Bericht
Mobilfunk und Strahlung

Herausgegeben von der Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung
im Auftrag des UVEK

18. November 2019

Impressum

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) von der hierzu eingesetzten Arbeitsgruppe erarbeitet. Die faktenbasierten Inhalte der Kapitel 1 bis 7 werden von allen Mitgliedern der Arbeitsgruppe mitgetragen. Die Optionen wurden von einzelnen Stakeholdergruppen in ausführlichen Fassungen vorgeschlagen, deren gekürzte Umschreibung sowie Beurteilung und Bewertung in den Kapiteln 8 und 9 des Berichts sind aber ebenfalls ein Ergebnis der gesamten Arbeitsgruppe. Die Mitglieder der Arbeitsgruppe unterstützen schliesslich einheitlich die begleitenden Massnahmen in Kapitel 10.

Mitglieder der Arbeitsgruppe
(in alphabetischer Reihenfolge)

Valentin Delb	Abteilungsleiter, AWEL Kanton Zürich, Delegierter der Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter der Schweiz KVU
Gregor Dudle	Dr. ès sc., Stv. Direktor, Eidg. Institut für Metrologie (Stv. Dr. Marc-Olivier André)
Gregor Dürrenberger	Dr. sc. nat., Geschäftsführer, Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation FSM
Christian Grasser	Geschäftsführer, Schweizerischer Verband der Telekommunikation asut
Philippe Horisberger	Stv. Direktor, Bundesamt für Kommunikation
Harry Künzle	dipl. El. Ing. FH, Leiter Dienststelle Umwelt und Energie, Stadt St. Gallen, Delegierter des Schweizerischen Städteverbandes (Stv. Andreas Küng)
Niels Kuster	Prof. Dr., Geschäftsführer, IT'IS Foundation (Stv. Dr. Sven Kühn)
Stephan Netzle	Dr. iur., Präsident, Eidg. Kommunikationskommission ComCom
Manfred Portmann	AfU Kanton Freiburg, Delegierter der Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter der Schweiz KVU
Carlos Quinto	Dr. med., Verbindung der Schweizer Ärztinnen und Ärzte FMH (Stv. Dr. med. Yvonne Gilli)
Alexander Reichenbach	Dipl. Umwelt-Natw. ETH, Sektionschef, Bundesamt für Umwelt
Martin Röösli	Prof. Dr., Professor für Umweltepidemiologie Swiss TPH, Leiter Beratende Expertengruppe NIS
Andreas Siegenthaler	Dr. phil. nat., Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Bundesamt für Umwelt
Paul Steffen	Dr. sc. nat., Vizedirektor, Bundesamt für Umwelt (Vorsitz der Arbeitsgruppe)
Edith Steiner	Dr. med., Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz
Evelyn Stempfel	Dr. phil. nat., Sektionschefin, Bundesamt für Gesundheit
Sanne Stijve	dipl. El. Ing. EPFL, Programmleiter, Bundesamt für Bevölkerungsschutz (Stv. Frédéric Jorand)
Jürg Studerus	Swisscom (Schweiz) AG (Stv. Dr. Hugo Lehmann)
Urs Walker	Fürsprecher, Abteilungschef, Bundesamt für Umwelt
Felix Weber	Salt Mobile SA
Rolf Ziebold	Sunrise Communications AG

Externes Beratungsmandat und Sekretariat
Jürg Minger und Silvia Zimmermann,
Federas Beratung AG

Wissenschaftliches Lektorat
Fredy Joss, Beatenberg

Sprachen
Dieser Bericht ist auch auf Französisch und Italienisch verfügbar, das Management Summary zudem auf Englisch.

Inhaltsverzeichnis

Management Summary **5**

1 Einleitung **13**

1.1 Ausgangslage 13

1.2 Ziele und Vorgehen 13

2 Rechtsgrundlagen **15**

2.1 Fernmeldebereich 15

2.2 Umweltbereich 15

2.3 Weitere Rechtsgebiete 16

3 Mobilfunktechnologie **17**

3.1 Mobilfunknetze in der Schweiz 17

3.2 Einführung von 5G 17

4 Fakten und Prognosen **21**

4.1 Datenvolumen 21

4.2 Netzstrukturen 24

4.3 Ausschöpfung der Grenzwerte 28

4.4 Kosten des Ausbaus von Mobilfunkanlagen auf 5G 38

5 Zusammenhänge zwischen Emissionen, Immissionen und Exposition **39**

5.1 Begriffe 39

5.2 Hochfrequente NIS-Quellen als Emissionen 39

5.3 NIS-Immissionen 39

5.4 Umweltexposition durch körperferne Quellen 40

5.5 Exposition durch körpernah betriebene Geräte 45

5.6 Vergleich der Exposition durch körpernahe und körperferne Quellen 47

5.7 Einflussfaktoren auf die Exposition und Möglichkeiten der Minimierung 50

5.8 Modellierung der Exposition durch 5G-Basisstationen und -Endgeräte 54

6 Gesundheitliche Auswirkungen **57**

6.1 Vorbemerkungen 57

6.2 Ziele und Vorgehen 57

6.3 Methodische Aspekte 58

6.4 Zusammenfassung des Kenntnisstandes 2014 60

6.5 Internationale Expertenberichte seit 2014 62

6.6 Evidenzbewertung anhand neuer Studien 64

7 Verfahren und Vollzug **68**

7.1 Standortsuche für Antennen 68

7.2 Bewilligung und Vollzug durch Kantone und Gemeinden 70

7.3 Aktuelle Arbeiten betreffend NISV und Vollzugshilfsmittel 75

8 Optionen 78
8.1 Option 1: Status quo Anforderungen NISV 83
8.2 Option 2: Keine Änderung Anlagegrenzwert, aber strengere Anforderungen in der NISV an Kleinzellenanlagen und adaptive Antennen 84
8.3 Option 3: Erhöhung Anlagegrenzwert auf einheitliche 6 V/m und Mittelwert-Beurteilung 86
8.4 Option 4: Erhöhung Anlagegrenzwert auf 11,5 V/m pro Betreiber 87
8.5 Option 5: Erhöhung Anlagegrenzwert auf einheitliche 20 V/m 89
9 Mögliche Konzepte mit Blick auf zukünftige Entwicklungen 91
9.1 Förderung von Kleinzellen in Hybridnetzen durch verstärkte Zusammenarbeit zwischen Städten/Gemeinden und Mobilfunkbetreibern 91
9.2 Trennung von Innen- und Aussenversorgung 94
10 Begleitende Massnahmen 96
10.1 Vereinfachungen und Harmonisierungen im Vollzug 96
10.2 Monitoring der Exposition 98
10.3 Information und Sensibilisierung der Bevölkerung 100
10.4 Förderung der Forschung im Bereich Mobilfunk und Gesundheit 102
10.5 Umweltmedizinische NIS-Beratungsstelle 105
10.6 Austauschplattform «Mobilfunk der Zukunft» 106
11 Empfehlungen 108
Anhang 1: Geprüfte Massnahmen 109
Anhang 2: Parlamentarische Vorstösse 112
Anhang 3: Mandate und Mitglieder Untergruppen und Kerngruppe 114
Anhang 4: Abkürzungsverzeichnis 118
Anhang 5: Quellennachweise und Erläuterungen 120

Management Summary

In der Schweiz hat die Einführung der Mobilfunktechnologie der fünften Generation (5G) begonnen. Der vorliegende Bericht erläutert technische Fakten zu 5G, setzt sich mit dem Betrieb der Schweizer Mobilfunknetze und ihrer Regulierung auseinander, schätzt die Exposition der Bevölkerung durch nichtionisierende Strahlung (NIS) ab und fasst die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu möglichen gesundheitlichen Folgen zusammen. Der Bericht entstand in einer interdisziplinären Arbeitsgruppe im Auftrag des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Ausgangslage

Der Bundesrat will, dass die Schweiz die Chancen der Digitalisierung nutzt, und hat im Jahr 2016 die Strategie «Digitale Schweiz» lanciert. Ein wichtiges Element dieser Strategie ist die Schaffung leistungsstarker und offener Übertragungsnetze für eine konkurrenzfähige Informationsgesellschaft.

Das Fernmeldegesetz bezweckt, dass der Bevölkerung und der Wirtschaft vielfältige, preiswerte, qualitativ hochstehende sowie national und international konkurrenzfähige Fernmeldedienste angeboten werden. Wettbewerb und Marktorientierung führen dazu, dass in der Schweiz Fernmeldedienste in hoher Qualität angeboten werden.

Das Umweltschutzgesetz (USG) soll Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen schädliche oder lästige Einwirkungen schützen sowie die natürlichen Lebensgrundlagen dauerhaft erhalten. Im Sinne der Vorsorge sind Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig zu begrenzen. Dazu sind die Emissionen so weit zu begrenzen, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist.

Zum Schutz der Bevölkerung vor der nichtionisierenden Strahlung von Mobilfunkantennen hat der Bundesrat in der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) zwei Arten von Grenzwerten festgelegt: Immissions- und Anlagegrenzwerte. Die Immissionsgrenzwerte schützen vor den wissenschaftlich nachgewiesenen Gesundheitsauswirkungen (Erwärmung des Körpergewebes) und müssen überall eingehalten werden, wo sich Menschen – auch nur kurzfristig – aufhalten können. Es sind die gleichen Grenzwerte, wie sie auch im umliegenden Ausland mehrheitlich angewendet werden, und betragen im Bereich der Mobilfunkfrequenzen zwischen 36 und 61 Volt pro Meter (V/m).

Weil aus der Forschung unterschiedlich gut abgestützte Beobachtungen vorliegen, wonach es auch noch andere Effekte geben könnte, legte die NISV basierend auf dem Vorsorgeprinzip des Umweltschutzgesetzes zusätzlich Anlagegrenzwerte fest. Die vorsorglichen Anlagegrenzwerte sind für Mobilfunkstrahlung deutlich tiefer als die Immissionsgrenzwerte und betragen 4 bis 6 V/m. Jede einzelne Mobilfunkanlage gemäss Definition der NISV darf Orte, wo sich Menschen regelmässig während längerer Zeit aufhalten, bezogen auf die elektrische Feldstärke mit maximal etwa einem Zehntel des Immissionsgrenzwertes belasten. Zu diesen sogenannten Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) gehören Wohnungen, Schulen, Spitäler, ständige Arbeitsplätze oder raumplanerisch festgelegte Kinderspielplätze. Mit den Anlagegrenzwerten wird in der Schweiz die nichtionisierende Strahlung von Mobilfunkantennen strenger begrenzt als in den meisten europäischen Ländern.

Im Hinblick auf den zukünftigen Ausbau der Mobilfunknetze ist in der Politik, der Bevölkerung und den Medien eine breite und intensive Diskussion zu den Bedürfnissen, dem Nutzen und den möglichen Risiken der zukünftigen Mobilfunkversorgung entstanden. Eine Lockerung der Vorsorgebestimmungen wurde vom eidgenössischen Parlament in den Jahren 2016 und 2018 zweimal knapp abgelehnt.

Im Frühjahr 2019 hat der Bund im Rahmen einer Auktion neue Frequenzen an die drei bisherigen Mobilfunkbetreiber vergeben. Diese Frequenzen bilden die Voraussetzung für die Einführung der neuen 5G-Mobilfunktechnologie und dienen auch dem Ausbau der bisherigen Netze. Die darauffolgenden Ankündigungen von Betreibern, rasch ein 5G-Netz in der Schweiz aufzubauen, haben die laufenden Diskussionen über die Ausgestaltung der zukünftigen Mobilfunkversorgung und über die gesundheitlichen Bedenken gegenüber Mobilfunkstrahlung zusätzlich intensiviert.

Auftrag

Das UVEK will einerseits die Digitalisierung der Gesellschaft und Wirtschaft vorantreiben und erachtet dafür leistungsfähige Mobilfunknetze nach dem 5G-Standard als unverzichtbar. Andererseits hält das UVEK am Vorsorgeprinzip des USG fest. Aus diesem Grund hat die vormalige Vorsteherin des UVEK, Frau Bundesrätin Doris Leuthard, im September 2018 die Arbeitsgruppe «Mobilfunk und Strahlung» eingesetzt mit dem Auftrag, einen Bericht zum weiteren Vorgehen hinsichtlich der näheren und weiteren Zukunft des Mobilfunks unter Berücksichtigung der Nutz- und Schutzinteressen zu erarbeiten. Im Zentrum der Analyse sollte 5G stehen. Dabei hatte sich die Arbeitsgruppe auch mit der Frage auseinanderzusetzen, ob die geltenden vorsorglichen Anlagegrenzwerte für Mobilfunkantennen im Hinblick auf die Weiterentwicklung des Mobilfunks noch den Kriterien des Vorsorgeprinzips entsprechen oder ob Anpassungen erforderlich sind. Nicht Aufgabe der Arbeitsgruppe war es, über die Einführung von 5G zu entscheiden oder Studien über die gesundheitlichen Auswirkungen der Mobilfunkstrahlung durchzuführen.

Technik und Anwendungen von 5G

Mit 5G werden grössere Übertragungsraten und kürzere Reaktionszeiten möglich, zudem können über 5G wesentlich mehr Endgeräte als bisher bedient werden, und auch die Energieeffizienz pro übermittelte Dateneinheit nimmt zu. Damit eröffnen sich Perspektiven für neue Anwendungen: So wird es beispielsweise möglich, in Echtzeit und nahezu verzögerungsfrei Maschinen in der industriellen Produktion und autonome Fahrzeuge zu steuern. Auch kann ein 5G-Netzwerk in virtuelle Teilnetze unterschiedlicher Qualität unterteilt werden, sodass zum Beispiel für Blaulichtorganisationen wie Polizei, Feuerwehr, Rettungsdienst und Katastrophenschutz äusserst leistungsfähige Teilnetze mit einer hohen Verfügbarkeit bereitstehen.

Die Funktechnik von 5G erlaubt viel flexiblere und auch effizientere Netze als 4G. Die heute für 5G verfügbaren Frequenzen sind vergleichbar mit denen für 4G und WLAN, erlauben aber deutlich höhere Bandbreiten. Die maximalen Übertragungsraten von 5G liegen heute zwischen 2 und 3 Gigabit pro Sekunde, künftig könnten es mit Millimeterwellen mehr als 20 Gigabit pro Sekunde sein. Zudem gestatten auch die Rechenkapazitäten der 5G-Basisstationen und -Endgeräte eine leistungsfähigere Datenübertragung als bisher. Weiter verwendet 5G eine schlankere und flexiblere Signalstruktur als 4G. Damit können die grossen Bandbreiten und die verschiedenen Frequenzbänder effizienter genutzt werden. 5G sendet ferner fünfmal weniger Kontrollsignale aus als 4G, was die Exposition in Zeiten mit wenig Datenverkehr reduziert.

Um Signale zielgerichteter und flexibler zu übertragen, werden bei 5G auch neue Antennentechnologien eingesetzt. Mit adaptiven Antennen, die aus einer Vielzahl einzeln angesteuerter Elemente bestehen, kann das Signal gezielter in die Richtung des Nutzers bzw. seines Mobilgeräts gesendet werden als mit konventionellen Antennen. Dieses sogenannte Beamforming reduziert zum einen Störungen in den Funkzellen und zum andern (bezogen auf die gleiche Menge übertragener Daten) auch die durchschnittliche Exposition in den Funkzellen. Personen, welche sich in den antennennahen Bereichen des Beams aufhalten, werden kurzzeitig jedoch stärker exponiert.

Für die Einführung von 5G in der Schweiz wird in einem ersten Schritt das 3,5-GHz-Band genutzt. Diese Frequenzen ermöglichen es, höhere Datenmengen zu übertragen, sie haben aber schlechtere Ausbreitungseigenschaften als die heute gebräuchlichen tieferen Frequenzbereiche. Im Vergleich zu diesen können sie Hindernisse wie Bäume, Gebäude, Fenster oder Fahrzeuge weniger gut durchdringen und werden auch bei der Ausbreitung durch die Luft stärker abgeschwächt. Diese schlechteren Ausbreitungseigenschaften können zum Teil durch den Einsatz adaptiver Antennen kompensiert werden.

Zusätzlich zum 3,5-GHz-Frequenzband wird 5G in den nächsten Jahren auch auf den heute bereits verwendeten Mobilfunk-Frequenzen von 700 MHz bis 2,6 GHz eingesetzt. Durch die Nutzung von Frequenzen oberhalb von 24 GHz (sogenannte Millimeterwellen) könnten die maximalen Datenraten von 5G auf über 20 Gigabit pro Sekunde gesteigert werden. Die Nutzung der Millimeterwellen für Mobilfunk ist in der Schweiz zum heutigen Zeitpunkt noch nicht freigegeben. Zudem eignen sich diese Frequenzen aus physikalischen Gründen nicht für eine landesweite und flächendeckende Versorgung mit Mobilfunk und würden daher wohl nur kleinräumig eingesetzt werden.

Datenverkehr und Mobilfunknetze

Seit der breiten Einführung der Smartphones im Jahr 2007 hat sich das über die Mobilfunknetze transportierte Datenvolumen in der Schweiz alle 12 bis 18 Monate verdoppelt. Gemäss Prognosen wird dieser Trend so weitergehen. Den Hauptteil des mobilen Datenverkehrs verursachen Videoanwendungen für private und geschäftliche Zwecke (68 %), wobei auch in diesem Bereich eine weitere starke Zunahme prognostiziert wird.

Das mobil übertragene Datenvolumen in Westeuropa und damit auch in der Schweiz wird bis 2024 schätzungsweise um über 500 Prozent zunehmen. Es wird angenommen, dass dann ein Viertel des gesamten Mobilfunkdatenvolumens durch 5G übertragen werden wird; das allein entspricht knapp dem Anderthalbfachen der heute total übermittelten Datenmenge. Für das Internet der Dinge – d. h. miteinander vernetzte Geräte – wird in den nächsten fünf Jahren mit einem Wachstum von ungefähr 400 Prozent der Anzahl Datenverbindungen gerechnet.

Aufgrund dieser ständig zunehmenden Datenmengen müssen die Mobilfunknetze kontinuierlich ausgebaut werden. Die Mobilfunknetze setzen sich aus einer Vielzahl aneinander angrenzender und etwas überlappender Funkzellen zusammen. Makrozellen mit leistungsstarken Antennen, die meist auf frei stehenden Masten oder Hausdächern installiert sind, dienen der flächendeckenden Versorgung eines Gebietes. Sie weisen typischerweise einen Versorgungsradius von 200 Metern bis 2 Kilometern auf. Die Leistung einer Antenne ist dabei so bemessen, dass die ausgesendeten Funksignale die Endgeräte in Gebäuden, in Fahrzeugen und auch am Rand der Zelle noch erreichen, ohne dabei aber die Signale in anderen Zellen zu stören. In Gebieten mit sehr hohem Datenverkehr werden Makrozellen mit Kleinzellen (u. a. Mikrozellen) zur Kapazitätssteigerung ergänzt. Mikrozellen mit leistungsschwächeren Antennen bieten im Freien typischerweise eine Abdeckung von wenigen bis maximal 200 Metern. Zudem kommen in speziellen Situationen gebäudeinterne Lösungen zur Anwendung (z. B. Spital, Einkaufszentrum, Konzerthalle, Stadion). Diese Netzstruktur aus Makro- und Mikrozellen sowie gebäudeinternen Lösungen wird auch als «hybrides Netz» bezeichnet und hat sich international als Standard bei Mobilfunknetzen durchgesetzt.

