

Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 111 (2020)
Heft: 6

Artikel: Adaptive Antennen für 5G = Antennes adaptives pour la 5G
Autor: Lehmann, Hugo
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-914736>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

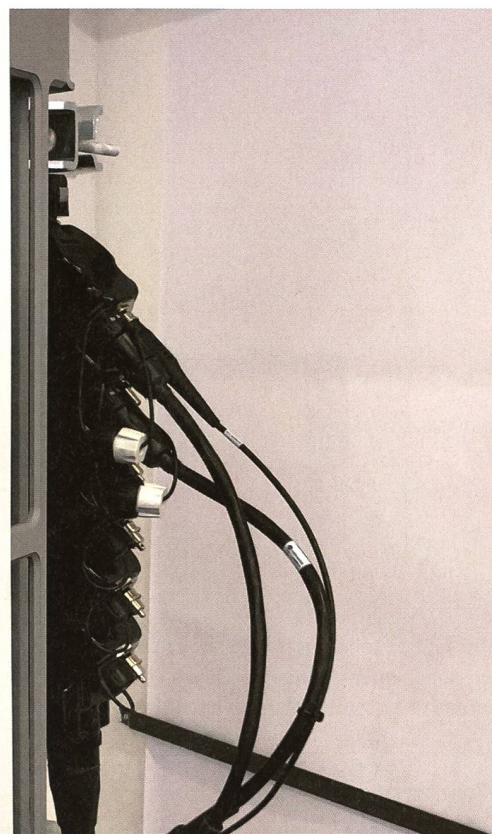
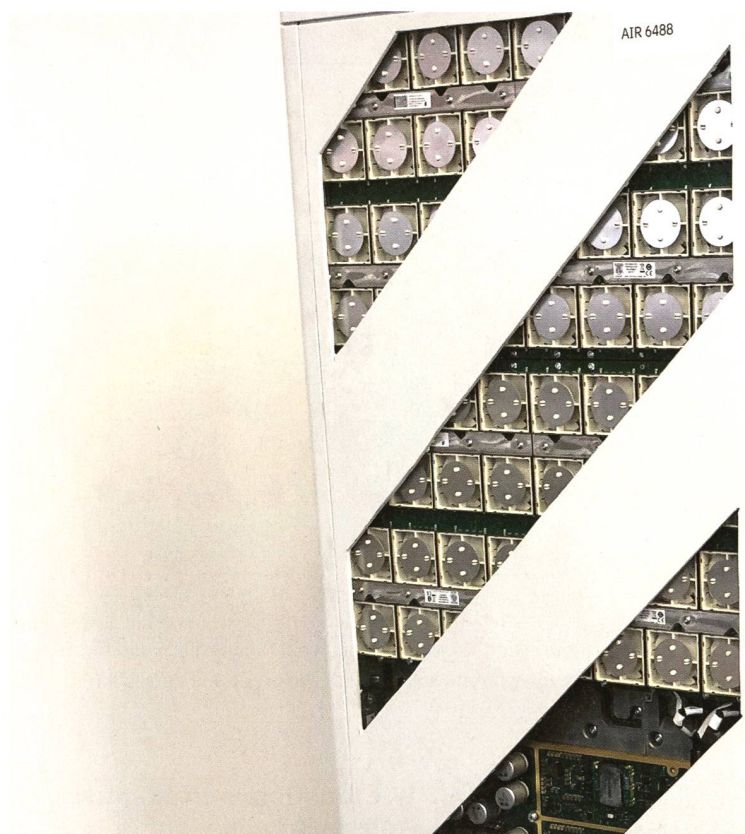
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



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.

