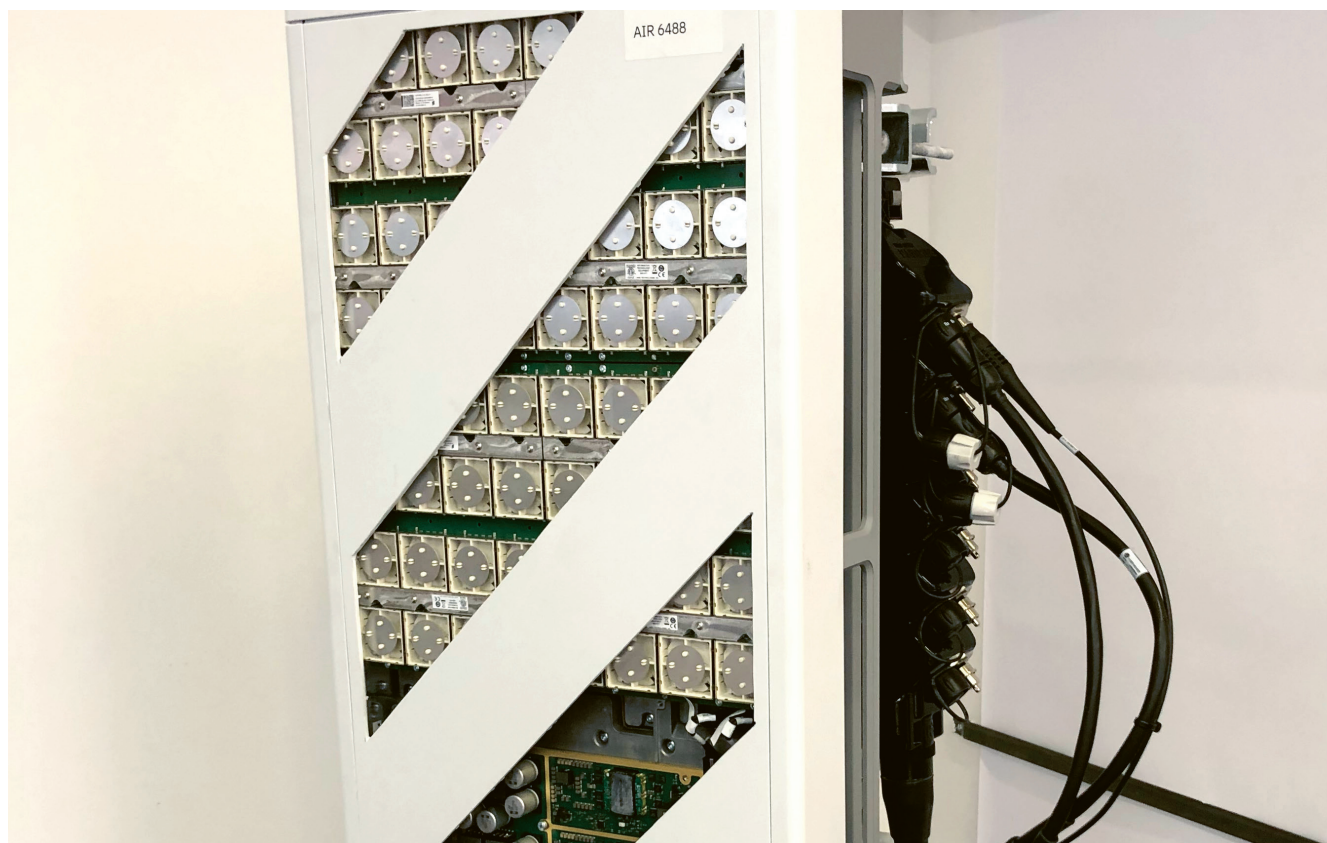




Adaptive Antenne mit aufgeschnittener Abdeckung: Gut sichtbar sind die einzelnen Elemente.

Adaptive Antennen für 5G

Einsatz, Herausforderungen und Exposition | Antennen, die ihre Senderichtung anpassen, sind nichts Neues. Bei der fünften Mobilfunkgeneration (5G) werden adaptive Antennen nun erstmals breit im Mobilfunk eingesetzt. Wie funktionieren diese Antennen und warum braucht 5G sie? Welche Herausforderungen bringen sie mit sich und wie steht es um die Immissionen?