Heute gibt es in der Schweiz rund 12 300 Mobilfunkanlagen (davon 70 % Makrozellen und 30 % Kleinzellen). Um flächendeckende 5G-Netze innerhalb der verfügbaren Frequenzen und allein mit den bestehenden Funkzellen aufzubauen, müsste die Sendeleistung der bestehenden rund 8500 Makrozellenanlagen um das 12,4-fache gesteigert werden. Während es in ländlichen Gebieten noch Spielraum für einen Ausbau bestehender Sendeanlagen gibt, sind im dicht bebauten Raum die NIS-Leistungsbudgets weitgehend ausgeschöpft, da der in der NISV festgeschriebene Anlagegrenzwert, welcher im Sinne der Vorsorge die maximale Sendeleistung einer Mobilfunkanlage begrenzt, bereits heute weitgehend erreicht ist. In Städten und Agglomerationen können nur etwa 2 Prozent der bestehenden Anlagen mit den für 5G benötigten Kapazitäten ausgebaut werden. Etwas grösser sind die Reserven in ländlichen Gebieten, wo sich gut ein Viertel der Anlagen auf 5G ausbauen lassen.

Exposition durch nichtionisierende Strahlung

Der menschliche Körper ist verschiedenen körpernahen und körperfernen Quellen nichtionisierender Strahlung ausgesetzt. Zu den körperfernen Quellen gehören Basisstationen für den Mobilfunk, Radio- und Fernsehsender, WLAN-Router und Mobiltelefone anderer Personen, und zu den körpernahen Quellen zum Beispiel das eigene Handy, ausserdem Schnurlostelefone, Tablets, Bluetooth-Geräte und Laptops. Die verwendete nichtionisierende Strahlung ist vielfältig und unterscheidet sich durch ihre Frequenz, Intensität, Signalform und ihr zeitliches Muster.

Durch körpernahe Geräte werden nicht alle Körperteile gleichmässig exponiert: Beim Telefonieren mit dem Handy am Ohr etwa nimmt der Kopf den grössten Teil der Strahlungsleistung auf. Auch die Technik beeinflusst die Exposition. So sind die neueren Mobilfunkstandards deutlich effizienter als die älteren: Telefonieren mit 3G oder 4G statt mit 2G führt zu einer deutlich tieferen Exposition. Auch eine gute Verbindungsqualität wirkt sich positiv aus: Je besser die Verbindung ist, d. h., je näher Basisstation und Handy beieinander sind und je weniger Hindernisse es auf der Funkstrecke hat, desto geringer ist die Sendeleistung, die ein Handy aufbringen muss, und desto geringer ist damit auch die Strahlungsleistung, die im Kopf oder in anderen Körperteilen absorbiert wird.

Bislang existieren erst wenige Erhebungen zur persönlichen NIS-Exposition in der Schweiz. Gemäss diesen liegt die über alle Aufenthaltsorte und die Zeit gemittelte Belastung durch körperferne NIS-Quellen typischerweise bei rund 0,2 Volt pro Meter (V/m) und ist von 2008 bis 2015 konstant geblieben. Einzig die Exposition durch Mobilfunk-Basisstationen hat

in diesem Zeitraum auf tiefem Niveau leicht zugenommen. Die durchschnittliche Exposition durch Mobilfunk-Basisstationen nimmt mit zunehmender Urbanität tendenziell zu, die Unterschiede Stadt–Land sind aber gering. Im städtischen Raum ist die kurzzeitig auftretende maximale Exposition durch die Handys umstehender Nutzer rund viermal höher als jene durch Basisstationen. Die durchschnittliche Exposition ist in öffentlichen Verkehrsmitteln am höchsten, wo viele Menschen ihr Handy im Einsatz haben (0,55 V/m).

Die absorbierte Strahlendosis durch das eigene Endgerät kann, insbesondere bei schlechten Verbindungen zur Basisstation, um Grössenordnungen höher sein als jene durch die Basisstation. Dies bedeutet, dass der weitaus grösste Teil der nichtionisierenden Strahlung, dem der durchschnittliche Nutzer ausgesetzt ist, von den körpernahen Endgeräten stammt (rund 90 %).

Stand des Wissens über gesundheitliche Folgen

Als Ausgangspunkt für das Aufzeigen des aktuellen Stands der Forschung zu gesundheitlichen Auswirkungen von Mobilfunkstrahlung diente der Bericht Hug et al. (2014)[1], welcher für den Bericht «Zukunftstaugliche Mobilfunknetze»[2] des Bundesrates in Erfüllung zweier Postulate erarbeitet wurde. Er wurde ergänzt mit seither neu bewerteten Studien, welche hauptsächlich aus den Newslettern der Beratenden Expertengruppe NIS des BAFU (BERENIS) ausgewählt wurden. Weiter wurden seit 2014 publizierte internationale Bewertungsberichte berücksichtigt. Letztlich wurde der Zusammenhang zwischen Mobilfunkstrahlung und Krebsrisiko sowie anderen gesundheitlichen Effekten nach einem gängigen Schema bewertet (ausreichende, begrenzte, unzureichende, abwesende Aussagekraft).

Hinsichtlich eventueller gesundheitlicher Wirkungen der 5G-Funktechnologie gibt es bisher nur wenige Studien an Zellen und Tieren zu akuten Effekten. Die Risikoabschätzung der Arbeitsgruppe hat sich deshalb auf Studien abgestützt, die in der Vergangenheit zur 2G-, 3G- und 4G-Technolgie durchgeführt wurden und mit Frequenzen arbeiten, die im selben Bereich liegen wie diejenigen Frequenzen, die gegenwärtig für 5G genutzt werden.

Die Arbeitsgruppe stellt fest, dass bei den heute verwendeten Mobilfunkfrequenzen unterhalb der Immissionsgrenzwerte der NISV bisher Gesundheitsauswirkungen nicht konsistent nachgewiesen wurden, während gleichzeitig aus Wissenschaft und Praxis unterschiedlich gut abgestützte Beobachtungen für Effekte unterhalb der Immissionsgrenzwerte vorliegen. Die Fragestellung für die Arbeitsgruppe war es daher, die Evidenzlage zu diesen Effekten im Hinblick auf das Vorsorgeprinzip einzuschätzen.

Die Arbeitsgruppe bewertet die Evidenz folgendermassen:

- Im Jahr 2011 stufte die internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) hochfrequente Strahlung als möglicherweise krebserregend für den Menschen ein, dies basierend auf Studienergebnissen zur Mobiltelefonnutzung mit Hinweisen auf erhöhtes Risiko für Gliome und Tumoren des Hörnervs. Seit 2014 sind zwei wichtige grosse Tierstudien erschienen, welche Hinweise auf karzinogene Wirkung bei Mobilfunkstrahlung zeigen. Die Ergebnisse neuer Bevölkerungsuntersuchungen zum Zusammenhang zwischen Mobiltelefonnutzung und Tumorentwicklung sind bis heute uneinheitlich. Bis jetzt durchgeführte Untersuchungen in mehreren Krebsregistern zeigen mehrheitlich keine Zunahmen der Erkrankungsraten. Insgesamt wird die Evidenz für eine krebserregende Wirkung gleich wie 2014 als begrenzt beurteilt.
- Zu der Fragestellung zu Tumoren im Zusammenhang mit Mobilfunkanlagen, Fernseh- und Radiosendern gibt es immer noch sehr wenige Studien. Eine 2014 veröffentlichte Studie fand für alle in der Schweiz zwischen 1985 und 2008 diagnostizierten Kinderkrebsfälle keinen Zusammenhang mit der Exposition von TV- und Radiosendern. Bei den tieferen Expositionen durch Sendeanlagen wird die Evidenz wie 2014 als unzureichend eingeschätzt.
- Eine 2015 publizierte Studie an Mäusen konnte frühere Resultate bestätigen, wonach die gleichzeitige Exposition von hochfrequenter NIS mit einer erwiesenermassen krebserregenden Substanz zu schnellerem Tumorwachstum führt als mit der krebserregenden Substanz allein. Die Replikation dieser Tumorpromotion könnte als Argument für eine Heraufstufung der Evidenz von begrenzt zu ausreichend verwendet werden. Jedoch sprechen die fehlende Expositions-Wirkungsbeziehung und methodische Limitierungen in der Studie sowie eine fehlende Bestätigung für tumorpromovierende Wirkung aus einer epidemiologischen Studie gegen eine Heraufstufung der Evidenz der

Ko-Karzinogenese. Insgesamt wird deshalb die Evidenz für eine Ko-Karzinogenese weiterhin als begrenzt gewertet.

- Es gibt ausreichend Evidenz für physiologische Effekte beim Menschen bei Exposition des Gehirns bei Strahlungsintensitäten im Bereich des ICNIRP-Richtwertes für lokale Exposition. So kommt eine Reihe von experimentellen Studien mit Versuchspersonen zum Ergebnis, dass die Exposition im Intensitätsbereich des ICNIRP-Richtwerts durch ein Mobiltelefon am Kopf die Hirnströme sowohl im wachen Ruhezustand als auch während des Schlafes beeinflusst. Da die Schlafqualität dadurch aber nicht beeinträchtigt wurde, ist die Bedeutung dieses Effekts für die Gesundheit jedoch unklar. Diese experimentellen Studien fanden teilweise auch unterschiedliche Effekte in Abhängigkeit der Modulation, was darauf hindeutet, dass neben der Signalstärke auch die Signalform der Exposition eine Rolle spielen könnte. Inwiefern die Signalcharakteristik (z. B. Modulation) eine Rolle spielt, ist aber noch zu wenig systematisch evaluiert worden.
- Es gibt kaum Studien an Menschen, bei denen der ganze Körper im Bereich des Ganzkörperrichtwerts der ICNIRP, der dem Immissionsgrenzwert für Mobilfunkbasisstationen entspricht, exponiert ist. Im Alltag kommen solche Expositionen, obwohl bis zum Grenzwert prinzipiell zulässig, praktisch nicht vor, was beobachtende Studien schwierig macht. In epidemiologischen Studien sind die am stärksten exponierten Personen deutlich weniger stark exponiert (ca. 0,2–1 V/m) als der Ganzkörpergrenzwert. Eine Reihe von neuen Studien aus Holland und der Schweiz fand keinen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Symptomen und der NIS-Exposition am Wohnort. Das deutet darauf hin, dass es keinen solchen Zusammenhang gibt (Evidenz für Abwesenheit). In diesen Studien (wie auch in der Realität) ist der Anteil Personen, die im Vergleich zum Durchschnitt höheren Expositionen ausgesetzt sind, sehr gering. Sie sind deshalb nicht genügend aussagekräftig, um Auswirkungen bei Expositionen im Bereich des Anlagegrenzwertes und darüber zu evaluieren (Evidenz unzureichend).
- In der ärztlichen Praxis gibt es Fälle, bei denen Patienten ihre Beschwerden plausibel auf hohe NIS-Expositionen im Alltag zurückführen. Ein wissenschaftlicher Beweis für eine solche Wirkung kann jedoch im Einzelfall nicht geleistet werden. In doppelblinden, randomisierten Studien konnte kein Nachweis für eine solche elektromagnetische Hypersensibilität erbracht werden, wobei mehrheitlich die Wahrnehmung von Kurzzeitexpositionen untersucht wurde. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Effekte nur unter bestimmten Bedingungen oder Expositionssituationen manifestieren, welche bisher noch nicht verstanden werden. Aufgrund methodischer Schwierigkeiten bei der Untersuchung elektromagnetischer Hypersensibilität drängen sich hier daher zusätzliche Forschungsaktivitäten auf.
- Es sind sehr viele Zell- und Tierstudien durchgeführt worden. Diese finden häufig biologische Effekte, aber die Ergebnisse sind nicht einheitlich. So findet sich zum Beispiel kein konsistentes Muster in Bezug auf Expositions-Wirkungsbeziehungen oder in Bezug auf die Frage, welche Zellen besonders sensitiv wären. Da diese Studien eine Vielzahl von biologischen Systemen beinhalten und die entsprechende Expertise in der Arbeitsgruppe nicht vertreten war, wurden sie nicht vertieft evaluiert. Entsprechend liegt auch keine Evidenzbeurteilung vor.
- Es gibt bereits einige Zell- und Tierstudien für Expositionen im Bereich von 30 bis 65 GHz (Millimeterwellen). Die Resultate sind jedoch zu wenig robust für eine Evidenzbeurteilung.

Gesundheitsauswirkungen lassen sich wissenschaftlich nie mit absoluter Sicherheit ausschliessen. Die Arbeitsgruppe hat deshalb auch beschrieben, für welche potenziellen Effekte weitere Forschung angezeigt ist.

Optionen

In der Arbeitsgruppe vertretene Stakeholder haben verschiedene Optionen ausgearbeitet, wie aus ihrer jeweiligen Sicht das Schweizer Mobilfunknetz weiterentwickelt werden könnte. Absicht der Mobilfunkbetreiber ist es, 5G nach dem Standard ITU IMT-2020 flächendeckend im Aussen- und Innenbereich bis in die Untergeschosse anbieten zu können. Aufgrund der wissenschaftlichen Unsicherheiten schlägt die Arbeitsgruppe vor, am Vorsorgeprinzip gemäss USG festzuhalten, wenngleich über dessen konkrete Ausgestaltung kein Konsens besteht. Dem Vorsorgeprinzip des USG wird in den verschiedenen Optionen unterschiedlich Rechnung getragen. Demzufolge sind die Vorsorgemargen gegenüber möglichen langfristigen Gesundheitsauswirkungen unterschiedlich gross.

Die eingebrachten Vorschläge (vgl. *Abbildung 1*) lassen sich in drei Gruppen unterteilen:

Beim Status quo (Option 1) wird der Anlagegrenzwert in der NISV auf dem heutigen Niveau belassen. Um ein leistungsfähiges 5G-Netz sicherzustellen, würde diese Option den Neubau von rund 26 000 zusätzlichen Antennenstandorten in der Schweiz und die Nachrüstung von rund 5000 bestehenden Anlagen erfordern. Die dafür notwendigen finanziellen Mittel beliefen sich nach Berechnungen der Branche auf rund 7,9 Milliarden Franken für die Investitionen und auf rund 2,1 Milliarden Franken für den Betrieb über fünf Jahre. Der Zeitbedarf, bis eine qualitativ gute Versorgung mit 5G in der Schweiz flächendeckend vorhanden wäre, würde mit diesem Szenario auf 20 bis 30 Jahre geschätzt. Die maximale Exposition durch Mobilfunkanlagen an OMEN würde im Vergleich zu heute bei konventionellen Antennen gleich bleiben und bei adaptiven Antennen sich erhöhen. Die Zahl der OMEN, die nahe bei Mobilfunkanlagen liegen, würde aufgrund der grösseren Anzahl Mobilfunkanlagen zunehmen. Die Exposition beim Gebrauch der Mobiltelefone würde sich für alle Nutzer infolge der sich mit dieser Option ergebenden Netzverdichtung verringern (je dichter das Netz, desto geringer ist die Exposition beim Gebrauch der Mobiltelefone, weil die Distanz zwischen Antenne und Endgerät in aller Regel kürzer wird und beide ihre Leistung dynamisch absenken).

In einer zweiten Gruppe finden sich Optionen, welche die Leistungsfähigkeit der bestehenden Anlagen durch eine Erhöhung der Anlagegrenzwerte und teilweise ergänzt durch weitere Anpassungen in der NISV vergrössern. Dadurch könnte ein leistungsfähiges 5G-Netz flächendeckend innert weniger Jahre (Optionen 4 und 5) respektive innert 10 bis 20 Jahren (Option 3) realisiert werden. Je nach Variante wären keine zusätzlichen Makrostandorte notwendig (Optionen 4 und 5) oder es würden bis zu 7500 neue Anlagen benötigt (Option 3). Zudem erfolgten an fast allen bestehenden Standorten Nachrüstungen. Option 4 schafft zusätzlich die Möglichkeit zur Mitbenutzung von 3000 Standorten durch mehrere Betreiber. Und bei Option 5 würde eine Verdichtung mit rund 2000 zusätzlichen Kleinzellen erfolgen. Die finanziellen Mittel dieser Optionen betrügen gemäss Schätzungen der Branche rund 1 Milliarde Franken für die Investitionen und 300 Millionen Franken für den Betrieb über fünf Jahre (Optionen 4 und 5) bzw. von 3,2 Milliarden Franken für die Investitionen und 800 Millionen Franken für den Betrieb über fünf Jahre (Option 3). Die maximale Exposition an OMEN durch Mobilfunkanlagen würde mit Option 3 gegenüber heute verdoppelt und mit den Optionen 4 und 5 um den Faktor 4 bis 5 zunehmen. Die Exposition durch die Endgeräte bliebe etwa gleich wie heute.

Die Option 2 sieht keine Änderung des Anlagegrenzwerts, aber strengere Anforderungen in der NISV an Kleinzellenanlagen und adaptive Antennen vor. Damit soll sichergestellt werden, dass das Schutzniveau hinsichtlich NIS zukünftig mindestens erhalten bleibt und insbesondere auch durch adaptive Antennen kurzzeitig keine höheren Expositionen an OMEN als heute auftreten können. Bau und Betrieb von Kleinzellenantennen sollen gleich streng reguliert werden wie bis anhin die Makroantennen, um das entsprechende Schutzniveau auch für sie zu garantieren. Für die flächendeckende Einführung von 5G wären in dieser Option rund 46 500 zusätzliche Standorte nötig. Im Innenraum würden die Anforderungen an 5G nicht vollständig erfüllt werden können, weil unter diesen Bedingungen nicht die nötige Abdeckung und Leistungsfähigkeit erreicht werden könnte. Die finanziellen Mittel für diese Option würden sich gemäss Schätzungen des BAKOM auf rund 13 Milliarden Franken für die Investitionen und auf etwa 3,5 Milliarden Franken für den Betrieb über fünf Jahre belaufen.

Für die Vollzugsbehörden ergäbe sich gegenüber heute bei allen Optionen ein deutlicher Mehraufwand, da eine Vielzahl neuer Anlagen und zahlreiche Umrüstungen bewilligt und kontrolliert werden müssten.

Die Arbeitsgruppe hat sich wegen der je nach Standpunkt unterschiedlichen Gewichtung der abzuwägenden Faktoren nicht auf eine einzige Option einigen können, sodass sie diesbezüglich keine Empfehlung abgeben kann.