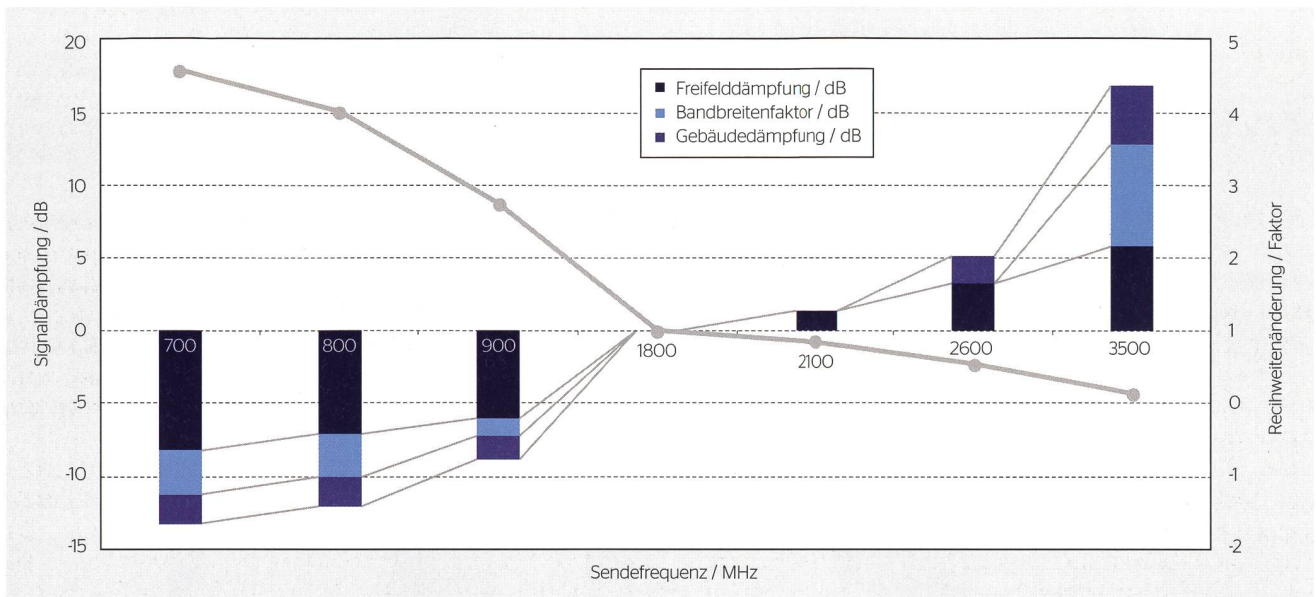


Bild 1 Streckendämpfung, Bandbreitenfaktor (für typische Träger der jeweiligen Sendefrequenz) und zusätzliche Gebäudedämpfung für verschiedene Sendefrequenzen im Vergleich zu 1800-MHz-Signalen (Balkendiagramm, linke Skala). Die graue Kurve beschreibt die daraus resultierende Reichweite (rechte Skala).

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 Freifelddämpfung 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 (derzeit) 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 einzelner 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

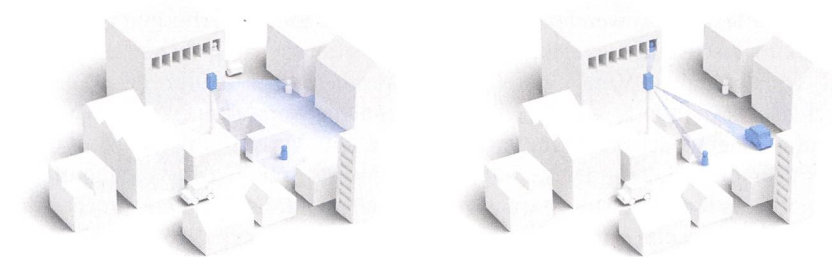


Bild 2 Links: Bei konventionellen Antennen werden die Signale stets in die ganze Funkzelle geschickt. Rechts: Adaptive Antennen senden die Signale gezielt zum Nutzer.

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 regulativer 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 Stromsparpotenzial 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.