HUGO LEHMANN

Seit dem Siegeszug der Smartphones und der damit verbundenen Omnipräsenz des mobilen Internets werden in Mobilfunknetzen immer mehr Daten übertragen. So wurden im Mobilfunknetz der Swisscom 2018 in einer Woche gleich viele Daten übertragen wie 2011 im ganzen Jahr. Nach dem Ericsson Mobility Report 2019 wird sich das mobile Datenvolumen in Westeuropa von heute bis 2025 nochmals vervierfachen.[1] Um dieser Datenflut Herr zu werden, müssen die Mobilfunknetze stetig angepasst werden.

Anfang der 1990er-Jahre, als die GSM-Technologie – oder auch zweite Generation des Mobilfunks (2G) – in der Schweiz eingeführt wurde, war ein Kanal gerade einmal 0,2 MHz breit. Das reichte aus, um Sprache in verständlicher Qualität und kurze Textnachrichten zu übertragen. Bei den Nachfolgetechnologien 3G und 4G waren bereits 5 MHz resp. 20 MHz typisch, d.h. 25- und 100-mal breitere Kanäle als bei GSM. Um den Hunger nach Daten stillen zu können, ist heute bei 5G eine Bandbreite von 100 MHz Standard.

Zusammenhängende Frequenzbänder dieser Breite gibt es aber erst bei höheren Frequenzen. Deshalb wurde bereits 2015 an der Weltradiokonferenz ein Frequenzband bei 3,5 GHz definiert, welches seit 2019 in der Schweiz für den Mobilfunk zur Verfügung steht und für 5G genutzt wird. Die Weltradiokonferenz bestimmte 2019 weitere Bänder im Millimeterwellenbereich (oberhalb von 24 GHz), welche notwendig sein werden, um die von 5G versprochenen höchsten Datenraten bis 20 Gbit/s überhaupt erzielen zu können.

