conducción lenta con transporte masivo de muchas remolachas.

Atenuación de alta frecuencia de los edificios en las frecuencias 5G

El probado y extraordinario "clásico" sobre el tema del apantallamiento de alta frecuencia es el trabajo estándar del Prof. Peter Pauli y el Dr. Dietrich Moldan "Reducción de la radiación de alta frecuencia en la construcción: Materiales de construcción y materiales de blindaje" [38]. Este libro sirve como manual de referencia para la planificación, especialistas en mediciones y personas interesadas en tratar de manera profunda y profesional los diversos aspectos del blindaje de alta frecuencia. En la actual 3ª edición contiene curvas detalladas para la atenuación de RF de aprox. 150 productos en el rango de frecuencia 300 MHz - 10 GHz, medidas en el laboratorio.

Dado que en, el futuro, la tecnología 5G está destinada a ser utilizada también en el rango de frecuencias FR2, de 24 GHz a 53 GHz, surge la pregunta sobre el comportamiento de atenuación en estas frecuencias extremadamente altas en el rango de ondas milimétricas (ondas mm).

Como complemento a la obra estándar mencionada arriba, para la 10ª conferencia de EMV de la VDB e.V., celebrada el 17 de mayo de 2019, se realizaron explícitamente unas mediciones del comportamiento de atenuación de 26 materiales de construcción y de blindaje en el rango de frecuencias de 24 GHz - 40 GHz. Los resultados se publicaron en las actas de la 10ª conferencia de EMV bajo el tema "Blindaje de las ondas de alta frecuencia de 5G" [39].

5G en cinco capítulos

El autor ha tratado el extenso y polifacético tema del "5G New Radio " en un total de cinco artículos que fueron publicados conjuntamente bajo el título general de "5G en cinco capítulos" en "baubiologie magazin" del Instituto de Bioconstrucción y Sostenibilidad IBN (Rosenheim) [4].

Este artículo sirve como una introducción orientadora al tema. En los siguientes artículos se presentan aspectos más detallados:

- 5G Ojos que no ven, corazón que no siente: el mobiliario urbano como escondite para Small Cells
- Telefonía 5G e Internet por satélite: ¿la parrilla de radiación desde arriba?
- 5G Mediciones de inmisión con dispositivos de medición de banda ancha de la técnica de medición en bioconstrucción
- 5G NR Aspectos técnicos y metrológicos (proyecto de la nueva directriz de la VDB "5G NR")

Bibliografía y enlaces de Internet

- [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 Overview
- [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 Trägerinfrastrukturen 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-kommunaletraegerinfrastrukturen-ausbau-5g.pdf?__blob=publicationFile
 und
<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/ag-digitale-netze-mitnutzungspotentialekommunale-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=q4ITgmRYau4>
- [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-multifunktionsgehaeuse-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; Juli 2020;
<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/>
- [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, Junio 2021

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