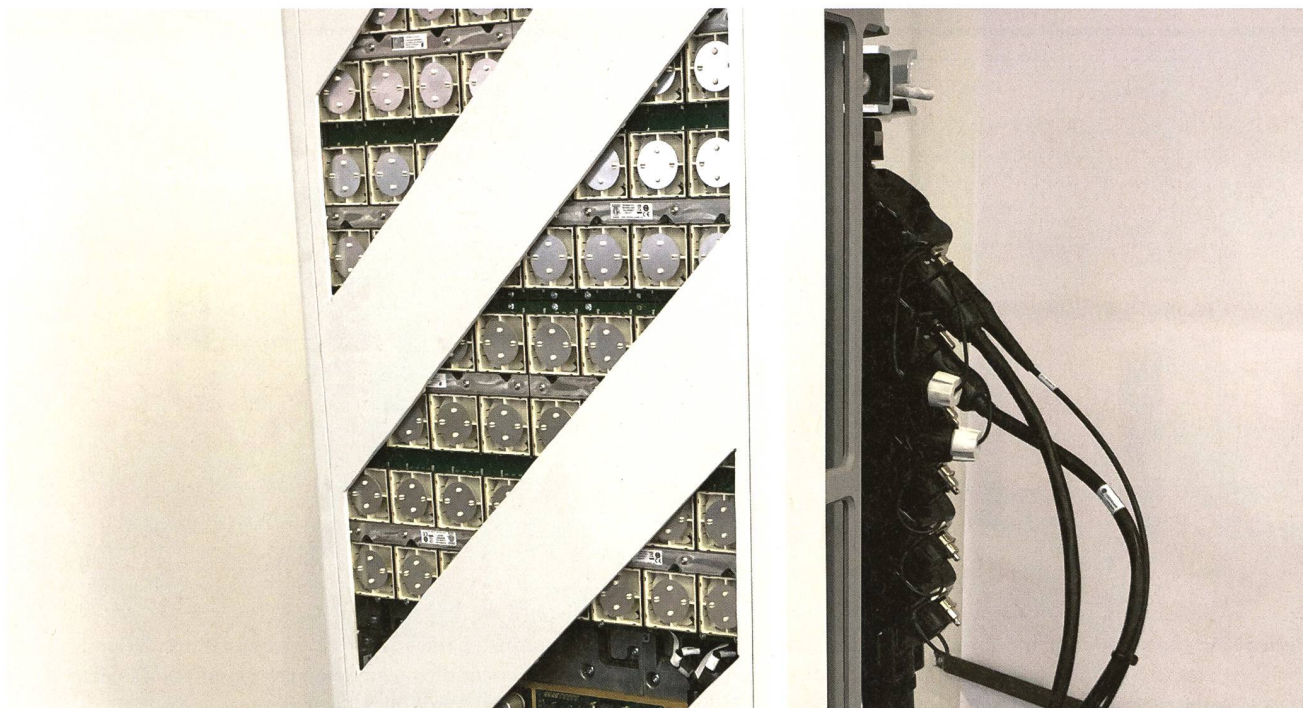
Referenzen

- [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. Shikhandtsov, 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/elektrosmog/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 presentation des resultats de simulation de l'exposition aux ondes emises par les installations radioelectriques www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/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/elektrosmog/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/ICNIRPrfgdl2020.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 Kompetenzzentrums Elektromagnetische Felder.
→ Swisscom (Schweiz) AG, 3050 Bern
→ hugo.lehmann@swisscom.com



Antenne adaptative avec couvercle de protection découpé : les éléments individuels sont clairement visibles.

Antennes adaptatives pour la 5G

Utilisation, défis et exposition | Les antennes qui ajustent leur direction de transmission ne constituent rien de nouveau. Pour la 5G, ces antennes adaptatives sont désormais utilisées pour la première fois à large échelle dans les réseaux de téléphonie mobile. Comment ces antennes fonctionnent-elles et pourquoi la 5G en a-t-elle besoin ? Quels défis représentent-elles et qu'en est-il des immissions ?

HUGO LEHMANN

Depuis l'arrivée en force des smartphones et l'omniprésence correspondante de l'Internet mobile, de plus en plus de données transitent via les réseaux de téléphonie mobile. En 2018 par exemple, le réseau mobile de Swisscom a transmis la même quantité de données en une semaine qu'en 2011 sur l'ensemble de l'année. Selon l'Ericsson Mobility Report 2019, le volume des données mobiles va encore quadrupler en Europe occidentale d'ici à 2025. [1] Pour faire face à cet énorme flux de données, les réseaux mobiles doivent être constamment adaptés.

Au début des années 1990, lorsque la technologie GSM – ou deuxième génération de téléphonie mobile (2G) – a été

introduite en Suisse, la largeur d'un canal n'était que de 0,2 MHz. Cela suffisait à transmettre les conversations dans une qualité compréhensible ainsi que de courts messages écrits. Pour les technologies qui ont suivi, la 3G et la 4G, cette valeur a atteint typiquement 5 MHz, respectivement 20 MHz, soit des canaux 25 à 100 fois plus larges que les canaux GSM. Afin de satisfaire la soif de données, une bande passante de 100 MHz est désormais la norme pour la 5G. Cependant, des bandes de fréquence contiguës de cette largeur ne sont disponibles qu'à des fréquences élevées, raison pour laquelle une bande de fréquences à 3,5 GHz a été définie dès 2015, lors de la conférence mondiale des radiocommunications.

Cette bande de fréquence est disponible pour les communications mobiles en Suisse depuis 2019 et est utilisée pour la 5G. En 2019, cette même conférence a déterminé d'autres bandes dans le domaine des ondes millimétriques (au-delà de 24 GHz), qui s'avéreront nécessaires pour atteindre les débits de données les plus élevés promis par la 5G (jusqu'à 20 Gb/s).

Pourquoi la 5G nécessite-t-elle des antennes adaptatives ?