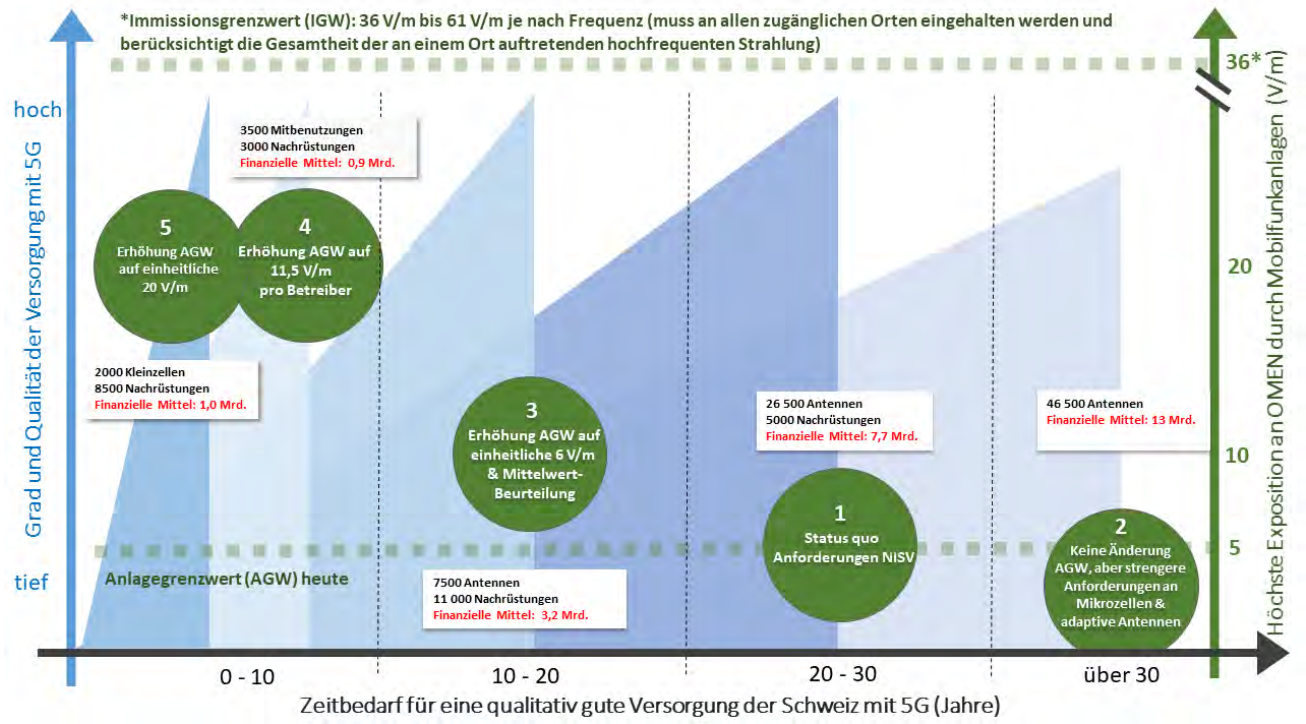

Abbildung 1: Bewertung der fünf Optionen mit den Kriterien Auswirkung auf die Exposition, Zeitbedarf zur Realisierung sowie Kosten mit Zahlen der Branche (weitere Erläuterungen zur Abbildung finden sich in *Kapitel 8*)

Mögliche Konzepte mit Blick auf zukünftige Entwicklungen

Die beschriebenen Optionen zeigen auf, wie der Ausbau der Mobilfunknetze unter den geltenden Rahmenbedingungen oder durch Anpassungen der NISV in den nächsten Jahren vonstattengehen könnte, um in der Schweiz rasch eine flächendeckende 5G-Versorgung anzubieten. Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung stellt sich auch die Frage, wie rasch es geht, bis zum Beispiel der Gewinn an Kapazität, der durch den Zubau von Makrozellen oder einer allfälligen Erhöhung der Anlagegrenzwerte erreicht wird, infolge der weiterhin stark zunehmenden mobil übertragenen Datenmenge wieder aufgebraucht ist und ein erneutes Handeln erforderlich wird.

Damit die Betreiber und auch der Regulator in wenigen Jahren nicht wieder vor den gleichen Fragen stehen wie heute, haben der Schweizerische Städteverband (SSV) und die Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU) Vorschläge in die Arbeitsgruppe eingebracht, die auf die mittelfristige Entwicklung des Mobilfunks zielen, wobei die dafür notwendigen Schritte bereits heute in die Wege geleitet werden könnten.

Die Hauptstossrichtungen sind eine Förderung von Kleinzellen sowie die Trennung von Innenraum- und Aussenraumversorgung, basierend auf einer ausreichenden Verfügbarkeit von Glasfasernetzen. Im Vorschlag des SSV soll eine derartige Mobilfunkversorgung durch eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Städten/Gemeinden und Mobilfunkbetreibern erfolgen, die als Public-Private-Partnership (PPP) konzipiert wird. Im Konzept der AefU soll eine Trennung der Innen- und Aussenraumversorgung durch die Senkung des Anlagegrenzwertes auf 0,6 V/m erreicht werden. Gebäude wären grundsätzlich mittels Festnetzanschlüssen und optional mit ergänzenden Kleinstfunkanlagen zu erschliessen, wobei die Eigentümer und Mieter von Liegenschaften eigenverantwortlich entscheiden würden, ob in ihren Innenräumen eine mobile Versorgung erforderlich respektive erwünscht ist. Gegebenenfalls wäre eine strahlungsarme Infrastruktur mit möglichst geringer Sendeleistung zu verwenden, die Nachbarräume nicht signifikant belastet.

Ob und wie diese Netzstrukturen mit der internationalen Entwicklung der Mobilfunkstandards vereinbar sind, lässt sich heute noch nicht abschätzen. Bei der Variante der AefU mit einem Anlagegrenzwert von 0,6 V/m erachten die Mobilfunkbetreiber eine leistungsfähige Mobilkommunikation in der Schweiz als nicht mehr möglich.

Begleitende Massnahmen

Die Arbeitsgruppe schlägt folgende begleitenden Massnahmen vor:

- Vereinfachungen und Harmonisierungen beim Vollzug:
  Um den Vollzug der NISV bei der Bewilligung und Kontrolle von Mobilfunkanlagen zu vereinfachen und zu harmonisieren, sollten die Grundlagen und Prozesse, auf die sich die Bewilligungen stützen, dem neuesten Stand der Technik angepasst und aktualisiert werden.
- Monitoring der Exposition und der Gesundheitsauswirkungen:
  Es ist ein Monitoring durchzuführen, das sowohl die Exposition durch NIS als auch die möglichen gesundheitlichen Auswirkungen auf die Bevölkerung erfasst. Ein solches NIS-Monitoring wurde bereits vom Bundesrat in Auftrag gegeben und wird derzeit aufgebaut.
- Information und Sensibilisierung der Bevölkerung:
  Information ist wichtig zur Versachlichung der Diskussion. Es ist dabei aber essenziell, diese Information für die Bevölkerung verständlich zu kommunizieren. Es wird angenommen, dass öffentlich verfügbare Angaben über die einzelnen Mobilfunkanlagen die Akzeptanz der Technologie in der Bevölkerung steigern können. Damit würden die Informationen aus dem Monitoring sinnvoll ergänzt.
- Förderung der Forschung im Bereich Mobilfunk und Gesundheit:
  Angesichts der wissenschaftlichen Unsicherheiten empfiehlt die Arbeitsgruppe, dass weitere Forschung betrieben wird. Forschungsförderung wirkt sich mehrfach positiv aus: Sie schliesst wissenschaftliche Erkenntnislücken in einem politisch sensiblen Feld, sie dient als Frühwarnsystem für gesundheitliche Risiken, sie unterstützt als breit akzeptierte Begleit- und Vorsorgemassnahme den Netzaufbau und die Kommunikation von Bund und Kantonen, und sie sichert die schweizerischen Forschungskompetenzen in einem sich enorm schnell entwickelnden Technologiebereich.
- Umweltmedizinische NIS-Beratungsstelle:
  Ebenfalls wird die Schaffung einer unabhängigen umweltmedizinischen NIS-Beratungsstelle empfohlen. Diese soll unter medizinischer Leitung interdisziplinäre umweltbezogene und umweltmedizinische Untersuchungen von Personen durchführen, die ihre Beschwerden auf NIS oder andere Umweltfaktoren zurückführen.
- Austauschplattform «Mobilfunk der Zukunft»:
  Es wird angeregt, eine Austauschplattform mit Bundes- und Kantonsbehörden, Telekomindustrie, Organisationen aus der Medizin, Schutzverbänden und Nutzerverbänden einzuführen. Ziel ist der gegenseitige Austausch und die Information über bevorstehende Technologien oder Entwicklungen mit allen Beteiligten. Der Dialog mit den Stakeholdern, wie er in der Arbeitsgruppe begonnen wurde, soll mit Blick auf kommende Weiterentwicklungen im Bereich Mobilfunk zeitnah weitergeführt werden.

Empfehlungen

Die Arbeitsgruppe gelangt zu den folgenden Empfehlungen an das UVEK:

- Die Entscheide im Hinblick auf die Weiterentwicklung des Mobilfunks in der Schweiz sollen auf die in den Kapiteln 1 bis 7 dargelegten Fakten und Prognosen abgestützt werden.
- Die unter Kapitel 8 (Optionen) eingebrachten Vorschläge sind zur Kenntnis zu nehmen.
- Die unter Kapitel 9 (Mögliche Konzepte mit Blick auf zukünftige Entwicklungen) eingebrachten Vorschläge sind zur Kenntnis zu nehmen.
- Die begleitenden Massnahmen (Kap. 10) sollen umgesetzt werden.
- Der am 28. September 2018 erteilte Auftrag ist abzuschliessen und die Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung aufzulösen.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Bundesrat will, dass die Schweiz die Chancen der Digitalisierung nutzt.[3] Aufbauend auf seiner Strategie für eine Informationsgesellschaft Schweiz[4] lancierte der Bundesrat im Jahr 2016 die Strategie «Digitale Schweiz»[5], mit welcher er fortlaufend im Dialog mit Wirtschaft, Wissenschaft, Forschung und Zivilgesellschaft die Chancen der Digitalisierung optimal nutzen will und hierfür fortlaufend Aktionspläne konzipiert und umsetzt. Am 5. September 2018 verabschiedete der Bundesrat seinen Plan für die Strategie «Digitale Schweiz» für die nächsten zwei Jahre. Ein wichtiges Element dieser Strategie ist die Schaffung leistungsstarker und offener Übertragungsnetze für eine konkurrenzfähige Informationsgesellschaft.[6]

Im Hinblick auf den zukünftigen Ausbau der Mobilfunknetze ist in der Politik, der Bevölkerung und den Medien eine breite und intensive Diskussion zu den Bedürfnissen, dem Nutzen und den Gefahren der zukünftigen Mobilfunkversorgung entstanden. Auf Bundesebene wurden zwischen Sommer 2016 und Sommer 2019 eine Reihe parlamentarischer Vorstösse zu diesem Themenbereich eingereicht (vgl. *Anhang 2: Parlamentarische Vorstösse*). Eine Lockerung der Vorsorgebestimmungen wurde vom Ständerat in den Jahren 2016 und 2018 zweimal knapp abgelehnt. Der Bundesrat war hingegen bereit, im Hinblick auf das prognostizierte Wachstum der zu übertragenden Datenmengen und im Rahmen seines Ermessensspielraums Massnahmen im Sinne der beiden eingereichten Motionen auszuarbeiten.

Im Frühjahr 2019 hat der Bund im Rahmen einer Auktion eine breite Palette von neuen Frequenzen an die drei bisherigen Mobilfunkbetreiber vergeben. Diese Frequenzen sind die Voraussetzung für die Entwicklung der neuen und schnelleren Mobilfunktechnologie der fünften Generation (5G). Die darauffolgenden Ankündigungen der Betreiber, rasch ein 5G-Netz in der Schweiz aufzubauen, haben die laufenden Diskussionen über die Ausgestaltung der zukünftigen Mobilfunkversorgung zusätzlich intensiviert.

In der Diskussion um die Mobilfunktechnologie und der daraus resultierenden nichtionisierenden Strahlung geht es insbesondere um eine ausgewogene Interessenabwägung, welche faktenbasiert zwischen den Zielen des Fernmeldegesetzes auf der einen Seite und den Zielen des Umweltschutzgesetzes auf der anderen Seite vorgenommen wird.

Ende September 2018 hat Frau Bundesrätin Doris Leuthard, die damalige Vorsteherin des Departementes für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, eine Arbeitsgruppe eingesetzt mit dem Auftrag, einen Bericht über die Bedürfnisse und Risiken des zukünftigen Mobilfunks zu erarbeiten. Das UVEK will einerseits die Digitalisierung der Gesellschaft und Wirtschaft vorantreiben und erachtet dafür leistungsfähige Mobilfunknetze nach dem 5G-Standard als unverzichtbar. Andererseits hält das UVEK am Vorsorgeprinzip des Umweltschutzgesetzes fest.

1.2 Ziele und Vorgehen

Das Mandat der Arbeitsgruppe[7] sieht vor, dass der Bericht das weitere Vorgehen hinsichtlich der näheren und weiteren Zukunft des Mobilfunks unter Berücksichtigung der Nutz- und Schutzinteressen thematisiert. Im Zentrum der Analyse soll die kommende fünfte Mobilfunkgeneration (5G) stehen. Dabei soll sich der Bericht insbesondere mit der Frage auseinandersetzen, wie 5G unter Bewahrung des Vorsorgeprinzips zum Schutz der Bevölkerung erfolgreich eingeführt werden kann. Auf der Basis von bewerteten Optionen sollen Empfehlungen gemacht werden.

Die Arbeitsgruppe war breit zusammengesetzt aus Expertinnen und Experten sowie Vertretungen der Mobilfunkanbieter, der Ärztinnen und Ärzte und der Behörden von Bund, Kantonen und Städten (vgl. *Impressum*).

In einem ersten Schritt wurden mit der Unterstützung von drei thematischen Untergruppen mit zusätzlichen Expertinnen und Experten, die von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe beigezogen wurden, die Fakten zusammengetragen:

- Untergruppe 1: Datenverkehr und Standortwahl (Entwicklung der Mobilfunktechnologie, Datenvolumen, Netzstruktur, Ausschöpfung der Grenzwerte, Standortsuche für Antennen, Vollzug);

- Untergruppe 2: Datenvolumen und Exposition (Zusammenhang zwischen Datenvolumen, Strahlung und Exposition, Exposition der Bevölkerung und der Nutzenden durch Basisstationen und Endgeräte bei verschiedenen Netzstrukturen, NIS-Monitoring);
- Untergruppe 3: Gesundheitliche Auswirkungen (aktueller Stand der wissenschaftlichen Forschung und neue Erkenntnisse zu den Wirkungen von hochfrequenter Strahlung auf den Menschen, gegenwärtige und zukünftige reale Exposition der Bevölkerung durch Basisstationen und Endgeräte).

Um die Inhalte der Berichterstattung an das UVEK für die Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung vorzubereiten, wurde eine Kerngruppe gebildet. Die Kerngruppe beauftragte die Mitglieder der Arbeitsgruppe, auf Basis der erarbeiteten Fakten einen Katalog von möglichen Massnahmen im Hinblick auf eine bedürfnisgerechte Mobilfunkversorgung auszuarbeiten, und nahm eine thematische Gruppierung vor. Daraus wurden Optionen abgeleitet, die jeweils die zentralen Ansprüche einer Stakeholdergruppe in Bezug auf 5G abdecken und mit denen die Herausforderungen in Bezug auf 5G angegangen werden könnten. Diese Optionen wurden sodann in Bezug auf verschiedene Aspekte bewertet. Namentlich wurden Kosten und Zeitbedarf bei den Betreibern, Veränderung der Exposition der Bevölkerung, administrativer Aufwand für Behörden und Netzbetreiber und die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit eines Mobilfunknetzes untersucht und beurteilt. Schliesslich wurden aus den Optionen Empfehlungen ausgearbeitet, die in die Arbeitsgruppe und den Schlussbericht einflossen.

Die Arbeitsgruppe hat in der Zeit von November 2018 bis September 2019 insgesamt sechs Sitzungen durchgeführt. Die Untergruppen wurden Ende November 2018 aktiviert und hielten zwischen drei und fünf Sitzungen ab. Im Juni 2019 wurden die Untergruppen aufgelöst, nachdem sie ihre internen thematischen Faktenberichte zuhanden der Arbeitsgruppe abgeliefert hatten. Die Kerngruppe hat zwischen Mai und Juli 2019 viermal getagt. Die Zusammensetzungen der Untergruppen und der Kerngruppe sowie deren Mandate sind im *Anhang 3: Mandate und Mitglieder Untergruppen und Kerngruppe* aufgeführt.

Der vorliegende Schlussbericht der Arbeitsgruppe stellt die aktuellen Fakten zur Mobilfunktechnologie, zu Datenverkehr und Netzstrukturen, zur Exposition der Bevölkerung, zu den gesundheitlichen Auswirkungen und zu Vollzugsaspekten zusammen. Die zuhanden der politischen Entscheidungsinstanzen von beteiligten Stakeholdern eingebrachten fünf Optionen (*Kap. 8*), zwei Vorschläge für künftige Entwicklungen (*Kap. 9*) und sechs begleitenden Massnahmen (*Kap. 10*) wurden in der Absicht formuliert, eine Mobilfunkversorgung unterschiedlicher Qualität und Ausprägung unter Beachtung der Schutz- und Nutzungsziele in näherer Zukunft zur Diskussion zu stellen.

2 Rechtsgrundlagen

2.1 Fernmeldebereich

Das Fernmeldewesen ist nach Artikel 92 der Bundesverfassung Sache des Bundes. Das Fernmeldegesetz[8] (FMG) bezweckt, dass der Bevölkerung und der Wirtschaft vielfältige, preiswerte, qualitativ hochstehende sowie national und international konkurrenzfähige Fernmeldedienste angeboten werden.

Am 6. September 2017 legte der Bundesrat dem Parlament einen Entwurf für die Revision des Fernmeldegesetzes vor, um den technologischen Entwicklungen im Bereich der Telekommunikation Rechnung zu tragen – insbesondere der Tatsache, dass mit den breitbandigen Mobilfunk- und Festnetzen Daten immer schneller übertragen werden können und die von neuen Akteuren erbrachten Internetdienstleistungen nach und nach an die Stelle der Dienstleistungen traditioneller Anbieter getreten sind.[9] Die Revision wurde vom Parlament in mehreren parlamentarischen Durchgängen bereinigt und am 22. März 2019 verabschiedet.[10] Den Vorschlag einer technologieneutralen Entbündelung der letzten Meile lehnte das Parlament vorerst ab, hingegen soll der Bundesrat über die Entwicklung alle drei Jahre Bericht erstatten.

Im September 2018 hat der Bundesrat die Strategie «Digitale Schweiz»[11] verabschiedet. Die Strategie betont die Bedeutung einer flächendeckenden, wettbewerbsfähigen, zuverlässigen und effizienten Kommunikationsinfrastruktur. Weiter wird ausgeführt, dass hochwertige, effiziente und sichere Netz-infrastrukturen das Rückgrat bilden für das erfolgreiche Funktionieren von Wirtschaft und Gesellschaft im digitalen Zeitalter und dass eine zuverlässige, international konkurrenzfähige und preiswerte Kommunikationsnetzwerkinfrastruktur Voraussetzung ist für die Entwicklung von neuen Lebens- und Arbeitsformen, Dienstleistungen und Produkten.

Entsprechend den Zielen des Fernmeldegesetzes und der Strategie «Digitale Schweiz» sollen die Rahmenbedingungen für den Ausbau der Kommunikationsinfrastruktur derart ausgestaltet sein, dass die Schweiz im internationalen Wettbewerb eine führende Position einnehmen kann. Vor diesem Hintergrund stellt die 5G-Technologie ein wichtiges Element dar.

Die Eidgenössische Kommunikationskommission (ComCom) vergibt die Mobilfunkfrequenzen in Verbindung mit der Verpflichtung, Dienste über eine eigene Netzinfrastruktur anzubieten, wobei gewisse Formen der Zusammenarbeit zwischen den Netzbetreibern zulässig sind. Als Teil der im Frühjahr 2019 versteigerten Frequenzen gilt das 3,5-GHz-Band als entscheidende Basis für die Einführung von 5G. Das insgesamt neu vergebene Spektrum dient jedoch nicht ausschliesslich der Einführung der neuen Mobilfunkgeneration 5G, sondern könnte ebenso die Grundlage bilden für den weiteren Ausbau der bestehenden Mobilfunknetze, vorerst auch in den tieferen Frequenzbändern der vierten Mobilfunkgeneration LTE. Die im Rahmen der Auktion eingeräumten Rechte und Pflichten zur Nutzung der neu zur Verfügung gestellten Frequenzbänder gelten bis April 2034.

2.2 Umweltbereich

Das Umweltschutzgesetz[12] (USG) hat auf der Grundlage von Artikel 74 der Bundesverfassung zum Ziel, Menschen, Tiere und Pflanzen, ihre Lebensgemeinschaften und Lebensräume gegen schädliche oder lästige Einwirkungen zu schützen sowie die natürlichen Lebensgrundlagen dauerhaft zu erhalten. Zudem sollen Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, im Sinne der Vorsorge frühzeitig begrenzt werden. Diese Vorgaben gelten auch für die nichtionisierende Strahlung von Mobilfunksendeanlagen.