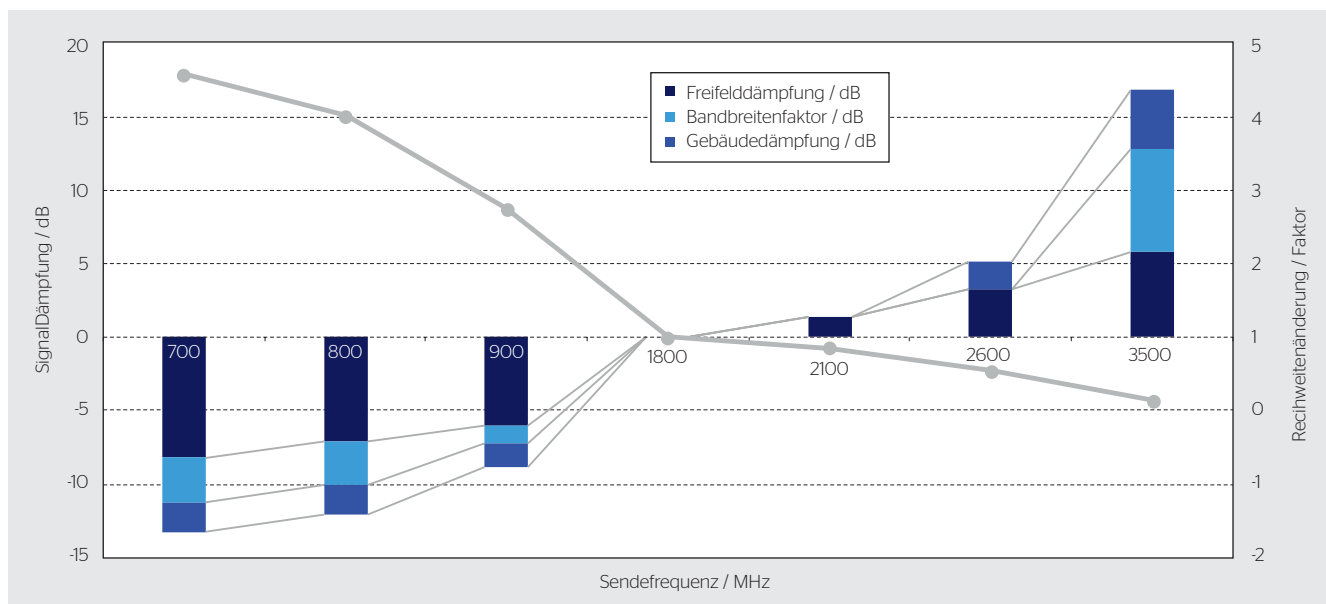


Bild 1 Streckendämpfung, Bandbreitenfaktor (für typische Träger der jeweiligen Sendefrequenz) und zusätzliche Gebäudedämpfung für verschiedene Sendefrequenzen im Vergleich zu 1800-MHz-Signalen (Balkendiagramm, linke Skala). Die graue Kurve beschreibt die daraus resultierende Reichweite (rechte Skala).

Warum braucht es adaptive Antennen für 5G?

Die Bandbreite ist das eine, wie steht es aber mit den Übertragungseigenschaften dieser Frequenzen? Funktechnisch gesehen haben höhere Frequenzen – auch schon bei 3,5 GHz – schlechtere Übertragungseigenschaften als die bisher im Mobilfunk genutzten Frequenzen unter 3 GHz. Die Freifeldämpfung ist ein Mass für die Signalstärke am Empfänger für eine Trägerfrequenz in einer gegebenen Distanz. Für höhere Frequenzen steigt dieses Mass an, was sich in einer geringeren Reichweite der Signale äussert. Aber bei höheren Frequenzen ergibt sich auch eine höhere Dämpfung durch Gebäudehüllen oder Hindernisse. Das bedeutet, die Signale dringen weniger gut in Gebäude ein oder werden durch Bäume abgeschwächt. Dasselbe gilt übrigens auch für unseren Körper – höhere Frequenzen werden im Wesentlichen an der Körperoberfläche absorbiert und innere Organe werden quasi nicht exponiert. Tiefe Frequenzen dringen besser in Gebäude oder auch unseren Körper ein. Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Effekt ist durch die steigende Bandbreite gegeben. Da die Sendeleistung auf ein grösseres Frequenzband verteilt wird, kommt beim Empfänger weniger Nutzsignal an. Diese Zusammenhänge sind in **Bild 1** bezogen auf eine Sendefrequenz von 1800 MHz schematisch dargestellt.

Bei noch höheren Frequenzen der mm-Wellen – in 5G wird dieser Terminus bereits ab 24 GHz benutzt – sind Dämpfungseigenschaften nochmals stärker ausgeprägt. Hier wird zudem auch die Dämpfung durch Regen, Nebel und Belaubung grösser. Daher werden mm-Wellen wohl nur bei direkter Sichtverbindung sinnvoll eingesetzt werden können. So werden diese Frequenzen bei der Versorgung von Orten mit sehr grosser Nutzerdichte im Vordergrund stehen oder auch für drahtlose Hausanschlüsse eingesetzt werden. Letzteres wird etwa in der USA bereits gemacht.

Um diese schlechteren Ausbreitungsbedingungen höherer Frequenzen zu überbrücken, werden in 5G adaptive Antennen eingesetzt, dies sowohl im 3,5 GHz Band wie auch (der-einst) bei mm-Wellen. Mit solchen Antennen kann das Signal in die Richtung des Nutzers fokussiert und so die schlechten Übertragungseigenschaften kompensiert werden. Man spricht auch von Beamforming oder Massive MIMO. Durch die Konzentration des Funksignales auf einen räumlich begrenzteren Bereich werden auch Störungen im Mobilfunknetz reduziert, was zu weniger Rauschen und besseren Nutzsignalen führt. Zudem führt die Fokussierung auch dazu, dass die Signale mit weniger elektrischer Energie gezielter übermittelt werden können.

Wie funktionieren adaptive Antennen?