La bande passante est une chose, mais qu'en est-il des propriétés de transmission de ces fréquences ? Du point de vue technique, les fréquences plus élevées affichent de moins bonnes caractéris-

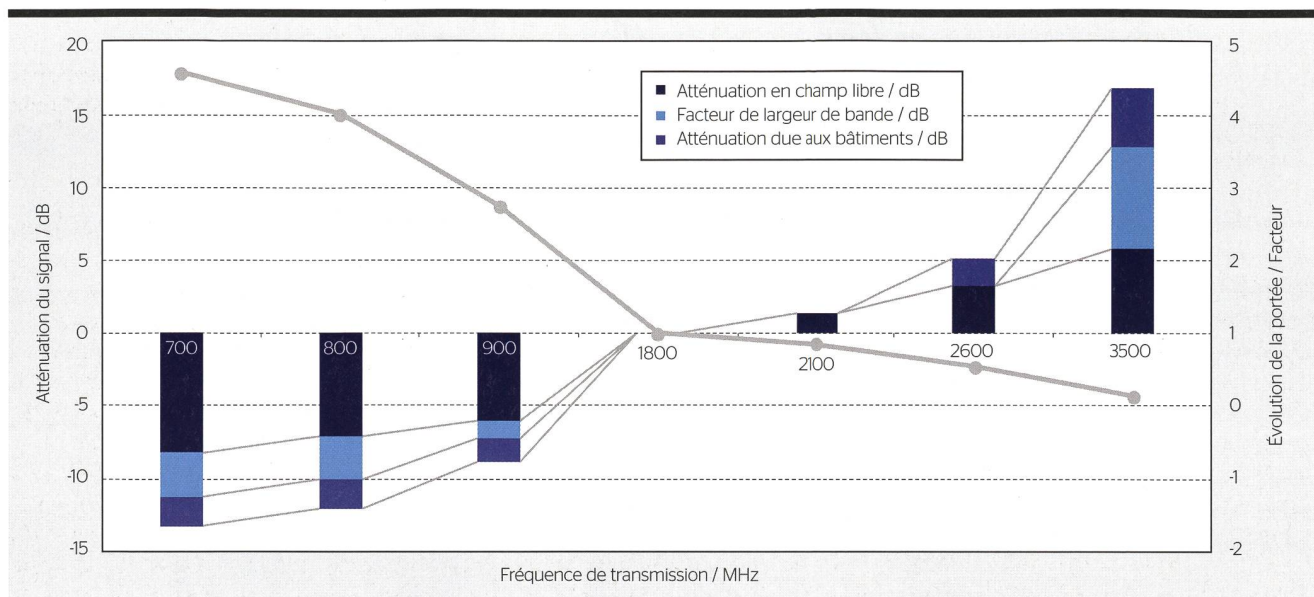


Figure 1 Atténuation en champ libre, facteur de bande passante (pour les porteuses typiques des fréquences de transmission données) et atténuation supplémentaire due aux bâtiments pour différentes fréquences de transmission par rapport aux signaux à 1800 MHz (histogramme, échelle de gauche). La courbe grise représente la portée résultante (échelle de droite).

tiques de transmission que les fréquences inférieures à 3 GHz utilisées jusqu'à présent dans les communications mobiles. Et ceci est déjà valable à 3,5 GHz. L'atténuation en champ libre est une mesure de l'intensité du signal au niveau du récepteur, pour une fréquence de transmission à une distance donnée. Pour les fréquences plus élevées, cette mesure augmente, ce qui se traduit par une portée réduite des signaux. Cependant, à des fréquences plus élevées, l'atténuation due aux enveloppes des bâtiments ou aux obstacles est aussi plus marquée. Cela signifie que les signaux pénètrent moins bien dans les bâtiments ou sont atténués par les arbres. Ceci est également valable pour l'être humain – les fréquences plus élevées sont essentiellement absorbées à la surface du corps et les organes internes ne sont pratiquement pas exposés. Les basses fréquences pénètrent mieux dans les bâtiments, mais aussi dans notre corps. Un autre effet, à ne pas sous-estimer: la croissance de la bande passante. Étant donné que la puissance de transmission est répartie sur une plus large bande de fréquence, le signal utile arrivant au niveau du récepteur est réduit. Ces corrélations sont représentées schématiquement dans la **figure 1** par rapport à une fréquence de transmission de 1800 MHz.

Aux fréquences encore plus élevées des ondes millimétriques – dans la 5G,

ce terme est déjà utilisé à partir de 24 GHz – les propriétés d'atténuation sont aussi plus prononcées. Ici, de plus, l'atténuation causée par la pluie, le brouillard et le feuillage augmente également. Par conséquent, les ondes millimétriques ne pourront probablement être utilisées raisonnablement que dans le cas d'une connexion visuelle directe. Ces fréquences ne figureront au premier plan que pour l'approvisionnement des endroits avec une densité d'utilisateurs très élevée, ou seront utilisées pour les connexions à domicile sans fil comme c'est déjà le cas aux États-Unis.