Für den Bereich des Immissionsschutzes (u. a. Mobilfunkstrahlung) wird das Vorsorgeprinzip in Artikel 11 Absatz 2 USG präzisiert. Demnach sind Emissionen unabhängig von der bestehenden Umweltbelastung im Rahmen der Vorsorge so weit zu begrenzen, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist. Das so verankerte Vorsorgeprinzip ist ein Grundprinzip des Schweizer Umweltrechts und wird auch in zahlreichen internationalen Dokumenten und Übereinkommen erwähnt. Ihm liegt der Gedanke zugrunde, unüberschaubare Risiken zu vermeiden und Unsicherheiten über längerfristige Wirkungen von Umweltbelastungen dadurch zu berücksichtigen, dass eine Sicherheitsmarge

eingeplant wird. Bei der Bestimmung des zulässigen Masses der Emissionsbegrenzung ist ein angemessenes Verhältnis zwischen den angeordneten Vorsorgemassnahmen und den damit vermiedenen Risiken anzustreben.

In einem zweiten Schritt müssen die Emissionsbegrenzungen nach Artikel 11 Absatz 3 USG über vorsorgliche Massnahmen hinaus verschärft werden, wenn feststeht oder zu erwarten ist, dass die Einwirkungen unter Berücksichtigung der bestehenden Umweltbelastung schädlich oder lästig werden.

Die Umsetzung und Konkretisierung des gesetzlichen Auftrags geschieht auf der Verordnungsebene durch den Bundesrat. Die Strahlung der Sendeanlagen wird durch die Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung[13] (NISV) begrenzt, welche sich auf das USG abstützt. Die NISV enthält zum einen Immissionsgrenzwerte (IGW) zum Schutz des Menschen vor den wissenschaftlich nachgewiesenen und akzeptierten Gefährdungen durch die Strahlung. Die IGW werden nach dem Stand der Forschung oder der Erfahrung festgelegt. Sie müssen auch empfindliche Bevölkerungsgruppen vor einer Gesundheitsgefährdung schützen und derart festgelegt sein, dass die Bevölkerung in ihrem Wohlbefinden nicht wesentlich gestört wird. Als IGW wurden die von der Internationalen Kommission für Strahlenschutz (ICNIRP) im Jahr 1998 empfohlenen Richtwerte[14], welche vor thermischen Effekten schützen, in die NISV übernommen. Sie gelten überall, wo sich Menschen aufhalten können. Nicht berücksichtigt sind in den IGW hingegen biologische (sogenannte nicht-thermische) Effekte im Niedrigdosisbereich und wissenschaftlich nicht nachgewiesene Langzeitfolgen.

Zusätzlich zu den IGW sind in der NISV Anlagegrenzwerte (AGW) festgeschrieben, die das Vorsorgeprinzip des USG abschliessend konkretisieren. Jede einzelne Mobilfunkanlage darf Orte, wo sich Menschen regelmässig während längerer Zeit aufhalten, bezogen auf die elektrische Feldstärke mit nur einem Zehntel des IGW belasten. Zu diesen sogenannten «Orten mit empfindlicher Nutzung» (OMEN) gehören Wohnungen, Schulen, Spitäler, ständige Arbeitsplätze oder raumplanerisch festgelegte Kinderspielplätze.

Eine Änderung bzw. Lockerung der heutigen vorsorglichen Emissionsbegrenzungen würde den Nachweis bedingen, dass die zur Einhaltung der geltenden Anlagegrenzwerte notwendigen Massnahmen technisch oder betrieblich nicht mehr möglich oder wirtschaftlich nicht mehr tragbar sind.

Die Nachbarstaaten der Schweiz, die meisten Staaten der Europäischen Union und die USA richten sich allein nach dem international anerkannten IGW und kennen keinen zusätzlichen, tieferen AGW.[15] International wird der Vorsorgegedanke oftmals mit anderen Konzepten und Massnahmen umgesetzt, zum Beispiel mit Risikomonitoring, Information und dedizierter Forschung.

2.3 Weitere Rechtsgebiete

Die Anforderungen des Planungs- und Baurechts, des Natur- und Heimatschutzrechts sowie des Waldrechts an den Bau von Mobilfunksendeanlagen sind im Leitfaden Mobilfunk für Gemeinden und Städte[16] zusammengefasst. Zudem ist in diesem Zusammenhang auf die Mobilfunk-Empfehlungen der Schweizerischen Bau-, Planungs- und Umweltdirektorenkonferenz[17] (BPUK) hinzuweisen.

Neben den Sendeantennen der Basisstationen geben auch Handys und andere Telekommunikations-Endprodukte nichtionisierende Strahlung an die Umgebung ab. Deren Begrenzung ist nicht Gegenstand des schweizerischen Umweltschutzgesetzes, sondern des Produktesicherheitsrechts. Hinsichtlich der Strahlungsintensität gelten die gleichen Anforderungen wie in der Europäischen Union, d. h., die Hersteller von Telekommunikations-Endprodukten müssen sicherstellen, dass solche Geräte die Gesundheit der Nutzerinnen und Nutzer nach aktuellem Stand des Wissens und der Technik nicht gefährden. Sie müssen zu diesem Zweck die Grenzwerte einhalten, welche die entsprechende Empfehlung des Europäischen Rates festlegt.

3 Mobilfunktechnologie

3.1 Mobilfunknetze in der Schweiz

In der Schweiz betreiben die Firmen Swisscom, Sunrise und Salt kommerzielle Mobilfunknetze, die bislang auf den Standards GSM, UMTS und LTE beruhen. Diese entsprechen verschiedenen Generationen von Mobilfunktechnologien (2G, 3G und 4G). Alle Mobilfunkkonzessionen sind technologieneutral formuliert, d. h., die Betreiber sind frei, welche Technologie sie in welchem Frequenzband einsetzen wollen.

Neben den kommerziell genutzten Netzen existieren zwei weitere landesweite (Mobil-)Funknetze. Die Schweizerischen Bundesbahnen SBB betreiben mit GSM-Rail (oder GSM-R) ein Netz, welches für den Bahnbetrieb eingesetzt wird (z. B. Führerstand-Signalisation). Und mit Polycom wird das flächendeckende Sicherheitsnetz Funk der Behörden und Organisationen für Rettung und Sicherheit (BORS) betrieben. Dieses basiert auf dem Standard Tetrapol und ermöglicht den Funkkontakt innerhalb und zwischen den Organisationen Grenzwacht, Polizei, Feuerwehr, sanitätsdienstliches Rettungswesen, Zivilschutz und unterstützende Verbände der Armee.

Die drei kommerziellen Mobilfunknetze werden in Qualitätstests als «herausragend» oder «sehr gut» bewertet und sind die besten in Europa. Auch in einem aktuellen weltweiten Vergleich zwischen 87 Ländern landete die Schweiz in vier der fünf bewerteten Kategorien in den Top Ten. Das Sicherheitsfunknetz Polycom und das GSM-Rail-Netz der Eisenbahnen müssen eine sehr hohe Sicherheit und Verfügbarkeit aufweisen.

Die Mobilfunktechnologie entwickelt sich stetig weiter, derzeit erfolgt die Einführung der fünften Generation (5G). 5G wird von den drei kommerziellen Mobilfunkbetreibern vorangetrieben, wird jedoch auch einen Einfluss auf das Mobilfunknetz der Bahn und das Sicherheitsfunknetz haben. So wird die Nachfolgetechnologie von GSM-R voraussichtlich ebenfalls auf 5G beruhen.

3.2 Einführung von 5G

3.2.1 Technik und Anwendungen von 5G

5G ist der neue internationale Mobilfunkstandard.[18] Die Anforderungen an 5G wurden durch die International Telecommunication Union ITU (Unterorganisation der UNO) festgelegt und in den International-Mobile-Telecommunications-2020-Spezifikationen (IMT-2020) festgehalten (Auswahl vgl. *Tabelle 1*). 5G wurde vom European Telecommunications Standards Institute (ETSI) im Rahmen der Third Generation Partnership Project (3GPP) entwickelt und wird von der ITU als weltweiter Standard akzeptiert werden.

Tabelle 1: Anforderungen an 5G und Unterschiede gegenüber 4G[19]

Anforderungen an 5G	Unterschiede von 5G gegenüber 4G
• Grosse Bandbreite: >10 GBit/s Peak[20] • Kurze Latenz: 1–4 ms Air Interface • Hohe Sicherheit und Verfügbarkeit: 99,999 Prozent • Sehr hohe Gerätedichte (für IoT) • Lange Batterielaufzeit (für IoT): >10 Jahre • Stromautonomie vernetzter IoT-Geräte: >10 Jahre	• Die Datenübertragungsrate ist 100-mal höher. • Die Reaktionszeit (Latenz) ist 30- bis 50-mal kürzer. • Bedienung von 100-mal mehr Endgeräten (eine Million Geräte pro km²) • Die Stromautonomie ist 10-mal höher.

Mit 5G werden grössere Übertragungsraten und kürzere Reaktionszeiten möglich, aber auch die Anzahl vernetzter Geräte und die Energieeffizienz pro übermittelte Dateneinheit nehmen zu. Neben diesen quantitativen Anforderungen von IMT-2020 ermöglicht 5G neue qualitative Aspekte, die bisher nicht oder nur begrenzt möglich waren. Im Vergleich zu den bisherigen Mobilfunkgenerationen stellt 5G damit verschiedene Weiterentwicklungen und neue Anwendungen in Aussicht:

- 5G ermöglicht in den Bereichen Smart-City und Smart-Home eine bessere Bewirtschaftung und Auslastung der Infrastruktur (Verkehrsmanagement, Energiesteuerung etc.).
- Es sollen Verbesserungen für das Internet der Dinge (IoT) und hochverfügbare Netze ermöglicht werden. Hierzu soll das Mobilfunknetz flexibler werden.
- Edge-Computing ermöglicht Computing- und Storage-Dienste nahe beim Kunden. Damit wird die Performance verbessert und den Anforderungen an Datensicherheit entsprochen, was gerade bei kritischen Infrastrukturen oder Industriebetrieben zwingend notwendig ist.
- Unternehmen können ihre Produktionsprozesse und Logistik effizienter gestalten, indem Mobilfunknetze direkt in ihrem Wertschöpfungsprozess eingesetzt werden. Um auch für die erwartete grosse Verbreitung des Internets der Dinge gerüstet zu sein, wird 5G gegenüber heute eine rund 100-mal höhere Anzahl von Geräten pro Funkzelle bedienen können.
- Es können auf den physischen Netzen mehrere virtuelle Teilnetze geschaffen werden, um spezifische Kundenanforderungen erfüllen zu können. Dies erlaubt es, beispielsweise für Blaulichtdienste, die Eisenbahn oder andere Unternehmen und Organisationen hochverfügbare Teilnetze basierend auf dem öffentlichen Mobilfunknetz bereitzustellen – man spricht hier von Network Slicing.
- Es soll möglich werden, dass nahe beieinander befindliche Mobilfunkgeräte direkt miteinander kommunizieren können. Diese Device-to-Device-Kommunikation (D2D) ist in der derzeitigen Standardisierungsversion von 5G noch nicht integriert, soll aber später darin aufgenommen werden. Eine direkte Kommunikation soll auch zwischen Fahrzeugen möglich werden. Diese werden nicht nur untereinander, sondern auch mit der Infrastruktur und dem Netz bzw. Internet kommunizieren.
- Mit den tiefen Reaktionszeiten von einigen wenigen Millisekunden werden das Fernsteuern und Kontrollieren von Geräten, Maschinen oder Anlagen verzögerungsfrei und in Echtzeit möglich – beispielsweise von autonomen Verkehrsträgern (Fahrzeugen und Drohnen), Produktionsmaschinen oder Industrierobotern.
- Virtuelle und erweiterte Realitätsdarstellungen werden durch 5G schneller, realistischer und in Echtzeit möglich.

Eine Abschätzung der volkswirtschaftlichen Effekte in der Schweiz wurde im Rahmen einer von der Mobilfunkbranche in Auftrag gegebenen Studie[21] quantifiziert. Danach schafft 5G bis 2030 rund 137 000 neue Arbeitsplätze und eine zusätzliche Bruttoproduktion von 42,4 Milliarden Franken. Dieser Produktionszuwachs entsteht primär ausserhalb der Telekombranche bei den Anwenderunternehmen, beispielsweise in der produzierenden Industrie, der öffentlichen Verwaltung, im Detail- und Grosshandel, bei Banken und Versicherungen oder im Transportgewerbe.

Die neuen Eigenschaften von 5G kommen nicht primär durch die Funktechnik zustande. Im Gegensatz zu 4G ist 5G «software-defined», das heisst, das Mobilfunknetz kann adaptiv den jeweiligen Anforderungen angepasst werden und wird dadurch schlanker und schneller. Die höhere Leistungsfähigkeit von 5G ist auch das Resultat von besseren Computern in Sende- und Empfangsgeräten. Dies ermöglicht einen qualitativen und quantitativen Sprung gegenüber 4G.

Bezüglich der Funktechnik und der Strahlung der Antennen ist 5G mit den heute verfügbaren 4G-Frequenzen vergleichbar. Es kommt dabei dieselbe Modulationstechnik zum Einsatz. Ein Unterschied besteht hingegen in der verfügbaren Bandbreite, also der gleichzeitig übertragbaren Datenmenge und damit höheren Sendeleistung sowie einer sich schneller und ausgeprägter ändernden Expositionssituation. Für die Übertragung dieser breiteren Bänder werden höhere Frequenzen benötigt. Unterschiedlich ist auch die Verarbeitung der übermittelten Informationen: Die sowohl in der Netzstruktur der Basisstationen als auch in den mobilen Endgeräten benutzten Verfahren ermöglichen gegenüber 4G eine leistungsfähigere Datenverarbeitung.

Um die Ziele von 5G zu erreichen, sind jedoch auch Änderungen in der Funktechnik nötig. So sind etwa Anpassungen an der Signalstruktur der Funksignale, der sogenannten Luftschnittstelle, erforderlich. Es handelt sich hier um eine Weiterentwicklung der Luftschnittstelle der Vorgängertechnologie LTE (4G). Bei 5G wird die Luftschnittstelle «New Radio» genannt. Um die grösseren Bandbreiten (bis zu 800 MHz) und die verschiedenen Frequenzbänder[22] effizienter nutzen zu können, musste die Signalstruktur schlanker und flexibler gestaltet werden. 5G wird daher wesentlich weniger Kontrollsignale aussenden als 4G. Diese Anpassungen an der Signalstruktur werden nicht nur zu weniger Störungen in den Funkzellen führen und damit die Übertragungsqualität erhöhen, sondern auch die gemittelte Exposition in der nicht genutzten Funkzelle reduzieren. In einem 5G-Netz können die genutzten Bandbreiten gegenüber 4G flexibler eingestellt werden, um 5G sowohl in tieferen als auch höheren Frequenzbändern zu betreiben. Auch die Koexistenz von 4G und 5G innerhalb des gleichen Frequenzbands soll möglich sein. 5G soll es ferner ermöglichen, zusätzliche Kapazitäten über die WLAN-Funktionen zu nutzen. Der Vorteil liegt darin, dass alle Anwendungen durch eine Technologie global zur Verfügung stehen, was Innovationen vorantreibt und Kosten reduziert.

Auf der Endgeräteseite ist die Bandbreite ebenfalls flexibel. Ein Mobilfunkgerät muss nicht unbedingt die gesamte von der Basisstation vorgeschlagene Bandbreite nutzen, sondern funktioniert auch nur mit einem Teil davon. Damit kann das Gerät Strom sparen, was die lange Batterielaufzeit bei Sensoren erklärt.

In einem ersten Schritt wird 5G in der Schweiz vorwiegend im Frequenzband von 3,5 GHz umgesetzt werden, weil dies gegenüber den herkömmlichen Frequenzen höhere Bandbreiten ermöglicht. Allein mit diesem Frequenzband können theoretisch Datenraten von ungefähr 2,5 GBit/s erreicht werden. Die Technologie ist aber in allen Mobilfunkfrequenzen einsetzbar. 5G erlaubt auch die Nutzung von Millimeterwellen-Bändern ab 24 GHz. Eine Einführung in der Schweiz ist aber zurzeit von den Betreibern noch nicht geplant. Um diese Frequenzbänder nutzen zu können, muss zudem der Bundesrat den Nationalen Frequenzzuweisungsplan (NaFZ) ändern (vgl. *Kap. 3.2.3*), ComCom und BAKOM müssten ein Vergabeverfahren einleiten.

Ein Überblick über die Entwicklung von 5G im Ausland findet sich auf den Internetseiten des 5G-Observatoriums der EU.[23]

3.2.2 Neue Antennentechnologien

Funktechnisch gesehen können Frequenzen um 3,5 GHz mehr Bandbreite transportieren, sie haben aber schlechtere Ausbreitungseigenschaften als die bisher genutzten Frequenzbereiche (800 MHz bis 2,6 GHz), sie werden bei der Übertragung durch die Luft oder durch Gebäudehüllen stärker abgeschwächt. Um diese schlechteren Eigenschaften zu verringern, können adaptive Antennen eingesetzt werden. Mit solchen Antennen, die aus einer Vielzahl von einzeln angesteuerten Antennenelementen bestehen, kann das Signal in die Richtung des Nutzers bzw. des Mobilfunkgeräts gesteuert werden («Beamforming»).

Eine Übertragungstechnik mit Antennen, die aus mehreren Sende- und Empfangsantennen oder -antennenteilen besteht, wird als MIMO[24] (Multiple Input Multiple Output) oder bei sehr vielen Sendeantennen auch als Massiv-MIMO bezeichnet und ist ebenfalls für 5G vorgesehen. Die Sendeleistung wird auf alle Sendeantennen aufgeteilt und das zu übertragende Signal von allen Antennenelementen ausgesendet respektive auch von mehreren Antennenelementen empfangen. Die Empfangsqualität wird damit verbessert und sowohl die Reichweite als auch die mögliche Datenübertragungsrate werden erhöht.[25]

Durch die gerichtete Aussendung der Information zum Nutzer in der Funkzelle entstehen mit Beamforming eine höhere Komplexität und eine höhere Dynamik der ausgesendeten Signale. Die Signale werden bevorzugt dorthin gesendet, wo sie gebraucht werden. Dies führt – wenn die Leistung insgesamt nicht deutlich gesteigert wird und die Nutzung sich nicht massgeblich ändert – zu weniger Interferenzen als bei älteren Technologien. Erste Modellrechnungen[26] und Messungen an Anlagen[27] zeigen auf, dass beim Einsatz von Beamforming in den meisten Fällen deutlich weniger als der theoretische Maximalwert der Sendeleistung ausgesendet wird (vgl. *Kap. 5.4.5*). Auch bei hoher Verkehrsauslastung wird nie mehr als ein Viertel und in bestimmten Szenarien nie mehr als ein Achtel der theoretischen Maximalleistung ausgesendet. Da der Datenverkehr im Gegensatz zu den Kontrollsignalen nicht mehr wie bisher in die gesamte Funkzelle abgestrahlt, sondern tendenziell zum Nutzer hingelenkt wird, kann die über die Fläche und die Zeit gemittelte Exposition mit dem Einsatz von Beamforming reduziert werden.

3.2.3 Ausblick auf den Anwendungsbedarf von Millimeterwellen im Mobilfunk

Die Entwicklung im Mobilfunk ist rasant. Entsprechend ist eine Abschätzung der zukünftigen Bedeutung der Nutzung von Millimeterwellen (MMW) im Mobilfunk nicht einfach. Sie ist abhängig vom spezifischen Potenzial und von Innovationen im Generellen.