Das Prinzip der adaptiven Antennen ist fast so alt wie die drahtlose Kommunikation selbst und basiert auf dem physikalischen Prinzip der Überlagerung und Interferenzeigenschaften von Wellenphänomenen. So hat Karl Ferdinand Braun 1909 in seinem Nobelpreisvortrag [2] beschrieben, wie er bereits 1905 über die Veränderung der Phasen der Signale in verschiedenen Antennen die Senderichtung einer Antenne verändert hat. Diese Technik wird schon seit geraumer Zeit für Radaranwendungen und in der Radioastronomie eingesetzt. In den Mobilfunknetzen wurde bis heute auf diese komplexere und teurere Technologie verzichtet. Durch die Nutzung von höheren Frequenzen und erleichtert durch den technologischen Fortschritt stellen adaptive Antennen bei 5G nun jedoch einen wesentlichen Baustein der Mobilfunknetze dar.

Solche – manchmal auch als Smart-Antennen bezeichnete – Antennen bestehen aus einer Vielzahl einzeln angesteuerter Antennenelemente (**Einstiegsbild**). Typischerweise sind etwa 64 Elemente, von denen jedes seinen eigenen Verstärker hat, in Spalten und Zeilen angeordnet. Durch gezieltes Einstellen der Phase kann die Senderichtung verändert werden, ohne dass sich die Antenne oder ihre Elemente physisch bewegen müssen. Je mehr

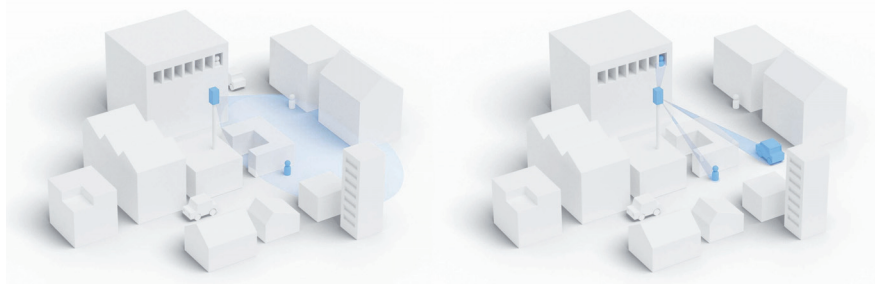


Bild 2 Links: Bei konventionellen Antennen werden die Signale stets in die ganze Funkzelle geschickt. Rechts: Adaptive Antennen senden die Signale gezielt zum Nutzer.

Antennenelemente gleichzeitig zusammen koordiniert werden, umso stärker gebündelt ist das Sendesignal und ein kleineres Volumen wird ausgeleuchtet.

Im 5G-Standard sind derzeit verschiedene Realisierungen von Beamforming vorgesehen. In der einfacheren Variante wird für den Nutzer aufgrund der Charakteristik des vom Mobilgerät empfangenen Referenzsignals die bestmögliche vorgegebene Antennenkonfiguration ausgewählt. Vordefinierte Einstellungen, Precodings genannt, bestimmen die Phasenverschiebung an den einzelnen Antennenelementen und definieren den zu erzeugenden Beam. Die Precodings sind in einer Tabelle, dem sogenannten Codebook im 5G-Standard, aufgelistet.[3] Man spricht daher von einem Codebook basierten Beamforming mit fest vorgegebenen Konfigurationen.

Codebook-Verfahren sind zwar einfacher, nutzen aber nicht alle Informationen, die verfügbar sind, und schöpfen das Potenzial adaptiver Antennen nicht gänzlich aus. Eine bessere Anpassung der Antennen an die Bedürfnisse der Nutzer kann dann erreicht werden, wenn das Endgerät ein Testsignal aussendet, das die Basisstation misst. Da der Weg vom Endgerät zur Basisstation den gleichen Ausbreitungsbedingungen unterworfen ist wie der Signalpfad von der Mobilfunkantenne zum Handy, kann die Basisstation das bestmögliche Signal berechnen und individuelle Anpassungen an der Konfiguration der adaptiven Antenne vornehmen. Man spricht hier auch von reziproken Verfahren.