Pour pallier les moins bonnes conditions de propagation aux fréquences plus élevées, des antennes adaptatives sont utilisées pour la 5G, et ce, tant dans la bande à 3,5 GHz qu'avec les ondes millimétriques. Avec de telles antennes, le signal peut être focalisé dans la direction de l'utilisateur et les caractéristiques de transmission amoindries peuvent être compensées. On parle également de beamforming ou de « Massive MIMO » (Multiple Input Multiple Output). En concentrant le signal émis sur une zone plus limitée dans l'espace, les interférences dans le réseau mobile sont aussi réduites, ce qui se traduit par un meilleur rapport signal sur bruit. En outre, cette focalisation signifie également que les signaux peuvent être transmis de manière plus ciblée, avec moins d'énergie électrique.

Comment fonctionnent les antennes adaptatives ?

Le principe des antennes adaptatives est presque aussi vieux que la communication sans fil et est basé sur le principe physique de la superposition et des propriétés d'interférence des ondes. Ainsi, en 1909, Karl Ferdinand Braun décrivait dans la conférence donnée lorsqu'il a reçu le prix Nobel [2], comment il a, dès 1905, changé la direction de transmission d'une antenne en modifiant les phases des signaux de différentes antennes. Cette technique est utilisée depuis un certain temps pour les applications radar et la radioastronomie. Jusqu'à présent, les réseaux de téléphonie mobile se sont passés de cette technologie complexe et coûteuse. Du fait de l'utilisation de fréquences plus élevées et des progrès technologiques facilitant l'utilisation des antennes adaptatives, ces dernières constituent toutefois aujourd'hui une composante essentielle des réseaux mobiles de la 5G.

Ces antennes, parfois appelées « antennes intelligentes », sont composées d'un grand nombre d'éléments d'antenne contrôlés individuellement (**figure de titre**). Il s'agit typiquement de 64 éléments, chacun doté de son propre amplificateur, disposés sous la forme d'une matrice. En ajustant spécifiquement la phase, la direction de transmission peut être modifiée sans avoir à déplacer physiquement l'antenne ou ses éléments. Plus

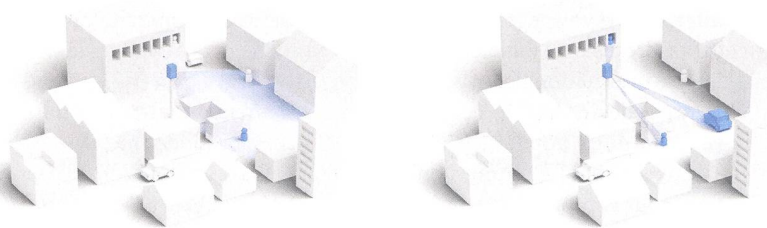


Figure 2 Avec les antennes conventionnelles, les signaux sont toujours envoyés dans toute la zone de transmission (à gauche), tandis que les antennes adaptatives dirigent les signaux de manière ciblée vers l'utilisateur (à droite).

le nombre d'éléments d'antenne coordonnés simultanément est grand, plus le signal est concentré et plus le volume de la zone de réception est restreint.

La norme 5G prévoit actuellement diverses réalisations pour la formation de ces faisceaux (beamforming). Dans la version la plus simple, la meilleure configuration d'antenne possible pour l'utilisateur est sélectionnée en fonction de la caractéristique du signal de référence reçu par l'appareil mobile. Les paramètres prédéfinis, appelés précodages, déterminent le décalage de phase pour les différents éléments d'antenne et définissent le faisceau à générer. Les précodages sont répertoriés dans un tableau dénommé « codebook » dans la norme 5G. [3] On parle dans ce cas de beamforming basé sur un codebook avec des configurations prédéterminées.

Les procédures basées sur un codebook sont plus simples, mais elles ne tirent pas pleinement parti de toutes les informations disponibles et n'exploitent pas entièrement le potentiel des antennes adaptatives. Une meilleure adaptation des antennes aux besoins des utilisateurs peut être réalisée lorsque le terminal envoie un signal test qui est mesuré par la station de base. Étant donné que le chemin du terminal à la station de base est soumis aux mêmes conditions de propagation que le trajet du signal de l'antenne au téléphone mobile, la station de base peut calculer le meilleur signal possible et apporter des ajustements individuels à la configuration de l'antenne adaptative. On parle aussi dans ce cas de procédures réciproques.

Antennes adaptatives et exposition

La transmission ciblée de l'information à l'utilisateur individuel dans la zone d'émission résulte, grâce au beamforming, en une dynamique plus élevée des

signaux envoyés qu'avec les anciennes technologies de téléphonie mobile. Les signaux ne sont envoyés que là où ils sont nécessaires. La **figure 2** illustre schématiquement le fonctionnement des antennes passives et adaptatives. Cette diversité spatiale conduit non seulement à la réduction des interférences, mais, en moyenne temporelle, également à une exposition plus faible qu'avec les technologies antérieures.