5G wird in der Schweiz zurzeit mit Frequenzen unterhalb 6 GHz eingeführt. Die volle Leistungsfähigkeit von 5G (d. h. mindestens 10 GBit/s Downlink) ist in diesem Bereich nicht möglich, da nicht genügend Frequenzbandbreite vorhanden ist. In der Schweiz wird 5G zurzeit im Bereich der Millimeterwellen nicht eingesetzt. Mit diesen höheren Frequenzen könnten in Zukunft Spitzendatenübertragungsraten von über 20 GBit/s erreicht werden. Diese Frequenzen haben aber nochmals deutlich schlechtere Ausbreitungseigenschaften (Gebäudehülle, metallbedampfte Fenster, Menschen, Laub, Regen etc.), und je nach Frequenz kann die sinnvolle Versorgungsdistanz nur einige Meter betragen. Zudem brauchen diese Frequenzen in den meisten Fällen eine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger. Dies ist beispielsweise bei den Besuchern eines Fussballspiels im Stadion machbar, nicht aber zwischen IoT- und anderen Endgeräten in Gebäuden und einer aussenstehenden Antenne.

An der World Radio Conference wurden im Herbst 2019 weltweit Frequenzbänder im Millimeterbereich für Mobile Kommunikation identifiziert. Für eine Nutzung dieser Frequenzbänder in der Schweiz entscheidet der Bundesrat im Rahmen der Genehmigung des Nationalen Frequenzzuweisungsplans (NaFZ). Basierend auf diesem Entscheid kann die ComCom die Nachfrage am Markt abklären und bei Bedarf die entsprechenden Frequenzen vergeben (z. B. durch eine Auktion). In den USA und in Asien werden Millimeterwellen zur Breitbandversorgung von Gebäuden verwendet. Obwohl die Schweiz mit den FTTH-Netzen (fiber to the home) und den Glasfaserhybridnetzen (von Swisscom, UPC und anderen Anbietern) eine andere Ausgangslage hat, werden diese Ansätze in den zersiedelten Gebieten der Schweiz auch zu prüfen sein. Inwiefern in der Schweiz tatsächlich ein Bedarf an Millimeterwellen zur Breitbandversorgung besteht, müssten ComCom und BAKOM mit einer Bedarfserhebung vor der Vergabe dieser Frequenzen an die Mobilfunkanbieter prüfen (analog der Bedarfsabklärung zur Versteigerung der bisherigen Frequenzen). Weitere denkbare Anwendungen der Millimeterwellen in der Schweiz wären die Versorgung abgelegener Gebäude mit Hochbreitband, die Kapazitätsversorgung in kleinen Gebieten mit grosser Nutzung (Hauptbahnhof, Einkaufszentrum, Stadion) oder die Campusversorgung in Industriehallen.

4 Fakten und Prognosen

4.1 Datenvolumen

4.1.1 Prognosen für die globale Datenentwicklung

Seit der Einführung des Smartphones hat die Nutzung des mobilen Internets exponentiell zugenommen. In der Schweiz hat sich das transportierte Datenvolumen in den letzten Jahren alle 12 bis 18 Monate verdoppelt[28]. Die folgenden Prognosen zeigen, wie sich dieses Wachstum in den nächsten Jahren fortsetzen wird. Die nachstehenden Datenangaben und -prognosen basieren auf dem Ericsson Mobility Report von November 2018.[29]

Abbildung 2 zeigt die erwartete Zunahme der übertragenen Daten nach den Technologien 5G und älter. Es ist erkennbar, dass das mit der 5G-Technologie übertragene Datenvolumen relativ langsam zunehmen wird, da die Einführung einer neuen Technologie immer eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt.

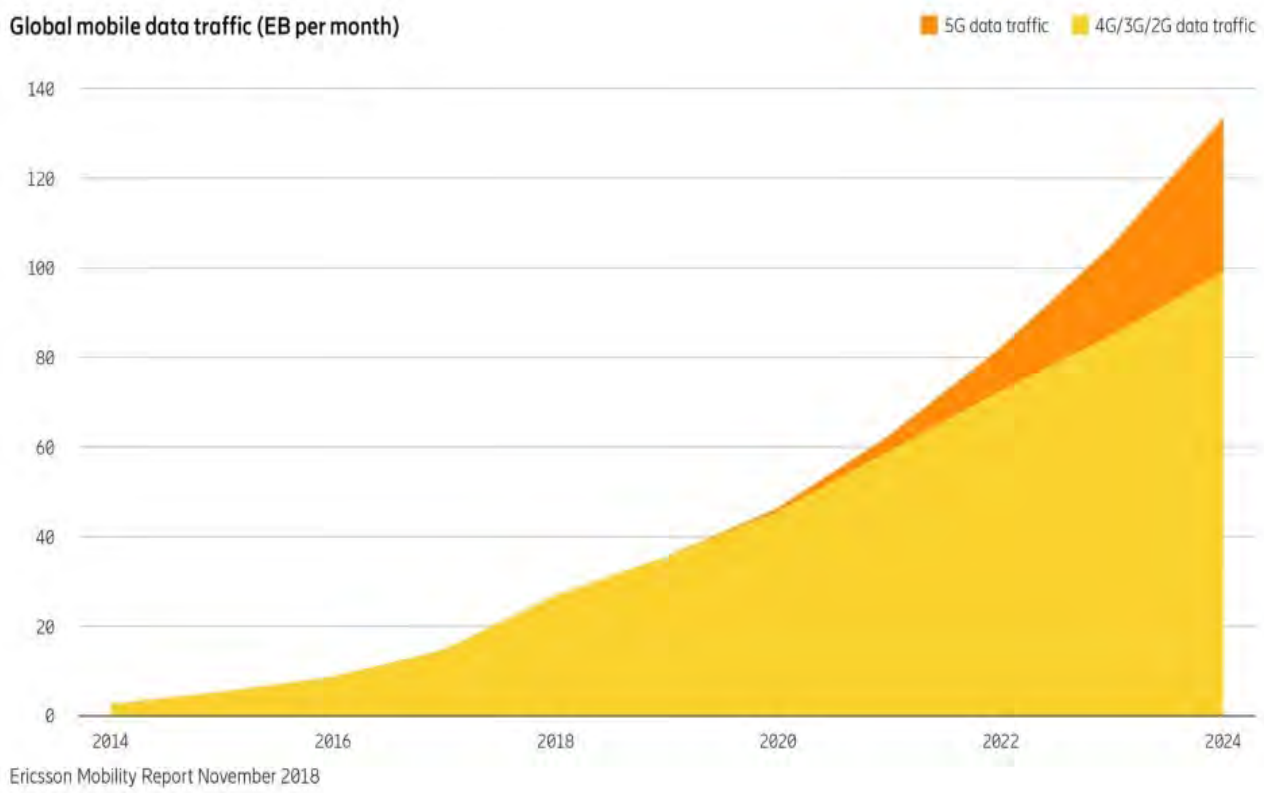

Abbildung 2: Entwicklungsprognose für das globale Datenvolumen nach den Technologien 5G und älter (4G, 3G und 2G) [EB per month: exabytes (10^{18}) pro Monat]

Der Hauptteil des mobilen Datenverkehrs wird (auch international) durch Videoanwendungen verursacht (rund zwei Drittel), wobei in diesem Bereich eine weitere starke Zunahme prognostiziert wird (vgl. Ziff. 4.2.1.).

Im Bereich von Anwendungen des Internets der Dinge wird in den nächsten fünf Jahren mit einem Wachstum von ungefähr 400 Prozent der Anzahl Datenverbindungen gerechnet.

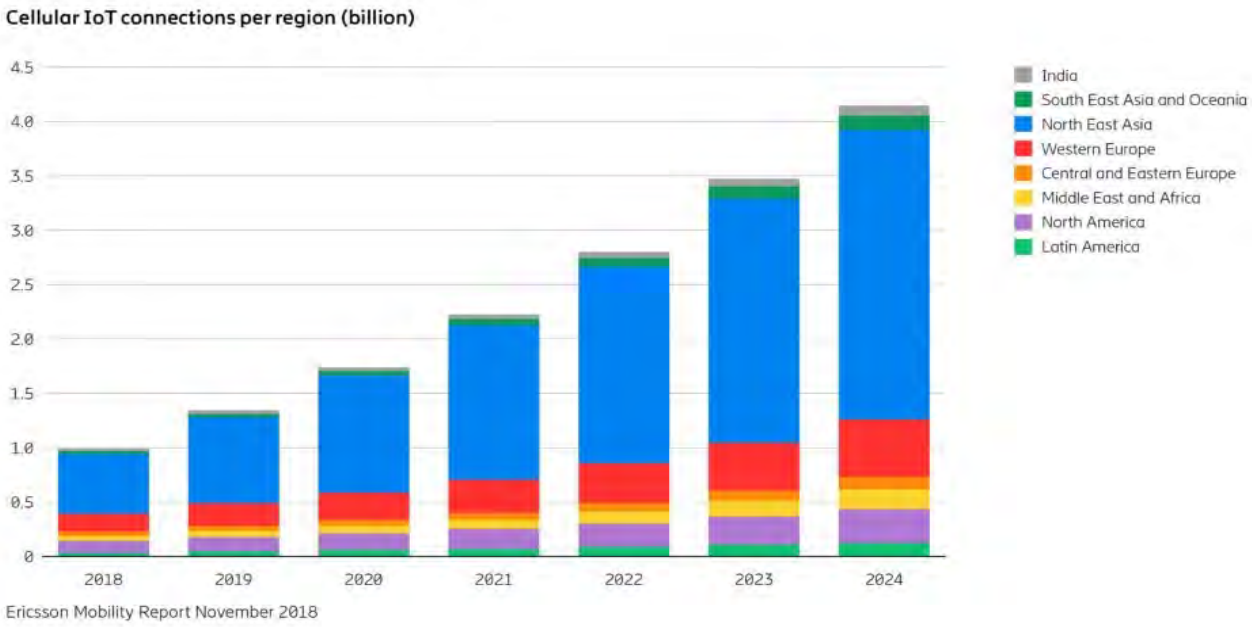

Abbildung 3: Entwicklungsprognose für IoT-Verbindungen, nach globalen Regionen [billion: Milliarde]

Nach dieser Prognose wird das totale mobil übertragene Datenvolumen in Westeuropa bis 2024 gegenüber 2018 um mehr als den Faktor 5 (524 %) ansteigen. Es wird angenommen, dass 2024 ein Viertel des gesamten Volumens durch 5G übertragen wird, was allein ca. dem 1,3-fachen der heute total übertragenen Datenmenge entspricht.

4.1.2 Prognosen für die Schweiz

Grundsätzlich sind die im Ericsson Mobility Report beschriebenen Entwicklungen auch in der Schweiz absehbar. Auch nach der Einführung von 5G wird in den nächsten zwei bis fünf Jahren eine weitere starke Steigerung des Datenvolumens auf dem 4G-Netz erwartet. Dies bedeutet konkret, dass die Mobilfunknetze schon allein für die 4G-Technologie weiter ausgebaut werden müssen. Einige der zukünftigen IoT-Anwendungen mit Mobilfunkverbindungen (z. B. Parkplatzsensoren, Füllstandsmelder) kommunizieren zwar nur selten und benötigen daher nur ein geringes Datenvolumen, dennoch ist aufgrund der Vielzahl und Vielfalt der Anwendungen insgesamt von einer Steigerung des Datenvolumens auszugehen.

Alle drei Betreiber in der Schweiz (Swisscom, Sunrise, Salt) geben an, dass ihre Daten sich gleichermassen in die Anwendungskategorien aufteilen wie dies im Ericsson Mobility Report gemäss *Abbildung 4* ersichtlich ist. So machen die Videoanwendungen mit etwa 60 Prozent den grössten Anteil am gesamten Datenvolumen aus. Die Betreiber und auch Ericsson erwarten, dass dieser Anteil in den kommenden Jahren weiter stark anwachsen wird, da Bildübertragungen in vielen Bereichen zunehmen werden, zum Beispiel Unterhaltung, Produktion, Bildung, Videokonferenzen, Überwachung, Medizin, Virtual und Augmented Reality (virtuelle und erweiterte Realitätsdarstellungen).

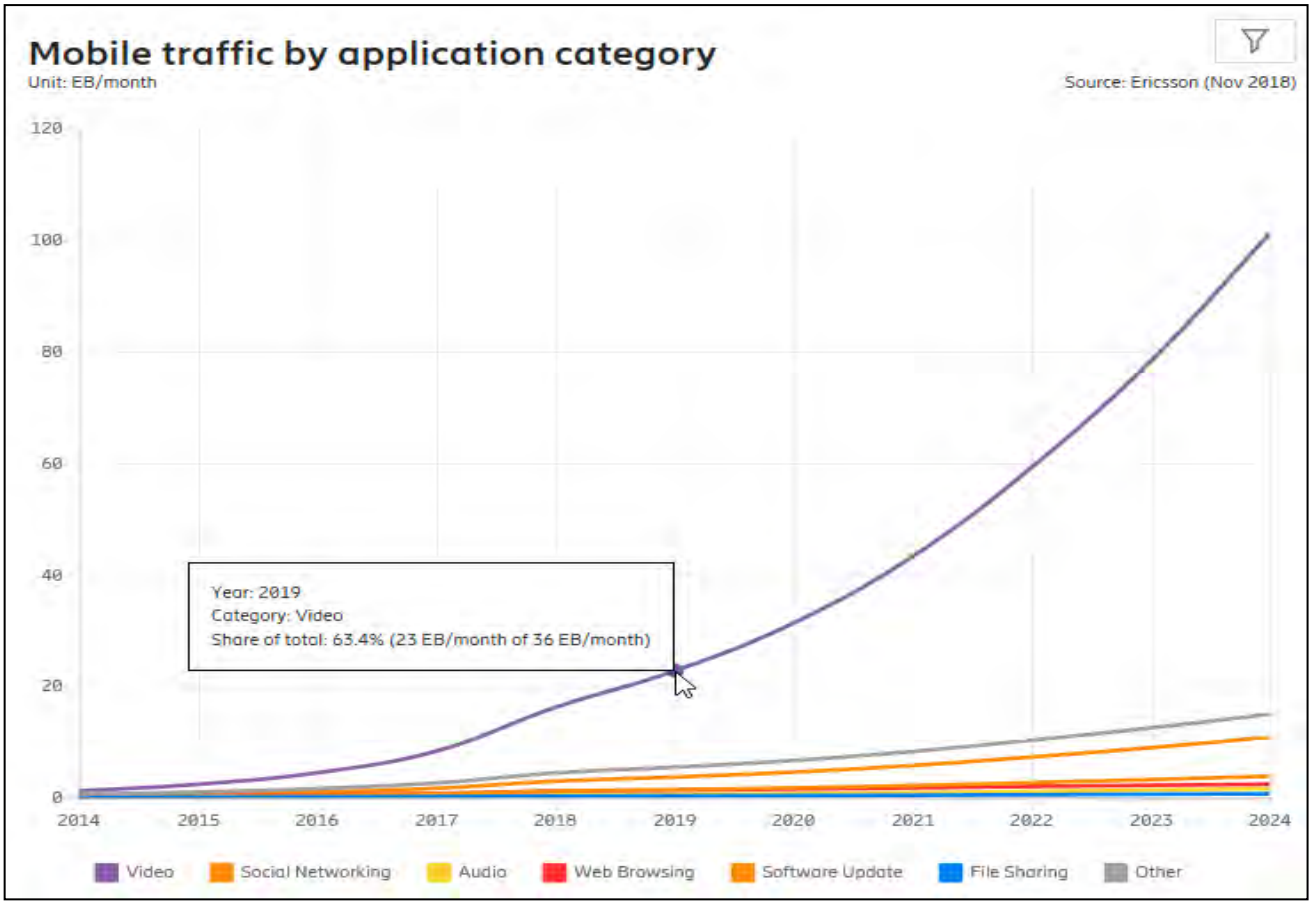

Abbildung 4: Erwartete Zunahme des Datenverkehrs nach Anwendungen

Die Betreiber gehen davon aus, dass etwas weniger als die Hälfte der Daten in der urbanen Zone übermittelt werden, knapp ein Drittel auf die suburbane Zone entfallen und rund ein Viertel der Daten in der ruralen Zone gesendet werden.

Tabelle 2 zeigt die Anteile der Sendeleistungen und Datenvolumen in der Schweiz nach den Generationen von Mobilfunktechnologien im Jahr 2018 auf.

Tabelle 2: Anteile Sendeleistungen (einschliesslich Sprachtelefonie) und Datenvolumen 2018

Technologie	Sendeleistung	Datenvolumen
2G	5 %	<1 %
3G	25 %	5 %
4G	70 %	95 %

4G hat in den letzten fünf Jahren in der Schweiz den weitaus grössten Teil des Datenvolumens übernommen und überträgt heute 95 Prozent aller Daten.

Das von 2G übertragene Datenvolumen lag im Jahr 2018 deutlich unter 1 Prozent des gesamten Datenvolumens. Das durch 3G übertragene Datenvolumen ist in den letzten sechs Jahren anteilmässig von 95 auf 5 Prozent zurückgegangen. Auch wenn 2G und 3G heute kaum noch ein relevantes Datenvolumen übertragen, so werden doch noch die Hälfte bis drei Viertel der Mobilfunkgespräche über diese beiden Technologien geführt, und es bestehen weiterhin viele Machine-to-Machine-Anwendungen (M2M) mit 2G- und 3G-Modems. Ein Grossteil der potenziellen Leistungsreserven bei einer Abschaltung von 2G wurde zudem bereits zum Ausbau von 4G genutzt. Alle Betreiber haben 2G bereits aus der Mehrheit

ihrer Frequenzbänder entfernt. 2G kann mit einer speziellen Softwarelösung erbracht werden, sodass die Leistungen bereits heute für den 4G- und 5G-Ausbau genutzt werden können. Einzelne Betreiber planen, 2G bereits 2020 abzuschalten, da diese Technologie immer mehr an Bedeutung verliert.

4.2 Netzstrukturen

4.2.1 Heutiges Netz

Mobilfunknetze sind zellulare Netze. Bei diesen wird der Versorgungsbereich des Funknetzes in eine Vielzahl von aneinander angrenzenden und überlappenden Funkzellen beschränkter Grösse eingeteilt, welche je durch eine Basisstation versorgt werden.

Ein Mobilfunknetz muss in der Lage sein, mobile Nutzer möglichst ohne Unterbrüche zu versorgen. Jede Antenne kann nur eine beschränkte Menge Daten gleichzeitig übermitteln. Die Gebiete, welche von einer Basisstation versorgt werden, sind unterschiedlich gross. Die Funkzellengrösse ist abhängig von der erwarteten Anzahl der Nutzer, vom erwarteten Datenvolumen und von der Topografie. So kann der Durchmesser einer Funkzelle im ländlichen Raum bis zu einigen Kilometern betragen und in der Stadt bei unter 100 Metern liegen. Die grösste Zahl von Sendeanlagen wird in Städten und dicht besiedelten Gemeinden errichtet, da die Mobilfunkdienste hier von vielen Menschen und Geräten auf engem Raum genutzt werden. Potenzial zur Erhöhung der mobilen Übertragungskapazitäten birgt die Organisation von Funkzellen in verschiedenen Ebenen (z. B. Makro-, Mikro- und Indoor-Zellen). Hybride Netzstrukturen, die sich aus verschiedenen Zellebenen zusammensetzen, sind heute national und international anerkannter Stand der Technik und werden auch durch die Schweizer Betreiber so realisiert.

Im schweizerischen Vollzug (NISV und Vollzugsempfehlungen des BAFU) gibt es eine Trennung zwischen Anlagen, welche bis maximal 6 Watt (W) ERP Sendeleistung emittieren, und solchen, die mit einer höheren Sendeleistung betrieben werden. Anlagen unter 6 W ERP sind gemäss NISV von vorsorglichen Emissionsbegrenzungen ausgenommen. Diese Kleinanlagen werden im Regelfall von den Kantonen und Gemeinden in einem vereinfachten Verfahren bewilligt, wozu eine Meldung an die Vollzugsbehörden ausreicht. In der Umgangssprache werden solche Anlagen als Mikrozellen bezeichnet. Hier ist zu beachten, dass dieser Begriff international anders verwendet wird. Im internationalen Umfeld werden mit Mikrozellen Sendeanlagen von bis zu einigen Hundert Watt ERP bezeichnet, die zur lokalen Erhöhung der Kapazität dienen. Die Bezeichnung von Sendeanlagen mit Präfixen wie Makro oder Mikro ist daher einzig im jeweiligen Regulationsrahmen sinnvoll und nicht allgemeingültig.