Adaptive Antennen und Exposition

Durch die fokussierte Aussendung der Information zum einzelnen Nutzer in der Funkzelle entsteht durch Beamfor-

ming eine höhere Dynamik der ausgesendeten Signale als bei den älteren Mobilfunkstandards. Die Signale werden nur dorthin gesendet, wo sie gebraucht werden. **Bild 2** illustriert die Funktionsweise schematisch für passive und adaptive Antennen. Diese räumliche Diversität führt nicht nur zu kleineren Interferenzen, sondern im zeitlichen Mittel auch zu einer geringeren Exposition als bei älteren Technologien.

Eine Simulation für die Stadt Gent in Belgien zeigt auf, dass ein Massive-MIMO-fähiges Netz bei gleichen Nutzungsszenarien fünfmal weniger Exposition erzeugt als ein 4G-Netz ohne adaptive Antennen.[4] Die Analyse zeigt auch auf, dass die Exposition sinkt, je mehr Elementarantennen eingesetzt werden. Messtechnisch ist dies aufgrund der heute erst entstehenden 5G-Netze noch nicht nachgewiesen, zeigt aber das Potenzial der Technologie auch im Bereich der Expositionsreduktion auf.

Modellrechnungen und Messungen an einzelnen adaptiven Antennen ergeben, dass beim Einsatz von Beamforming in den meisten Fällen nur ein Bruchteil des theoretischen Maximalwertes der Sendeleistung ausgesendet wird.[5] Auch bei guter Verkehrsauslastung und unterschiedlichen Nutzungsszenarien wird über eine Mittelungsdauer von 6 Minuten nie mehr als ein Viertel der theoretischen Maximalleistung ausgesendet. Die Mittelungsdauer von 6 Minuten ist für die Einhaltung der Immissionsgrenzwerte relevant (siehe Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV), Anhang 2, 11 [6]). Diese Simulationen sind durch Messungen der mittleren Sendeleistung über 6 Minuten für Basisstationen mit adaptiven Antennen bestätigt worden.[7]

Zusammenfassend heisst dies, dass die Exposition pro übertragene Informationseinheit mit Beamforming im Vergleich zu heutigen Mobilfunknetzen abnimmt.

Herausforderungen

Neben den oben genannten Vorteilen ergeben sich aber auch Herausforderungen beim Einsatz von adaptiven Antennen: Diese sind einerseits technischer Art, wie etwa die höhere Komplexität smarterer Antennen, und andererseits regulatoriver und kommunikativer Natur.

Heute werden in der Schweiz adaptive Antennen in der Regulation gleich bewertet wie passive Antennen. Es wird davon ausgegangen, dass zu jedem Zeitpunkt die gesamte Leistung in alle Richtungen ausgesendet wird. Dieser Fall tritt aber in der Realität gar nie ein, da die Gesamtleistung der Antenne unter den aktiven Nutzern aufgeteilt wird: Bei zwei gleichzeitig aktiven Nutzern beträgt die Sendeleistung pro Beam je die Hälfte der Maximalleistung. Sind es vier Nutzer, wird je ein Viertel der Maximalleistung in die vier Richtungen gesendet. Bei vielen Nutzern, die räumlich gut verteilt sind, wird die Exposition daher kleiner. Ist andererseits nur ein Nutzer oder mehrere Nutzer in derselben Richtung aktiv, wird zwar die gesamte Leistung in diese Richtung ausgesendet, aber aufgrund der Bündelung der Antennen nicht breit in den gesamten Abdeckungsbereich der Antenne geschickt. Das heisst, in diesem Falle ist die Exposition zwar in Richtung der Nutzer fokussiert, aber im Rest des Funksektors gering. In der Bevölkerung besteht oft eine gewisse Angst, dass die Exposition durch adaptive Antennen im Beam übermässig gross wird. Dabei wird vergessen, dass auch in diesen Beams die relevanten Grenzwerte immer eingehalten werden müssen und somit sichergestellt ist, dass die Immissionen auch in diesem Falle nicht ins befürchtete Unermessliche ansteigen.

Die heutige Regelung mit dem strikten Worst-Case-Ansatz führt zu einer massiven Überschätzung der realistischen Exposition – dies wurde auch vom Gesetzgeber erkannt. Um das Potenzial der adaptiven Antennen besser zu nutzen, wurde die NISV daher bereits am 1. Juni 2019 entsprechend angepasst.