Une simulation pour la ville de Gand, en Belgique, montre qu'un réseau capable de « Massive MIMO » génère cinq fois moins d'exposition pour les mêmes scénarios d'utilisation qu'un réseau 4G sans antennes adaptatives. [4] L'analyse montre également que plus le nombre d'antennes élémentaires utilisées est élevé, plus l'exposition est faible. Ceci n'a pas encore été prouvé par des mesures – la mise en œuvre des réseaux 5G étant encore trop récente – mais cela montre le potentiel de cette technologie également dans le domaine de la réduction des immissions.

Des simulations et des mesures sur des antennes adaptatives individuelles montrent que, généralement, seule une fraction de la valeur maximale théorique de la puissance de transmission est émise en cas d'utilisation du beamforming. [5] Même en cas d'utilisation importante de la capacité et pour différents scénarios, jamais plus d'un quart de la puissance maximale théorique n'est émise sur une durée moyenne de 6 min. La durée moyenne de 6 min est pertinente pour le respect des valeurs limites d'immissions (voir l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI), annexe 2, 11 [6]). Ces simulations ont été confirmées par des mesures de la puissance de transmission moyenne sur 6 min des stations de base dotées d'antennes adaptatives. [7]

En résumé, cela signifie que l'exposition par unité d'information transmise au moyen du beamforming diminue par rapport aux réseaux de téléphonie mobile actuel.

Défis

Outre les avantages décrits plus haut, l'utilisation d'antennes adaptatives est aussi à l'origine de nouveaux défis: ceux-ci sont d'une part de nature technique, comme la plus grande complexité des antennes intelligentes, et relèvent d'autre part des domaines de la réglementation et de la communication.

En Suisse, les antennes adaptatives sont aujourd'hui évaluées dans la réglementation de la même manière que les antennes passives. Il est pris comme hypothèse qu'à tout moment, toute la puissance est émise dans toutes les directions. Cependant, ce cas ne se produit jamais dans la réalité, puisque la puissance totale de l'antenne est répartie entre les utilisateurs actifs: avec deux utilisateurs actifs simultanément, la puissance de transmission par faisceau correspond à la moitié de la puissance maximale. S'il y a quatre utilisateurs, un quart de la puissance maximale est émis dans chacune des directions. Dans le cas de nombreux utilisateurs bien répartis géographiquement, l'exposition est d'autant plus réduite. D'un autre côté, si un seul utilisateur ou plusieurs utilisateurs sont actifs dans la même direction, toute la puissance est certes émise dans cette direction, mais grâce au beamforming, pas sur l'ensemble de la zone de couverture de l'antenne. Cela signifie que dans ce cas, l'exposition est focalisée sur les utilisateurs, tout en restant faible dans le reste de la zone de transmission. La population craint souvent que l'exposition dans le faisceau généré par les antennes adaptatives soit excessive. C'est sans compter que même dans ces faisceaux, les valeurs limites pertinentes doivent toujours être respectées et qu'il est donc garanti que les immissions, quel que soit le cas de figure, n'augmentent pas de manière incommensurable.

La réglementation actuelle basée sur le pire scénario possible conduit à une surestimation massive de l'exposition réelle – ceci a également été reconnu par le législateur. Afin de mieux utiliser le potentiel des antennes adaptatives, l'ORNI a déjà été adaptée le 1^{er} juin 2019. Dans le cas des antennes adaptatives, la

variabilité des directions de transmission et des diagrammes d'antenne doit être prise en compte. Cependant, il a été omis jusqu'à présent de définir comment cela devait être fait concrètement. Selon l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), l'approche basée sur le pire des cas doit continuer d'être prise en compte. [8] Bien que, comme l'OFEV l'indique clairement dans l'une de ces informations, cette règle mène à une surestimation des immissions, certains cantons se refusent toujours à autoriser les antennes adaptatives.

Dans d'autres pays, les avantages évidents des antennes adaptatives sont reconnus et déjà pris en considération dans l'évaluation de l'exposition. En France, par exemple, un facteur de réduction de la puissance de 30 peut être pris en compte pour calculer l'exposition générée par une antenne adaptative. [9] Ceci mène à une réduction du champ électrique calculé d'un facteur 5,5, ce qui correspond assez bien à la réduction simulée de l'exposition générée par les antennes adaptatives, mentionnée plus haut. [3] Cela signifie que les antennes adaptatives peuvent être exploitées en France à une puissance 30 fois plus élevée qu'en Suisse. Par conséquent, les stations de téléphonie mobile existantes peuvent être utilisées sans aucun problème avec des antennes adaptatives pour la 5G.