Die Qualität der Mobilfunkversorgung eines geografischen Gebietes wird durch die Abdeckung und die Kapazität und mit 5G insbesondere auch durch hohe Verfügbarkeit (Redundanz) und tiefe Latenzzeiten definiert. Damit erhöhen sich die Anforderungen an die Qualität der Mobilfunknetze immer weiter. Abdeckung bedeutet dabei, dass eine Mobilfunkverbindung grundsätzlich möglich ist. Die Kapazität gibt darüber hinaus Auskunft über die verfügbare Datenrate, d. h., welches Datenvolumen pro Sekunde übertragen werden kann. Mit Redundanz ist die Überlappung mehrerer Funkzellen gemeint, durch die im Störungsfall ein ununterbrochener Betrieb sichergestellt werden kann. Die Abdeckung ist unabhängig von der Anzahl gleichzeitiger Nutzer. Die Kapazitäten, die in einer Funkzelle grundsätzlich verfügbar sind, müssen sich hingegen alle gleichzeitig aktiven Nutzer teilen. Die Redundanz gewinnt eine immer grössere Bedeutung, da eine Notrufmöglichkeit in vielen Fällen nur über Mobilfunk möglich ist und Blaulichtorganisationen bereits heute Mobilfunkdienste nutzen und in Zukunft noch verstärkt einsetzen werden. Tiefe Latenzzeiten sind erforderlich, damit Mobilfunklösungen in kritischen Bereichen wie der industriellen Automation mit Echtzeitsteuerung möglich sind.

Makrozellen mit Antennen auf Gebäuden, Türmen oder Geländeerhebungen dienen der grundsätzlichen Versorgung eines Gebiets betreffend Abdeckung und Kapazitäten. Sie sind zudem wichtig für die Versorgung von Nutzerinnen und Nutzern, die sich schnell von Ort zu Ort bewegen. Mikrozellen werden vorwiegend dort eingesetzt, wo lokal ein grosses Datenaufkommen besteht. Dazu gehören stark frequentierte Plätze oder auch Räume innerhalb von grossen Gebäuden mit intensivem Publikumsverkehr, wie zum Beispiel Bahnhöfe, Einkaufszentren oder Stadien. Für die Bereitstellung entsprechender Kapazitäten innerhalb von Gebäuden kommen schliesslich Pico- und Femtozellen zum Einsatz. Mikrozellen können zudem das Mobilfunknetz an Orten ergänzen, wo lokal durch geografische Gegebenheiten kein Empfang von der Makrozelle möglich ist.

Tabelle 3: Zellentypen

Zellentyp	Typischer Versorgungsradius	Art der Versorgung
Makrozelle	bis 5 km (typisch 1 bis 2 km)	Grossflächig, ausserhalb und innerhalb von Gebäuden sowie mobile Nutzung (Zug, Auto, Bus etc.) (In den Städten sind Distanzen von 300 bis 500 m zwischen den Makrozellenanlagen schon heute typisch.)
Mikrozelle*	50 bis 200 m (typisch 100 m)	In Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen, ausserhalb und innerhalb von Gebäuden
Picozelle*, Femtozelle*	kleiner als 100 m (typisch weniger als 50 m)	Meistens innerhalb von Gebäuden, oft mit wenigen Teilnehmenden
* Diese Typen werden in diesem Bericht zusammengefasst als Kleinzellen bezeichnet.		

4.2.2 Planungskompetenzen beim Mobilfunk

Die Regelung des Fernmeldewesens ist gemäss Artikel 92 der Bundesverfassung Sache des Bundes. Der Bund selbst betreibt keine öffentlichen Fernmeldenetze mehr. Die Versorgung mit Mobilfunkdiensten erfolgt durch vom Bund konzessionierte Private. Wettbewerb und Marktorientierung führen dazu, dass in der Schweiz Fernmeldedienste in hoher Qualität angeboten und die sich verändernden Kundenbedürfnisse bestmöglich befriedigt werden. Um ein landesweites Mobilfunknetz zu betreiben, wird eine Mobilfunkkonzession der ComCom benötigt. In den Konzessionen legt die ComCom minimale Auflagen hinsichtlich der zu erreichenden Versorgung fest, um sicherzustellen, dass die Frequenzen auch genutzt werden. Die Anfang 2019 vergebenen Konzessionen verpflichten die Betreiber, bis 2024 die Hälfte der Schweizer Bevölkerung mit den neuen Frequenzen zu versorgen. Die Konzessionen machen keine Vorgaben betreffend den konkreten Aufbau und die hierfür einzusetzende technische Infrastruktur der Mobilfunknetze (technologieneutrale Konzessionen). Die Mobilfunkkonzessionäre sind im dargelegten Rahmen frei, festzulegen, wo und mit welchen Frequenzen und Technologien und mit welcher Qualität (Abdeckung, Kapazität, Geschwindigkeit, Latenz, Verfügbarkeit etc.) und Art der Versorgung (mobil, draussen, in Gebäuden etc.) sie ein bestimmtes Gebiet versorgen wollen. Unter den Mobilfunkbetreibern herrscht damit ein Wettbewerb beim Bau der Infrastruktur und auch bei Diensten und Preisen. Dieser Wettbewerb führt aber letztlich auch dazu, dass im Endausbau drei sich nahezu vollständig überdeckende Mobilfunknetze entstehen.

Die Kompetenz zur Festlegung der Versorgungsqualität und zur Art der Versorgung liegt gemäss dem FMG und mangels Vorgabe in den geltenden Mobilfunkkonzessionen ausschliesslich bei den Anbietern selbst. Da Mobilfunkdienste basierend auf einem Infrastrukturwettbewerb zwischen privaten Fernmeldedienstanbietern erbracht werden, obliegen diesen konsequenterweise auch Planung, Bau und Betrieb ihrer Mobilfunkinfrastruktur. Kantonen und Gemeinden steht es nicht zu, mit hoheitlichen Mitteln Einfluss auf die Qualität der Mobilfunknetze oder die Art der Versorgung zu nehmen. Sie können jedoch im Rahmen ihrer bau- und raumplanungsrechtlichen Kompetenzen eine Standortplanung vorsehen. Solche raumplanungsrechtlichen Massnahmen haben Auswirkungen auf einzelne Standorte und damit indirekt auch auf die Versorgungsqualität. Der Betrieb eines funktechnisch suboptimal gelegenen Standorts kann dazu führen, dass die Betreiber zusätzliche Standorte erstellen, um ihr Versorgungsziel zu realisieren.

Grundsätzlich ist also nicht ausgeschlossen, dass ein Kanton oder eine Gemeinde gewisse räumliche Vorgaben zur Entwicklung des Mobilfunknetzes macht. Dabei sind die bundesrechtlichen Vorgaben zu beachten, und das im Fernmeldegesetz verankerte Interesse an einer qualitativ guten, preiswerten und innovativen Mobilfunkversorgung ist zu berücksichtigen. Eine Priorisierung der Festnetz-Infrastruktur oder einer flächigen WLAN-Versorgung gegenüber den mobilen Fernmeldenetzen und eine Trennung von Innen- und Aussenversorgung sind gesetzlich nicht vorgesehen. Kommunale

Vorschriften dürfen nicht die in der Fernmeldegesetzgebung des Bundes konkretisierten öffentlichen Interessen verletzen, d. h., sie müssen den Interessen an einer qualitativ guten Mobilfunkversorgung und an einem funktionierenden Wettbewerb zwischen den Mobilfunkanbietern Rechnung tragen.

Massgebend für die Mobilfunkanbieter bei der Konzeption und Planung sind die von der ITU definierten Anforderungen an moderne mobile Kommunikationsdienste (IMT-2020, vgl. *Kap. 3.2.1*). An diesen Spezifikationen orientieren sich Netzbetreiber und Hersteller von Endgeräten gleichermassen. Da 5G gegenwärtig die einzige Technologie ist, die diese Anforderungen erfüllt, wird mit deren Einführung in der Schweiz auch die internationale Konkurrenzfähigkeit sichergestellt.

4.2.3 Netzstrukturen im Hinblick auf die Einführung von 5G

Das FMG fordert von den Mobilfunkanbietern preiswerte Dienstleistungen für Privatkunden und Wirtschaft. Damit kommt einem effizienten Bau und Betrieb der Mobilfunknetze ein hoher Stellenwert zu. International haben sich «hybride Netzstrukturen» bei Planung, Bau und Betrieb von Mobilfunknetzen durchgesetzt: Rückgrat der Versorgung bilden sogenannte Makrozellen mit hoher Sendeleistung, welche die flächendeckende Mobilfunkversorgung sicherstellen (mobil, drinnen und draussen). An Orten mit erhöhter Mobilfunknutzung (z. B. Stadion, Einkaufszentrum etc.) oder speziellen Anforderungen (Geschäftsgebäude, Spital etc.) wird das Netz durch zusätzliche Anlagen mit geringer Leistung (Mikrozellen) oder durch gebäudeinterne Lösungen ergänzt. Dieser Quasistandard hat sich weltweit bewährt und ist ebenfalls beim Ausbau von 5G vorgesehen.

Zurzeit wird in einem ersten Schritt mit 5G vorwiegend das Frequenzband um 3,5 GHz genutzt.[30] Die Frequenzen über 24 GHz (Millimeterwellen) werden in der Schweiz erst zu einem späteren Zeitpunkt für 5G eingesetzt werden können (vgl. *Kap. 3.2.3*). Ihre Nutzung ist auf räumlich begrenzte Orte mit sehr grossem Bedarf an Übertragungskapazität und entsprechender Ultrabreitband-Versorgung (sog. Hotspots) beschränkt.

Auch bisherige Frequenzbänder werden mittelfristig für 5G genutzt werden. Ein Mobilfunkbetreiber nutzt die bisherigen Frequenzbänder und bestehende 4G-Antennenstandorte, um 5G rasch einem grossen Teil der Bevölkerung zugänglich zu machen. Es existieren Antennen, die sowohl 4G- als auch 5G-Signale aussenden können. Die so implementierte 5G-Technologie bietet eine etwas grössere Leistungsfähigkeit als 4G, kann aber das volle Potenzial noch nicht ausschöpfen.

4.2.4 Netzstruktur mit Kleinzellen

Es ist davon auszugehen, dass mit dem Einsatz von höheren Frequenzen die Verwendung von Kleinzellen tendenziell zunehmen wird. Kleinzellen haben im Vergleich zu den Makrozellen eine kleinere Bauform, aber auch eine geringere Daten- und Sendeleistung. Aus diesem Grund wird auch mit 5G die Leistungsfähigkeit einer Kleinzelle insbesondere bei grösseren Distanzen in Bezug auf maximale Datenraten, Verfügbarkeit oder Anzahl gleichzeitiger Nutzer nie an jene einer Makrozelle herankommen. Dennoch ist es notwendig, Kleinzellen auch bei 5G als tragenden Teil von Mobilfunknetzen, insbesondere in Städten, einzusetzen. Das heisst, dass die Mobilfunknetze weiterhin eine heterogene Netzwerkstruktur aufweisen werden: Makrozellen zur breitflächigen Versorgung, Kleinzellen an Orten mit hohem Kapazitätsbedarf.

4.2.5 Besonderheiten im urbanen Raum

Der Hauptanteil des mobilen Datenverkehrs in der Schweiz wird in Städten generiert. Das nahe Nebeneinander von Gebieten mit hohem Datenverkehr, vielen sicherheitsrelevanten Diensten, vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten (in Gebäuden bis zum Untergeschoss, auf stark frequentierten Plätzen etc.) sowie die hohe Dichte an OMEN in Wohn- und Erholungsräumen ist eine besondere Herausforderung für die funktechnische Versorgung des städtischen Raums. Im urbanen Raum bestehen deshalb besonders hohe Ansprüche an eine moderne Mobilfunkversorgung, welche die Bedürfnisse einer mobilen Gesellschaft abdecken müssen. Die Verdichtung des Mobilfunknetzes ist heute und in Zukunft unabdingbar.

Stark frequentierte Orte wie beispielsweise Stadtzentren, publikumsintensive Freizeiteinrichtungen, Einkaufszentren, Bildungsstätten, Büro- und Verwaltungsgebäude oder Industriebetriebe mit erhöhtem Eigenbedarf an Kommunikation sind besonders prädestinierte Einsatzgebiete für Kleinzellen.

Ein Vergleich des Ausbaus der Netze mit zusätzlichen Makrozellen gegenüber dem Ausbau mit Kleinzellen unter Berücksichtigung der Planungs-, Bau- und Betriebskosten ist schwierig. In der Phase der Standortakquisition können Städte als Eigentümerinnen von eigenen Gebäuden, Strassenbeleuchtungen etc. Hand bieten, was den Aufwand reduzieren könnte.

4.2.6 Besonderheiten entlang von Eisenbahnachsen

Aufgrund der allgemein wachsenden Nachfrage nach drahtloser Konnektivität und der rechtlichen Rahmenbedingungen in der Schweiz sehen sich die SBB als zusätzlicher Mobilfunkbetreiber (Mobilfunk ausschliesslich für Bahnkommunikation) mit ähnlichen Herausforderungen konfrontiert wie die drei kommerziellen Mobilfunkbetreiber. Mit der digitalisierten Bahnproduktion steigen die Anforderungen an die Mobilfunkversorgung signifikant, weshalb die SBB planen, zwischen 2022 und 2032 eine leistungsfähige, zuverlässige und hochverfügbare Mobilfunk-Konnektivität für den Bahnbetrieb aufzubauen.

Das zukünftige Bahnmobilkommunikationssystem (Future Railway Mobile Communication System FRMCS) soll auf denselben technischen Spezifikationen basieren, welche bei den übrigen Betreibern zum Einsatz kommen (z. B. 4G oder 5G). Um die europäische Interoperabilität gewährleisten zu können, wird während einer Übergangsphase ein Parallelbetrieb von FRMCS und dem heutigen GSM-R notwendig sein.

Bei der Kommunikation vom und zum Zug unterscheidet man grundsätzlich zwischen den folgenden Kommunikationsarten mit dem entsprechenden prognostizierten Bedarf:

Tabelle 4: Zukünftiger Bedarf bei der Bahnkommunikation

Kommunikationsart	Versorgungszweck	Zukünftiger Bedarf
Critical Communication	Für den Bahnbetrieb kritische Funktionen (z. B. Zugsteuerung)	<10 MBit/s
Performance Communication	Optimierung des Bahnbetriebs (z. B. Überwachungsvideos, Kundeninformation)	<50 MBit/s
Business Communication	Versorgung der Fahrgäste (z. B. Telefonie, Internet im Zug)	≤1 GBit/s

Die kommerziellen Mobilfunkbetreiber verfügen an einem Antennenstandort in der Regel über drei Antennenausrichtungen und versorgen die Fläche wabenförmig (3-mal 120°). Folglich werden die Bahntrassen von einer Vielzahl verschiedener Antennenstandorte abgedeckt. Diese Anlagen müssen neben der lokalen Versorgung auch die hohen Anforderungen schnell fahrender Kunden erfüllen können. Um die zukünftigen Anforderungen an die Kommunikation vom und zum Zug zu erfüllen, ist eine linienoptimierte Versorgung des technischen Bahnkorridors anzustreben. Die Standorte befinden sich in diesem Fall typischerweise direkt neben dem Bahngleis, versorgen den Bahnkorridor mit zwei Antennenausrichtungen (2-mal 180°) und dienen vorwiegend der Kommunikation vom und zum Zug.

Bei der Mobilfunkversorgung entlang des technischen Bahnkorridors entstehen nur kurzzeitige Leistungsspitzen der elektrischen Feldstärken, bezogen auf die entsprechenden Aufenthaltsorte des fahrenden Zuges. Die Belastung durch die Bahnkommunikation fällt mit Ausnahme von Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) an stark frequentierten

Strecken nur kurzzeitig an. Die durchschnittliche Belastung der OMEN liegt heute deutlich unter dem geltenden Anlagegrenzwert.

Im Zentrum der Überlegung zur optimalen Versorgung steht weniger die Fragestellung, ob die Abdeckung für die Bahnkommunikation oder für die Fahrgastversorgung erfolgt, sondern vielmehr, ob sie nur auf die Bahnlinie (in der Regel zwei Antennenausrichtungen) oder auch auf die umliegenden Gebiete (in der Regel drei Antennenausrichtungen) erfolgen soll.

Es ist davon auszugehen, dass wie bei den kommerziellen Mobilfunkanbietern auch bei den SBB und weiteren Schweizer Eisenbahnen[31] zukünftig höhere Frequenzen zum Einsatz kommen. Um die Versorgungsqualität in diesen Frequenzbereichen zu erhalten, werden bei gleichbleibender Netzstruktur höhere Sendeleistungen benötigt oder mit den geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen eine Verdichtung der Antennenstandorte. Abhängig vom gewählten Modell für die zukünftige Mobilfunknetzstruktur der SBB ist für deren Netzausbau zur Sicherstellung der Critical Communication mit bis zu 3000 neuen Antennenstandorten (auf rund 5000 Streckenkilometern) zu rechnen. Heute betreiben die SBB rund 1200 Mobilfunkstandorte.

Die Anzahl der benötigten Antennenstandorte wird vor allem durch folgende Faktoren beeinflusst:

- regulatorische Rahmenbedingungen der NISV (gesetzliche Grenzwerte);
- zugeteilte Frequenzspektrum-Anteile für die Versorgung im technischen Bahnkorridor (Zuordnung auf europäischer Ebene);
- technische Möglichkeiten für die Kommunikation in den Zügen (z. B. Antennentechnologien oder «gelaserte» Fenster, welche Mobilfunksignale besser durchdringen als herkömmlich beschichtete Fenster).

Neben dem wirtschaftlichen Aspekt sprechen im Zusammenhang mit den hohen Zugsgeschwindigkeiten auch technische Aspekte gegen zu kurze Abstände der Antennenstandorte. Wäre eine kurzzeitige Überschreitung des vorsorglichen Anlagegrenzwerts (z. B. in maximal 5 % der Zeit) bis zu einem bestimmten Mass zugelassen, so würde sich die Anzahl der benötigten Antennenstandorte für die Versorgung im technischen Bahnkorridor verringern, was entsprechende Kosteneinsparungen zur Folge hätte. Aufgrund diverser offener Fragen im Zusammenhang mit den genannten Faktoren können zum heutigen Zeitpunkt noch keine monetären Angaben zum Sparpotenzial gemacht werden. Im Hinblick auf den anstehenden Bau der künftigen Mobilfunkversorgung für den Bahnbetrieb führen die SBB gemeinsam mit weiteren Netzbetreibern verschiedene Tests durch, um die Versorgung in den Zügen unter Verwendung unterschiedlicher Anteile des Frequenzspektrums und verschiedener Technologien zu untersuchen. Erste Erkenntnisse werden demnächst erwartet.

4.3 Ausschöpfung der Grenzwerte

4.3.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage zu diesem Kapitel basiert auf einer im Dezember 2018 durchgeführten Erhebung über die Betriebsinformationen der drei Mobilfunkbetreiber in der Schweiz.

Die Auslastungsziffern wurden von den drei Betreibern geliefert und vom Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) anonymisiert und mittels Stichproben kontrolliert. Die Daten geben darüber Auskunft, wie stark die Mobilfunkanlagen den Anlagegrenzwert ausschöpfen. Daraus ergibt sich eine Abschätzung, in welchem Mass die bestehenden Mobilfunkanlagen in Bezug auf die neue Technologie 5G noch freies Ausbaupotenzial haben.