Bei adaptiven Antennen soll die Variabilität der Senderichtungen und der Antennendiagramme berücksichtigt werden. Allerdings ist bisher unterlassen worden, zu definieren, wie dies konkret geschehen soll. Laut dem zuständigen Bundesamt für Umwelt (Bafu) soll weiterhin der Worst-Case-Ansatz berücksichtigt werden.[8] Obwohl diese Regelung, wie das Bafu in einer Information klarstellt, zu einer Überschätzung der Immissionen führt, sträuben sich einige Kantone weiterhin gegen die Bewilligung adaptiver Antennen.

In anderen Ländern werden die offensichtlichen Vorteile von adaptiven Antennen erkannt und bereits in der Bewertung der Exposition berücksichtigt. So kann etwa in Frankreich zur Berechnung der generierten Exposition einer adaptiven Antenne ein Reduktionsfaktor von 30 auf die Leistung berücksichtigt werden.[9] Dies führt zu einer Reduktion der berechneten elektrischen Feldstärke von einem Faktor 5,5, was ziemlich gut der oben erwähnten simulierten Reduktion der Exposition durch adaptive Antennen entspricht.[3] Das heisst, adaptive Antennen können in Frankreich mit einer 30-mal höheren Leistung betrieben werden als in der Schweiz. Dadurch können existierende Mobilfunkstandorte ohne Probleme für 5G mit adaptiven Antennen genutzt werden.

In einer Situation, in der in der Schweiz durch die strengen vorsorglichen Grenzwerte nur noch 2 % der existierenden Standorte für einen Ausbau mit leistungsfähigem 5G benutzt werden können [10], wäre ein solcher Faktor eine Möglichkeit, existierende Standorte besser auszunutzen. Dies ist umso wichtiger, da die Realisierung von neuen Anlagen durch die kritische Haltung in weiten Teilen der Bevölkerung gegenüber 5G und Moratoriumsforderungen in einzelnen Kantonen schwierig, ja nahezu unmöglich, geworden ist. Aus diesen Gründen hat die Telekommunikationsbranche schon 2018 eine Regelung vorgeschlagen, die nicht einen Reduktionsfaktor von 30 wie in Frankreich, sondern einen Faktor 10 vorsieht. Wie bereits erwähnt, würde eine solche Regelung in keiner Weise die Bevölkerung in einem gefährlichen Masse exponieren.

Ein kleines Gedankenexperiment: Würde man den geforderten Reduk-

tionsfaktor von 10 auf die Sendeleistung in der Schweiz anwenden, könnte ein maximales instantanes elektrisches Feld von knapp 16 V/m entstehen. Durch die 6-Minuten-Mittelung würde aber immer der vorsorgliche Grenzwert von 5 V/m eingehalten. Dies könnte man mit einer Software, die international bereits eingesetzt wird, sicherstellen. Mit diesen kurzfristigen Feldstärken von 16 V/m ist die Sicherheit der Bevölkerung gewährleistet. So hat erst kürzlich die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) die Immissionsgrenzwerte für den Frequenzbereich des Mobilfunks (36 – 61 V/m) bestätigt; diese schützen nach ICNIRP vor allen wissenschaftlich fundierten, schädlichen Effekten und nach ICNIRP auch für die Exposition, welche durch 5G generiert wird.[11] Da sich die kurzfristigen Feldstärken immer noch um einen Faktor 2 bis 3 unterhalb des Immissionsgrenzwertes von 61 V/m befinden, der notabene ein zeitlicher Mittelwert ist, würde mit einer solchen Regelung auch dem Vorsorgeprinzip des Schweizer Umweltschutzgesetzes Rechnung getragen.