Dans une situation où seuls 2% des sites existants en Suisse peuvent être utilisés pour une expansion de la 5G à haute performance en raison des limites de précaution strictes [10], un tel facteur représenterait un moyen de mieux exploiter les sites existants. Ceci est d'autant plus important que la réalisation de nouvelles installations est devenue difficile, voire impossible, en raison de l'attitude critique d'une grande partie de la population à l'égard de la 5G et des demandes de moratoires dans certains cantons. Pour ces raisons, le secteur des télécommunications a proposé, en 2018 déjà, une réglementation qui prévoit un facteur de réduction de 10, et non de 30 comme en France. Comme cela a déjà été mentionné, un tel règlement n'exposerait en aucun cas la population d'une manière dangereuse.

Juste un petit calcul: si le facteur de réduction de 10 revendiqué était appliqué à la puissance de transmission en Suisse, un champ électrique instantané maximum d'à peine 16 V/m pourrait être généré. Mais sur une durée moyenne

de 6 min, la limite de précaution de 5 V/m serait toujours respectée. Cela pourrait être assuré avec un logiciel déjà utilisé à l'échelle internationale. Avec ce champ électrique de 16 V/m de courte durée, la sécurité de la population est garantie. Par exemple, la Commission internationale pour la protection contre les rayonnements non ionisants (ICNIRP) a récemment confirmé les limites d'immissions pour le domaine de fréquences de la téléphonie mobile (36-61 V/m). Selon l'ICNIRP, celles-ci protègent contre tous les effets nocifs scientifiquement fondés, et cela est aussi valable pour l'exposition générée par la 5G. [11] Étant donné que les champs électriques à court terme sont encore inférieurs à la valeur limite des immissions de 61 V/m, et ce, d'un facteur de 2 à 3, un tel règlement tiendrait également compte du principe de précaution de la loi suisse sur la protection de l'environnement.

Enfin, il convient également de mentionner que les antennes adaptatives et la 5G peuvent non seulement transmettre des données plus efficacement et avec moins d'immissions, mais disposent également d'un grand potentiel pour augmenter l'efficacité énergétique. Si les antennes adaptatives peuvent être utilisées à leur plein potentiel, un nombre plus restreint de nouvelles installations devront être construites en Suisse. Chaque installation consommant une certaine quantité d'énergie de base, un nombre moins élevé d'installations signifie également une consommation moindre d'énergie. En outre, la 5G dispose d'un potentiel d'économie d'électricité plus élevé que la 4G en raison de sa structure de signal réduit à l'essentiel. En particulier, l'utilisation du mode « deep sleep » peut réduire la consommation d'énergie des stations de téléphonie mobile 5G d'un facteur 9. [12] En utilisant la technologie 5G pour la suite du développement des réseaux de téléphonie mobile au lieu de la technologie LTE, des économies d'énergie de 50 à 70% pourraient être réalisées. Par rapport à la 2G ou à la 3G, la comparaison serait encore plus favorable à la 5G.

Perspectives

L'utilisation d'antennes adaptatives constitue un élément important pour la réalisation d'un réseau de téléphonie mobile 5G performant. Les avantages en termes de flexibilité, de gain de capacité,

d'exposition moindre et liée à l'utilisation, et de réduction de la consommation énergétique sont évidents. Le Conseil fédéral a procédé, en 2019 déjà, aux ajustements nécessaires dans l'ordonnance correspondante. Il ne manque plus que les concrétisations correspondantes dans les aides à l'exécution. Pour que la Suisse continue d'avoir les meilleurs réseaux de téléphonie mobile au monde, ces ajustements indispensables et urgents devraient être entrepris rapidement.

Références

- [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] Ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI), 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] Office fédéral de l'environnement, « Informations concernant les antennes adaptatives et 5G (autorisations et mesures) ». www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/elektrosmog/fachinfo-daten/informationen_adaptive_antennen_5g.pdf.download.pdf/informationen_concernant_les_antennes_adaptatives_et_5G_2020_f.pdf, 31 janvier 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/mediatheque/documents/5G/consultation/consultation-5G-Lignes-directrices-nationales.pdf, octobre 2019.
- [10] Rapport « Téléphonie mobile et rayonnement », publié par le groupe de travail téléphonie mobile et rayonnement sur mandat du DETEC, www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/elektrosmog/fachinfo-daten/bericht-mobilfunk-und-strahlung.pdf.download.pdf/Rapport_TelephonieMobile-Rayonnement.pdf, 28 novembre 2019.
- [11] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP); www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPrfgdl2020.pdf & www.icnirp.org/cms/upload/presentations/ICNIRP_Media_Release_110320.pdf, 11 mars 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.