Gemäss Definition der NISV besteht jede Mobilfunkanlage aus einem oder mehreren Antennenmasten. In der Schweiz gibt es 12 274 Mobilfunkanlagen, die aus etwa 18 000 Antennenmasten bestehen (Stand Dezember 2018). In dieser Erhebung wurden die ca. 1200 Mobilfunkanlagen der SBB nicht berücksichtigt, die Polycom-Anlagen ebenfalls nicht. Bei den Anlagen mit einer Sendeleistung unter 6 W ERP wurden die nicht fix installierten Kleinzellen (z. B. Femtozellen in Privathaushalten) ebenfalls nicht in die Zählung einbezogen.

Tabelle 5: Anzahl Anlagen nach Sendeleistung

Anlage	Anzahl	Anteil
>6 W ERP	8542	70 %
<6 W ERP	3732	30 %
Total	**12 274**	**100 %**

Für die Auswertung des Ausschöpfungsgrads sind die Anlagen von weniger als 6 W ERP nicht von Interesse, weil für diese kein vorsorglicher Anlagegrenzwert gilt und in der Regel ein vereinfachtes Bewilligungsverfahren zur Anwendung kommt (vgl. *Kap. 4.2.1*). Damit verbleibt ein Total von 8542 Anlagen mit einer Sendeleistung von mehr als 6 W ERP, welche im Folgenden untersucht und beschrieben werden.

Die Mobilfunkanlagen werden in die drei Gruppen rural, suburban und urban eingeteilt. Bei der Einteilung wird der Dichte der Endgeräte sowie der Dichte der OMEN Rechnung getragen. Als Zahlengrundlage dienen drei Datensätze der aktuellen Geodaten der Bundesstatistik.[32] Aus diesen drei Dateien wird jeweils die Dichtezahl pro Hektare verwendet und das jeweilige Maximum als «User-Dichte pro Hektare» eingesetzt. Dies ergibt folgende Zoneneinteilung:

- Urban: >200 User/ha
- Suburban: 50–200 User/ha
- Rural: <50 User/ha

Von den 8542 Anlagen stehen 2060 in urbanem Gebiet, 2733 in suburbaner Umgebung und 3748 in der ruralen Zone.

Zur Verifizierung der Statistik hat das BAKOM die Angaben von 1 Prozent der Anlagen (85 Anlagen) überprüft. Innerhalb jedes Kantons wurden zufällig drei Anlagen ausgewählt, wobei jeweils eine aus den Zonen urban, suburban und rural sowie jeweils eine von den drei Betreibern. Zusätzlich wurde in sieben Kantonen jeweils eine weitere Anlage ausgewählt, wiederum verteilt auf die Zonen und Betreiber.

Tabelle 6: Kontrollierte Anlagen nach Zonen und Betreibern

	Kontrollierte Anlagen aus den Zonen			
Betreiber	**Urban**	**Suburban**	**Rural**	**Total**
Salt	10	9	9	**28**
Sunrise	9	10	9	**28**
Swisscom	9	10	10	**29**
Total	**28**	**29**	**28**	**85**

Bei der Überprüfung wurden die Angaben der prozentualen Ausschöpfung des AGW sowie der prozentualen Leistungsausschöpfung mit den Angaben in der NIS-Datenbank (NIS-DB) des BAKOM verglichen.

Tabelle 7: Ergebnis der Stichproben

Stichproben	%	Bemerkung
72	82 %	Angaben der Statistik identisch zur NIS-DB (Abweichung <1 %; Rundungsfehler)
11	13 %	Standortdatenblatt-Version in der NIS-DB musste aktualisiert werden
5	6 %	Temporär ein Service nicht in Betrieb. Die Anlage bleibt jedoch in der Ausschöpfungskategorie. Eine Nachkontrolle ergibt korrekte Angaben.
0	0 %	Überschreitung der bewilligten Sendeleistung
0	0 %	Überschreitung des Anlagegrenzwerts
88	**100 %**	**Total**

Die Auswertung der Stichproben bestätigt, dass die Daten, welche von den Betreibern im Dezember 2018 geliefert wurden, korrekt sind. Darauf basierend konnte die Statistik zuverlässig erstellt werden.

4.3.2 Ausschöpfung des Anlagegrenzwertes gemäss Bewilligung

Aus den Bewilligungsdaten jeder Anlage wurde derjenige OMEN herausgesucht, für welchen im Standortdatenblatt die grösste Feldstärke berechnet wurde (in % des AGW). Dieses Vorgehen stellt eine Worst-Case-Betrachtung in Bezug auf eine Senderichtung dar, während offengelassen wird, ob in anderen Senderichtungen noch Potenzial für mehr Sendeleistung bestehen würde. In *Abbildung 5* ist ersichtlich, dass im urbanen und suburbanen Gebiet die meisten Mobilfunkanlagen den AGW gemäss Berechnung im Standortdatenblatt weitgehend ausschöpfen.

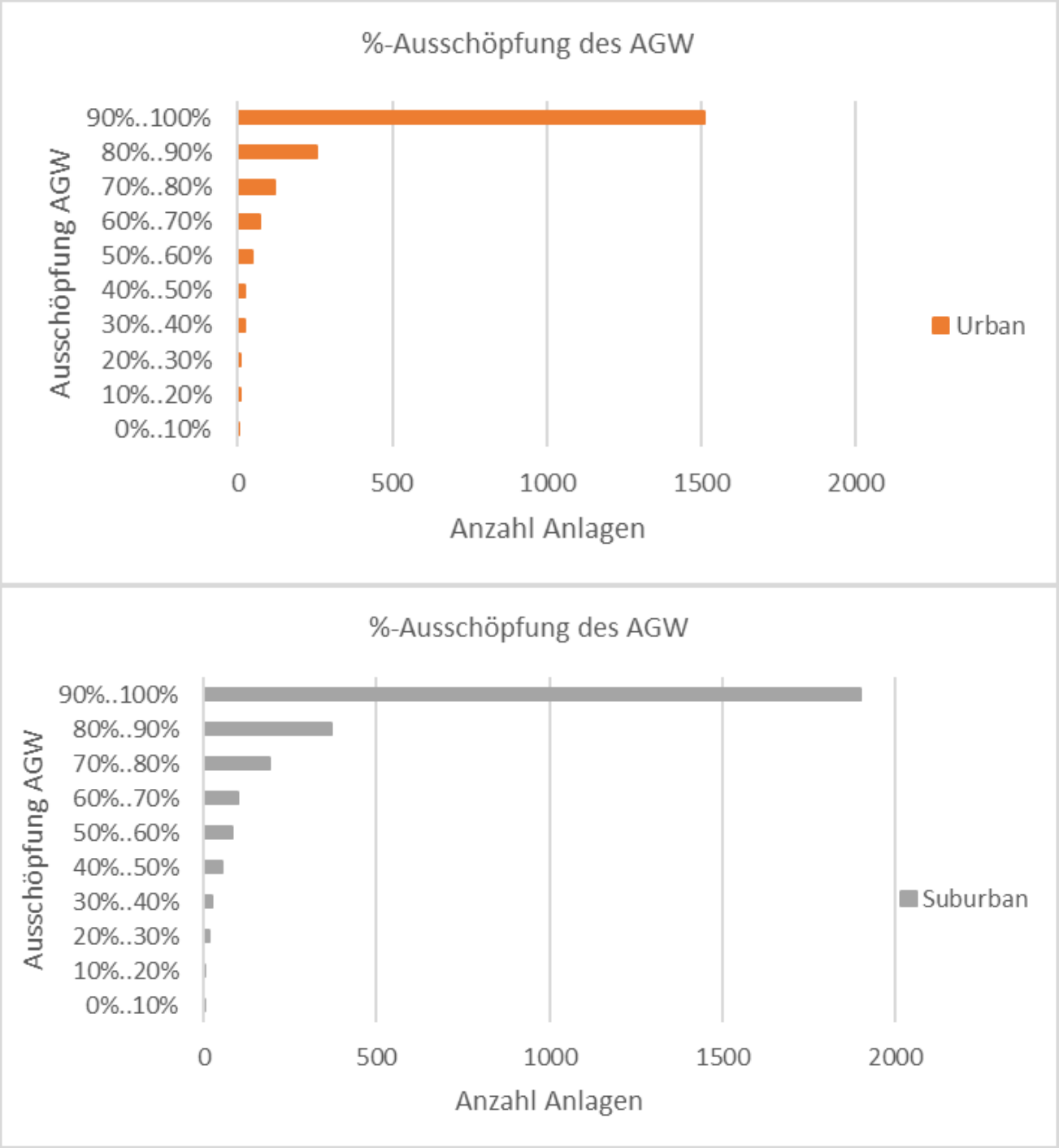

Abbildung 5: Ausschöpfung des AGW (urban, suburban)

Auch in den ruralen Gebieten schöpfen viele der Mobilfunkanlagen den AGW fast aus. In *Abbildung 6* fällt auf, dass es hier doch einige Anlagen mit einem Beurteilungswert gibt, der deutlich unter dem AGW liegt.

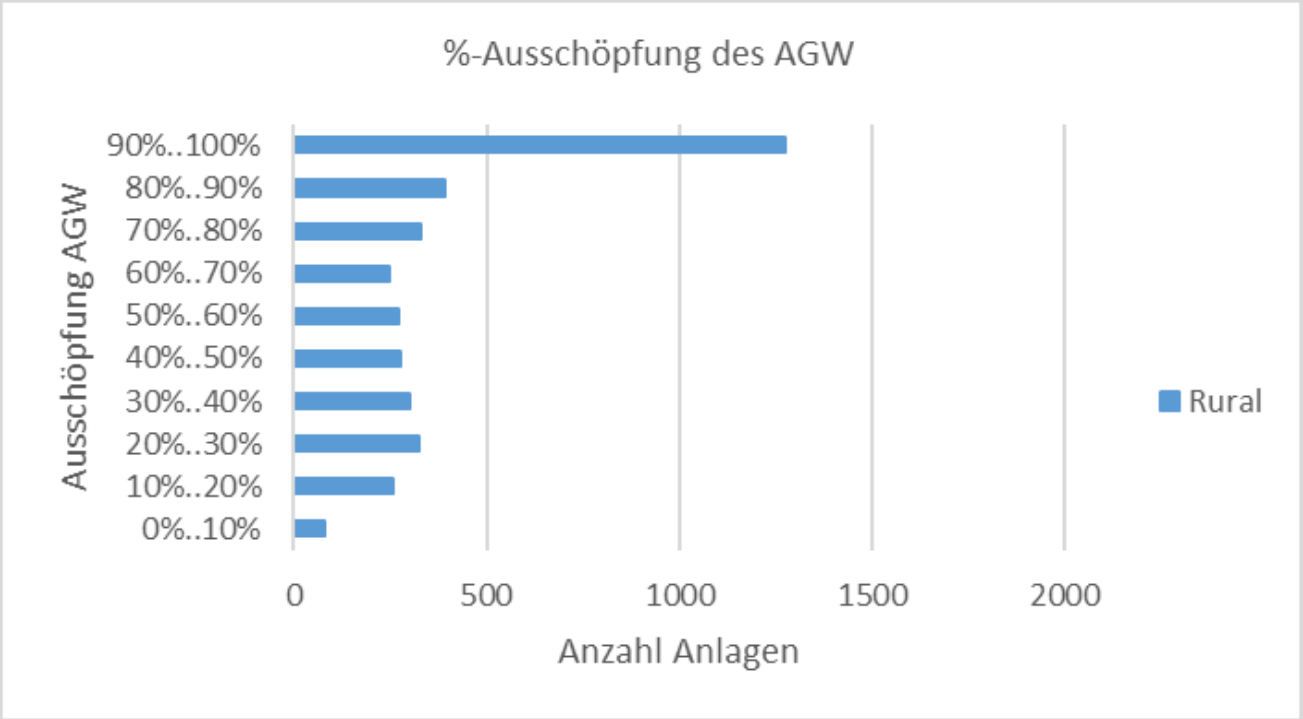

Abbildung 6: Ausschöpfung des AGW (rural)

4.3.3 Ausschöpfung der bewilligten Sendeleistung

Neben der Ausschöpfung des AGW gemäss Berechnung im Standortdatenblatt ist auch von Interesse, in welchem Mass die Mobilfunkanlagen die bewilligten Sendeleistungen auch tatsächlich ausnutzen. Dazu wird die derzeitig eingestellte Sendeleistung (d. h. die momentan eingestellte Leistung, mit der die Anlage senden würde, falls sie voll ausgelastet wäre) mit der bewilligten Sendeleistung gemäss Standortdatenblatt verglichen. Pro Standort wird nur der Sektor mit der höchsten Auslastung herangezogen. Dieser muss nicht unbedingt in Richtung des gemäss Berechnung höchstbelasteten OMEN liegen. Diese Auswertung gibt Aufschluss darüber, wie stark das Mobilfunknetz tatsächlich ausgelastet ist und ob die Mobilfunkanlagen noch «stille Reserven» haben. *Abbildung 7* zeigt, dass die meisten Mobilfunkstationen in den urbanen und suburbanen Gebieten die bewilligte Sendeleistung ausschöpfen. Im ruralen Gebiet nutzen hingegen einige Anlagen die bewilligte Sendeleistung nicht vollständig aus:

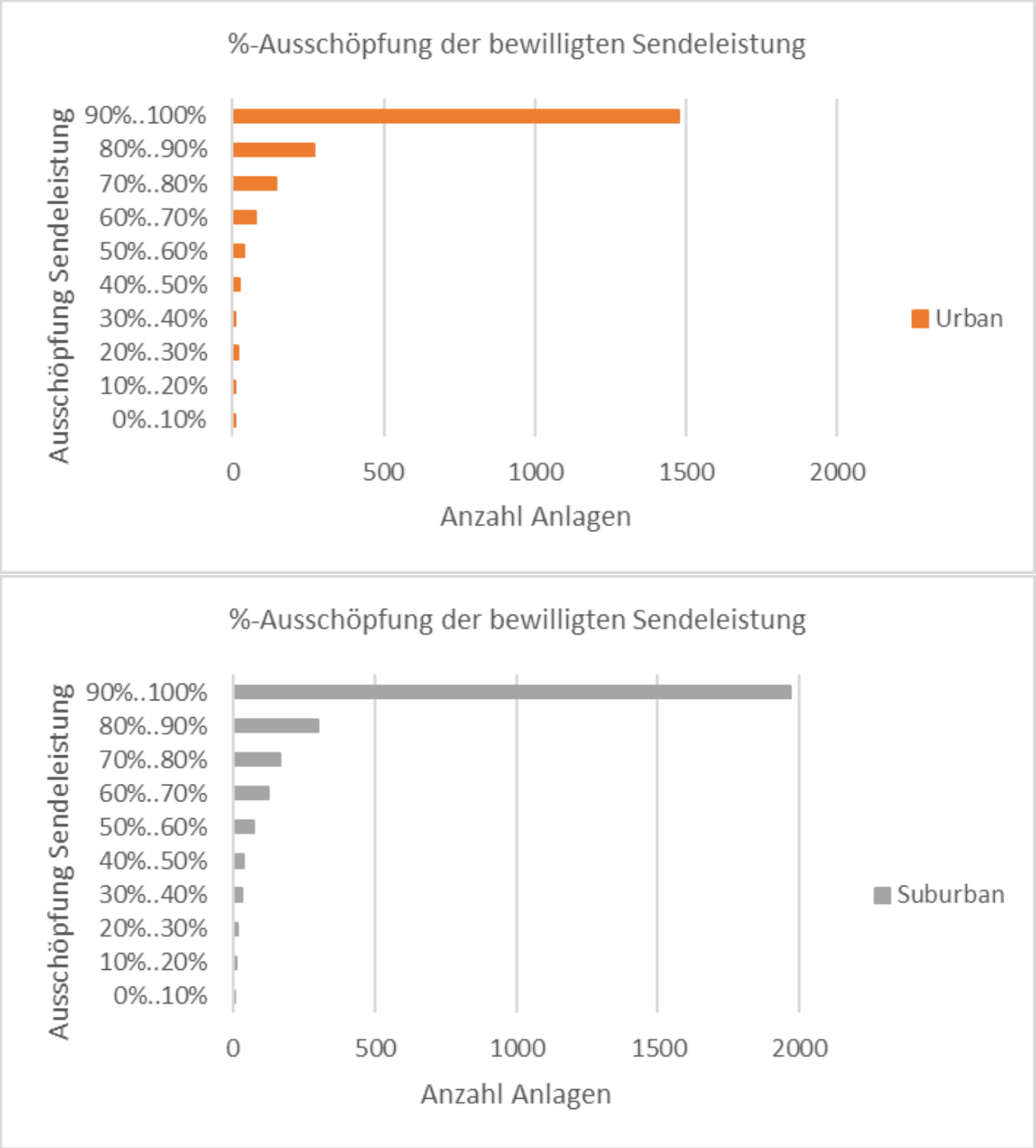

Abbildung 7: Ausschöpfung der bewilligten Sendeleistung (urban, suburban)

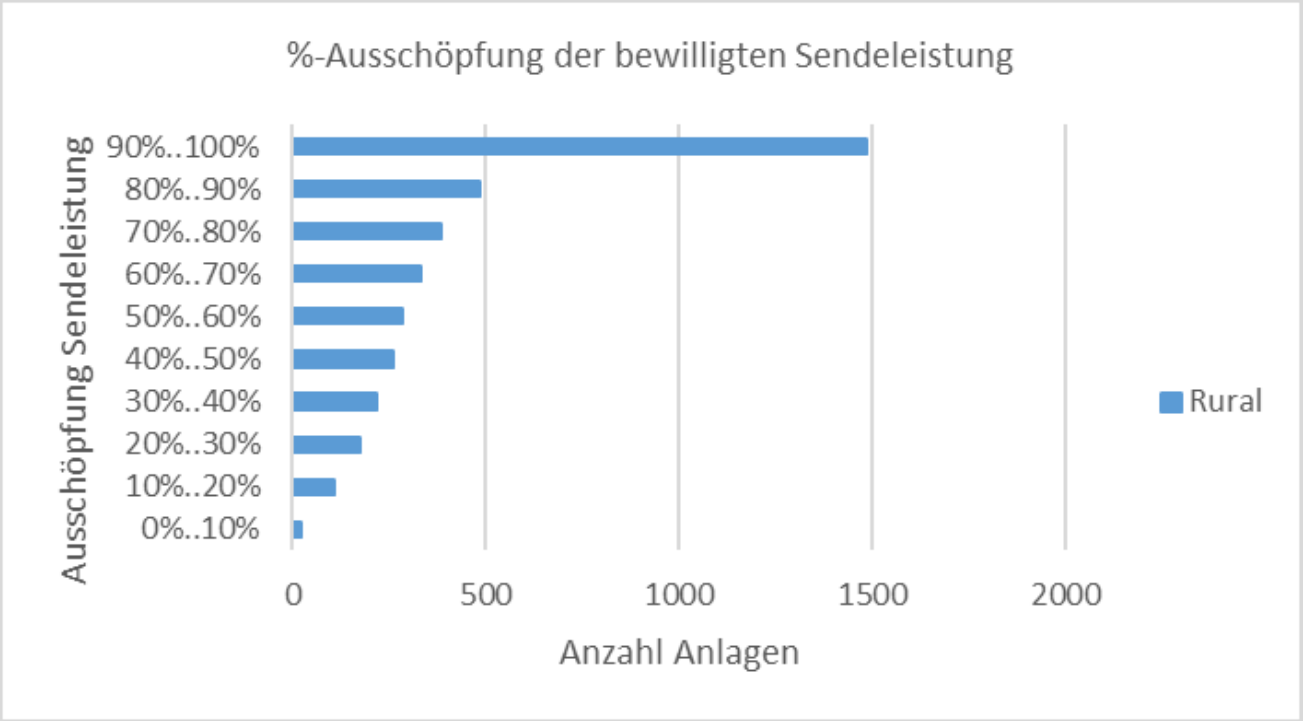

Abbildung 8: Ausschöpfung der bewilligten Sendeleistung (rural)

4.3.4 Ausbaureserve

Mit der Untersuchung der Ausbaureserve soll aufgezeigt werden, ob die Basisstationen funktionell weiter ausgebaut werden können, das heisst, in welchem Mass es möglich ist, die 5G-Technologie zusätzlich auf den bestehenden Standorten aufzuschalten. Der Untersuchung wird das Szenario zugrunde gelegt, wonach 5G auf den bestehenden Standorten (ohne zusätzliche Antennen), ergänzend zu den bisherigen Technologien (ohne Abschaltung vorhandener Dienste an einem Standort) und in voller Leistungsfähigkeit implementiert wird.