Abschliessend muss ebenfalls erwähnt werden, dass adaptive Antennen und 5G nicht nur effizienter und mit weniger Immissionen Daten übertragen können, sondern auch ein grosses Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz haben. Können adaptive Antennen mit ihrem vollen Potenzial genutzt werden, müssen in der Schweiz weniger neue Anlagen gebaut werden. Da jede Anlage einen Grundstock an Energie verbraucht, bedeuten weniger Anlagen auch einen geringeren Stromverbrauch. Zudem hat 5G durch die schlanke Signalstruktur ein höheres Stromsparepotenzial als 4G. Insbesondere kann der Einsatz des sogenannten Deep-Sleep-Modus den Energieverbrauch von 5G-Mobilfunkstationen um einen Faktor 9 reduzieren.[12] Setzt man anstelle von LTE die 5G-Technologie zum Welterausbau der Mobilfunknetze ein, könnte man zwischen 50 % bis zu 70 % Energie einsparen. Verglichen mit 2G oder 3G würde der Vergleich nochmals besser für 5G ausschauen.

Ausblick

Die Nutzung adaptiver Antennen ist ein wichtiger Baustein eines leistungsfähigen 5G-Mobilfunknetzes. Die Vorteile

betreffend Flexibilität, Kapazitätsgewinn, nutzerdefinierter und geringerer Exposition sowie reduziertem Stromverbrauch liegen auf der Hand. Die notwendigen Anpassungen in der entsprechenden Verordnung wurden vom Bundesrat schon 2019 vorgenommen. Es fehlen nur noch die entsprechenden Konkretisierungen im Vollzug. Damit die Schweiz auch weiterhin über die weltweit besten Mobilfunknetze verfügt, sollten diese dringend notwendigen Anpassungen zügig in die Hand genommen werden.

Referenzen

- [1] Ericsson Mobility Report, November 2019, www.ericsson.com/4acd7e/assets/local/mobility-report/documents/2019/emr-november-2019.pdf
- [2] Karl Ferdinand Braun, «Electrical oscillations and wireless telegraphy», Nobel Lecture, December 11, 1909, www.nobelprize.org/uploads/2018/06/braun-lecture.pdf
- [3] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 5G; NR; Physical layer procedures for data, ETSI TS 138 214 V15.3.0
- [4] M. Matalatala, M. Deruyck, S. Shikhtantsov, E. Tanghe, D. Plets, S. Goudos, K.E. Psannis, L. Martens, W. Joseph, «Multi-Objective Optimization of Massive MIMO 5G Wireless Networks towards Power Consumption, Uplink and Downlink Exposure», Appl. Sci. 2019, 9 (22), 4974.
- [5] B. Thors, A. Furuskär, D. Colombi, C. Törnevik, «Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO», IEEE Access, vol. 5, pp. 19711-19719, 2017.
- [6] Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV), 814.710.
- [7] Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radio-communication base stations for the purpose of evaluating human exposure, IEC TR 62669 ED2 2018, Tabelle 15.
- [8] Bundesamt für Umwelt, Informationen zu adaptiven Antennen und 5G (Bewilligung und Messung), www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektromog/fachinfo-daten/informationen_adaptive_antennen_5g.pdf.download.pdf/Informationen_zu_adaptiven_Antennen_und_5G_2020_d.pdf, 31. Januar 2020.
- [9] Agence nationale des fréquences (ANFR), Lignes directrices nationales sur la présentation des résultats de simulation de l'exposition aux ondes émises par les installations radioélectriques www.anfr.fr/fileadmin/medias/theses/documents/5G/consultation/consultation-5G-Lignes-directrices-nationales.pdf, Octobre 2019.
- [10] Bericht Mobilfunk und Strahlung, Herausgegeben von der Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung im Auftrag des UVEK, www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektromog/fachinfo-daten/bericht-mobilfunk-und-strahlung.pdf.download.pdf/Bericht_MobilfunkStrahlung.pdf, 28.11.2019.
- [11] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP); www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPPrfgdl2020.pdf & www.icnirp.org/cms/upload/presentations/ICNIRP_Media_Release_110320.pdf, 11. März 2020
- [12] P. Frenger, R. Tano, «More Capacity and Less Power: How 5G NR Can Reduce Network Energy Consumption», 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), Kuala Lumpur, Malaysia, 2019, pp. 1-5.



Autor

Dr. Hugo Lehmann ist Leiter des Kompetenzcenters Elektromagnetische Felder.
→ Swisscom (Schweiz) AG, 3050 Bern
→ hugo.lehmann@swisscom.com