Auteur

D' **Hugo Lehmann** est responsable du centre de compétence Ondes électromagnétiques de Swisscom.
→ Swisscom (Suisse) SA, 3050 Bern
→ hugo.lehmann@swisscom.com

Ein kleiner Schritt für den Versorger,
ein großer Schritt in Richtung Smart Grid

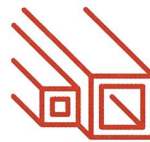
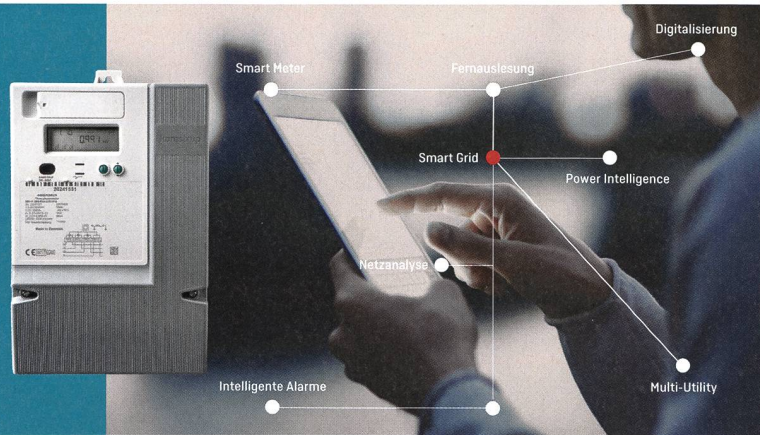
kamstrup

**Beschreiten Sie neue Wege mit der
Smart Metering Funklösung OMNIA**

- Geringe Installations- und Betriebskosten bei höchster Verfügbarkeit > 99,5 %
- Redundantes System – minimale Anzahl an Datenkonzentratoren
- Erfassung der Netzqualität
- Geeignet für Stadt, Berg und Tal

kamstrup.com/omnia

Kamstrup A/S Schweiz · Industriestrasse 47
8152 Glattbrugg · T: 043 455 70 50 · info@kamstrup.ch



Hans Gassler AG
Güterstrasse 6
5014 Gretzenbach
www.gassler.ch
Korrosionsschutz

**Branchenlösungen
zu Netztechnik**

Jetzt bestellen und profitieren!

**NEPLAN®DACH – Beurteilungssoftware
für Netzzrückwirkungen**

Die Software ermöglicht die professionelle Beurteilung von Netzzrückwirkungen durch Verbraucher- und Erzeugeranlagen.
www.strom.ch/neplan

**NeDisp® – Der Qualitätsausweis für Ihren
Netzbetrieb**

Mit der Software werden die Verfügbarkeitskennzahlen (SAIDI, CAIDI, SAIFI) ermittelt und Auswertungen lassen sich einfach erstellen.
www.strom.ch/nedisp

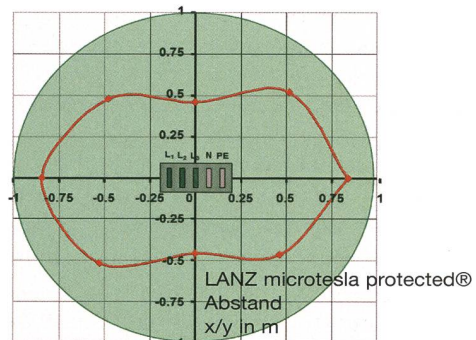
**NeQual® – Power Quality Monitoring
EN 50160**

Software zur Auswertung von Spannungsqualitätsmessungen. Der Regulator (ElCom) empfiehlt den Verteilnetzbetreibern die Teilnahme am Programm NeQual!
www.strom.ch/nequal



LANZ protected®

Die neuen LANZ microtesla protected® Übertragungs-Stromschienen schirmen das Magnetfeld bis 3680 A auf eine Flussdichte im Effektivwert von < 1 Microtesla in 1 m Abstand ab.



Sie entsprechen damit der Verordnung NIS VR 814.710 für Orte, wo sich regelmässig oder während längerer Zeit Personen aufhalten.

Verlangen Sie unser Angebot 062 388 21 21



STMS4_1
**stromschienen
lanz oensingen ag**
CH-4702 Oensingen
Südringstrasse 2
www.lanz-oens.com
info@lanz-oens.com
Tel. ++41/062 388 21 21
Fax ++41/062 388 24 24

LANZ ist BIM Ready! BIM-fähige Revit-Familien für LANZ Stromschienen stehen auf www.lanz-oens.com zum Download zur Verfügung.