Als Mass für den möglichen Ausbau wird die Sendeleistung genommen, welche an einem Standort zusätzlich zu den bereits bestehenden Diensten aufgeschaltet werden könnte, bis der AGW ausgeschöpft ist. Ausgewählt wird derjenige Sektor, in welchem die grösste Leistungsausschöpfung vorhanden ist. Es wurden einerseits der Ausschöpfungsgrad des AGW durch die bewilligte Feldstärke und andererseits die Ausschöpfung der bewilligten Sendeleistung im gegenwärtigen Betrieb ausgewertet und miteinander kombiniert.

Um ein flächendeckendes 5G-Mobilfunknetz mit den bestehenden Mobilfunkanlagen erstellen zu können, müssen die Zellradien der einzelnen Mobilfunkzellen unverändert bleiben. Gemäss der Erläuterung in *Kapitel 4.3.6.1* müsste dazu die Sendeleistung einer Mobilfunkanlage um den Faktor 12,4 gesteigert werden können. Das heisst, dass eine bestehende Mobilfunkanlage die maximal mögliche Sendeleistung bloss zu 8 Prozent ausschöpfen darf, damit auf ihr ein qualitativ zufriedenstellender Ausbau auf 5G im Frequenzband 3,5 GHz erfolgen kann. In *Tabelle 9* wird dieser Wert auf 10 Prozent aufgerundet.

Anlagen, welche die maximal mögliche Sendeleistung zu mehr als 10 Prozent bzw. zu weniger als 80 Prozent ausnutzen, können nur noch mit weiteren Frequenzbändern mit der 4G-Technologie ausgebaut werden. Die Ausnutzungsgrenze von 80 Prozent wurde für die Modellrechnungen festgelegt, welche in *Tabelle 9* dargestellt sind. Es wird damit angenommen, dass eine Anlage ab diesem Wert nicht mehr ausgebaut werden kann. Die Betreiber selbst gehen davon aus, dass eine Anlage mit einer Auslastung der maximalen Sendeleistung zwischen 10 und 50 Prozent gut ausbaubar, zwischen 50 und 70 Prozent bedingt ausbaubar und bereits ab 70 Prozent nicht mehr ausbaubar ist.

Die Berechnung der Ausbaubarkeit erfolgte in zwei Schritten:

- Erstens wurde der OMEN mit dem höchsten Ausschöpfungsgrad des AGW durch die bewilligte Feldstärke herangezogen. Wird der auf die Feldstärke bezogene Ausschöpfungsgrad quadriert, erhält man den Ausschöpfungsgrad bezogen auf die maximal mögliche Sendeleistung, mit welcher der AGW noch eingehalten ist (vgl. *Tabelle 8*).
- Da die Betreiber frei sind, weniger als die maximale bewilligte Sendeleistung zu nutzen, muss in einem zweiten Schritt die Ausschöpfung der bewilligten Sendeleistung betrachtet werden.

Ob eine Anlage im Mobilfunknetz (Stand Dezember 2018) ausgebaut werden kann, ergibt sich durch die Kombination der beiden Ausschöpfungen der maximal möglichen Sendeleistung bis zum AGW (Bewilligung) und der Ausschöpfung der bewilligten Sendeleistung (vgl. *Tabelle 9*). Die Ausschöpfung des AGW am höchstbelasteten OMEN und die höchste Ausschöpfung der bewilligten Sendeleistung muss nicht unbedingt im selben Sektor liegen.

Tabelle 8: Ausschöpfung der maximal möglichen Sendeleistung

Ausnutzung der bewilligten Feldstärke bis AGW	Ausschöpfung der bewilligten Sendeleistung bis AGW	Urban	Suburban	Rural	Schweiz
90–100 %	80–100 %	1510 (73 %)	1900 (70 %)	1273 (34 %)	4683
30–90 %	10–80 %	535 (26 %)	810 (30 %)	1813 (48 %)	3158
0–30 %	0–10 %	15 (1 %)	23 (1 %)	662 (18 %)	700
	Total	**2060 (100 %)**	**2733 (100 %)**	**3748 (100 %)**	**8541**

Tabelle 9: Ausbaubarkeit der Mobilfunkanlagen

Ausbaubarkeit	Ausschöpfung des AGW und der maximalen Sendeleistung	Urban	Suburban	Rural	Schweiz
Nicht ausbaubar	80–100 %	1190 (58 %)	1496 (55 %)	706 (19 %)	3392
4G ausbaubar	10–80 %	834 (40 %)	1179 (43 %)	2046 (55 %)	4059
Auf 5G ausbaubar	0–10 %	36 (2 %)	58 (2 %)	996 (26 %)	1090
	Total	**2060 (100 %)**	**2733 (100 %)**	**3748 (100 %)**	**8541**

Daraus ergibt sich die folgende grafische Darstellung:

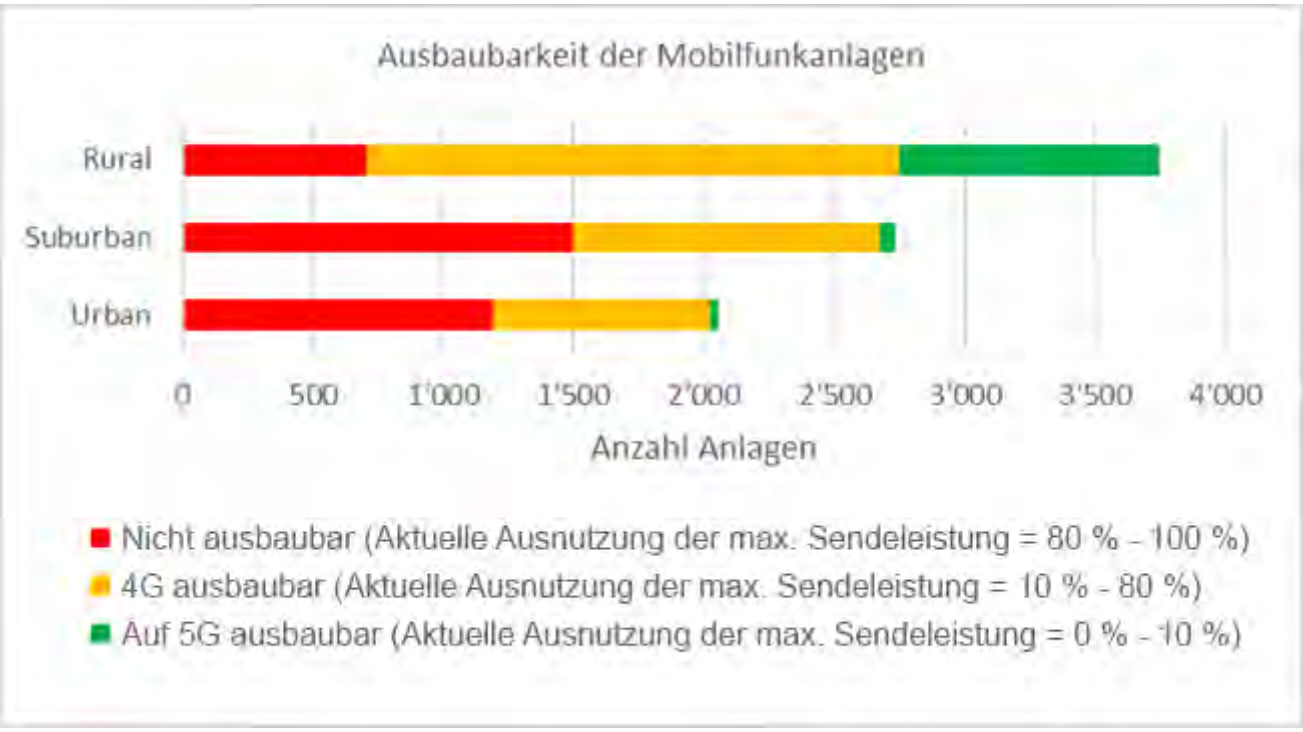

Abbildung 9: Ausbaubarkeit der Mobilfunkanlagen nach Zonen

4.3.5 Interpretation der Datenauswertung

Die Auswertung der von den Betreibern bereitgestellten Daten zeigt, dass eine Erhöhung der Sendeleistungen bei den meisten Mobilfunkanlagen besonders in den urbanen und suburbanen Gebieten durch den Anlagegrenzwert limitiert ist. Nur etwa 2 Prozent der bestehenden Mobilfunkanlagen können auf 5G ausgebaut werden. Die 4G-Technologie kann mit den geltenden Bestimmungen bei gut 40 Prozent der bestehenden Anlagen weiter ausgebaut werden. Die Einführung eines flächendeckenden 5G-Netzes, welches das volle Potenzial der Technologie ausschöpft, ist auf den bestehenden Mobilfunkstandorten zusätzlich zu den vorhandenen Diensten nicht möglich und bedingt die Realisierung neuer Standorte.

4.3.6 Resultierende zukünftige Bedürfnisse

Mit der Versteigerung von Anfang 2019 wurden zu der bestehenden Bandbreite von 575 MHz zusätzliche 445 MHz vergeben (weitere 30 MHz, die zur Verfügung standen, sind nicht vergeben worden). Die ebenfalls als 5G-Pionierband geeigneten Frequenzen von 3,41 bis 3,5 GHz werden in der Schweiz heute noch von anderen Anwendungen belegt (z. B. drahtlose TV-Kameras), dürften aber ebenfalls bald dem Mobilfunk zugeführt werden, wobei die spezifische Nutzung (z. B. durch sogenannte Campus-Lösungen) noch nicht feststeht.

Damit steht in der Schweiz heute eine totale Bandbreite von 1020 MHz für den Mobilfunk zur Verfügung. Dies entspricht einem Zuwachs von 77 Prozent. Im 3,5-GHz-Band alleine sind 300 MHz dazugekommen, das heisst 67 Prozent des Zuwachses befindet sich im 3,5-GHz-Band.

Um die Erwartungen an die neue Mobilfunkgeneration erfüllen und das Potenzial von 5G vollumfänglich nutzen zu können, müssen gewisse Mindestanforderungen aus technischer Sicht gewährleistet werden. In einem ersten Ausbauschritt soll das Frequenzband zwischen 3,5 und 3,8 GHz für 5G eingesetzt werden, mit Trägerbandbreiten bis typisch 100 MHz. Eine minimale Bandbreite von 80 MHz ist notwendig, um eine deutliche Verbesserung gegenüber 4G zu erreichen.

Eine Abschaltung von 2G oder auch 3G wird in Bezug auf die Einführung von 5G einen geringen Einfluss haben und demnach kaum Entlastung der Netzausschöpfung bringen (vgl. *Tabelle 2*). 2G beansprucht heute nur noch rund 5 Prozent

der gesamten Sendeleistung. Die Hauptlast des derzeitigen mobilen Datenverkehrs wird durch die 4G-Technologie getragen, welche noch zahlreiche Jahre in Betrieb stehen wird und auch weiter ausgebaut werden dürfte.

4.3.6.1 Zusätzlicher Leistungsbedarf zur Realisierung von 5G mit 80 MHz[33] im 3,5-GHz-Band

Durch die Verwendung neuer Frequenzbänder im 3,5-GHz-Band entsteht ein zusätzlicher Leistungsbedarf:

- Zusätzliche Bandbreite: Um 5G in einem ersten Schritt sinnvoll auszubauen, sollten 80 MHz Bandbreite genutzt werden können. Unter der Annahme, dass die bestehenden Basisstationen für den Ausbau von 5G genutzt werden und dass heute von den Betreibern zwischen 40 und 75 MHz Bandbreite auf einem Standort genutzt werden, muss im Mittel eine um den Faktor 2,39 (3,78 dB) erhöhte Leistung möglich sein, wobei für die neuen Frequenzen noch eine zusätzliche Korrektur für Verluste nötig ist (siehe nachfolgende Punkte).
- Ausbreitungsverluste: Soll 5G im 3,5-GHz-Band auf bestehenden Standorten genutzt werden, muss bei gleicher Signalqualität am Rand der Zelle, verglichen mit 1,8 GHz, 3,78-mal mehr Leistung (5,78 dB) abgestrahlt werden.[34] Eigene Messungen der Mobilfunkbetreiber ergeben für den Vergleich von 2,1 GHz zu 3,5 GHz zusätzliche Ausbreitungsverluste um den Faktor 2,75 (4,40 dB).[35] Um diese Verluste zu kompensieren, wird eine mittlere Erhöhung der Leistung um mindestens den Faktor 3,27 (5,14 dB) benötigt.
- Gebäudedämpfung: Zu berücksichtigen ist zudem die höhere Dämpfung von Gebäuden bei höheren Frequenzen, wobei eine Erhöhung um den Faktor 2,51 (4,00 dB) im Vergleich zu 1,8 GHz angegeben wird. Diese Penetrationsverluste müssen also mit einer Erhöhung der Leistung um den Faktor 2,51 (4,00 dB) kompensiert werden. Die Frequenzabhängigkeit der Gebäudedämpfung wird heute bei der Berechnung der Belastung der OMEN nicht berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung der drei oben genannten Punkte resultiert für den gesamten Leistungsbedarf an einem bestehenden Standort ein totaler Faktor von 12,4 (1,39 × 3,27 × 2,51 + 1) oder umgerechnet 10,9 dB. Insgesamt müsste daher 12,4-mal mehr Leistung zur Verfügung stehen, damit 5G vollumfänglich auf den heute existierenden Standorten genutzt werden könnte (ohne Berücksichtigung einer allfälligen neuen Bewertungsmethode der massgebenden Sendeleistung beim Einsatz von adaptiven Antennen).

4.3.6.2 Abschätzung des Bedarfs an zusätzlichen Standorten

Geht man von dieser zusätzlich nötigen Leistung aus, können bei den heute bereits gut ausgenutzten Standorten weitere Ausbauschritte von 5G ohne einen Zubau von Standorten nicht realisiert werden. Es existieren nur noch wenige, fast ausschliesslich rurale Standorte, die einen Ausbau in der von den Betreibern gewünschten Form erlauben. Schätzungen der Mobilfunkbetreiber gehen, unter Berücksichtigung einer angemessenen Regelung für adaptive Antennen, für eine flächendeckende und gemäss ITU IMT-2020 leistungsfähige Versorgung von einem zusätzlichen Bedarf von ca. 26 500 Standorten aus (Abschätzung aufgrund des zusätzlichen Leistungsbedarfs für 5G sowie der bestehenden Ausbaureserve, vgl. *Kap. 4.3.6.1*).

4.3.6.3 Weiterer Leistungsbedarf zur Realisierung eines vollständigen 5G-Ausbaus

Um die volle Leistungsfähigkeit von 5G erreichen zu können, reichen 100 MHz Bandbreite nicht aus. Daher werden für 5G zusätzlich zum 3,5-GHz-Frequenzband auch Bänder bei 700 MHz und 1,4 GHz sowie zu einem späteren Zeitpunkt Frequenzen oberhalb von 24 GHz (sogenannte Millimeterwellen) zum Einsatz kommen. Auch für diese Frequenzen müssen entsprechende Sendeleistungen zur Verfügung gestellt werden können.

4.4 Kosten des Ausbaus von Mobilfunkanlagen auf 5G

Zur Berechnung der Gesamtkosten für die Einführung von 5G liegen Angaben über die Ausbaukosten von einzelnen Anlagen vor. Die Kostenschätzungen beziehen sich auf das Ziel einer flächendeckenden Versorgungsqualität gemäss ITU IMT-2020 (drinnen, draussen und mobil), welche mit den heute zur Verfügung stehenden 3,5 GHz erreicht werden kann. Die weitere Sicherstellung von 4G und älteren Mobilfunktechnologien ist nicht Gegenstand dieser Abschätzung. International erfolgt die Einführung von 5G in der Regel auf der bestehenden Infrastruktur (d. h. den existierenden Mobilfunkstandorten). Dazu müssen adaptive Antennen mit der entsprechenden Sendeleistung eingesetzt werden können. Für die Abschätzung (*Tabelle 10*) wurde davon ausgegangen, dass adaptive Antennen mit ausreichend Sendeleistung eingesetzt werden können. Die Kosten variieren nach Anlagetyp und Betreiber. Berechnet wurden die einmaligen Investitionen (capital expenditure, Capex) sowie die jährlich wiederkehrenden Betriebskosten (operational expenditure, Opex):

Tabelle 10: Investitionen (Capex) und Betriebskosten (Opex) pro Mobilfunkanlage (in CHF, gerundet auf 5000).

	Capex	**Opex pro Jahr**
Neubau einer 5G-Mobilfunkanlage		
Dachantenne/Rooftop	*245 000*	*15 000*
Frei stehende Antennenmasten/Greenfield	*305 000*	*15 000*
Kleinzellen (Mikrozellen um 6 W ERP)	*50 000*	*5000*
5G-Upgrade bestehende Mobilfunkanlage (ohne Kleinzellen)		
5G-Upgrade	*105 000*	*5000*
Mitbenutzung bestehende Mobilfunkanlage		
Dachantenne/Rooftop	*165 000*	*15 000*
Frei stehende Antennenmasten/Greenfield	*215 000*	*15 000*

Bei den Kostenschätzungen in der *Tabelle 10* handelt es sich um Mittelwerte, basierend auf einer gesamtschweizerischen Betrachtung des bisherigen Netzausbaus der Betreiber. Die Grössenordnung der von den Betreibern (asut) gelieferten Angaben betrachtet das BAKOM als grundsätzlich plausibel. Die Kosten können je nach Standort variieren (z. B. höhere Mieten an urbanen Standorten, höhere Anbindungskosten in ländlichen Gebieten).

5 Zusammenhänge zwischen Emissionen, Immissionen und Exposition

5.1 Begriffe

Um die Belastung der Bevölkerung mit nichtionisierender Strahlung (NIS) zu charakterisieren, sind verschiedene Grössen relevant:

- Die *Emissionen* bezeichnen die Sendeleistung einer Quelle und werden typischerweise in Watt (W) gemessen. Häufig wird auch die äquivalente Strahlungsleistung (ERP) einer Antenne benutzt.
- Die Verteilung von NIS in der Umwelt wird als *Immissionen* dargestellt (elektrische Feldstärke in Volt pro Meter (V/m) oder Leistungsflussdichte in W/m²).
- Mit der *Exposition* wird NIS am Ort, wo sich eine Person befindet, quantifiziert (V/m oder W/m²).
- Die *Dosis* bezeichnet die vom Körper absorbierte NIS (spezifische Absorptionsrate [SAR in W/kg]). Wird sie über einen bestimmten Zeitraum aufgenommen, spricht man von kumulativer Dosis. Die kumulative Dosis erhält man durch die Multiplikation des SAR-Wertes mit der Zeitdauer. Sie wird als Joule (J) pro Kilogramm Körpergewicht pro Tag quantifiziert.
- Als *Effekt* wird die biologische oder gesundheitliche Auswirkung bezeichnet (vgl. *Kap. 6*).

5.2 Hochfrequente NIS-Quellen als Emissionen

Die hochfrequenten NIS-Quellen können grob in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- Körperferne Quellen wie Mobilfunkbasisstationen oder Radio- und Fernsehantennen, WLAN-Router und Mobiltelefone anderer Menschen in der Umgebung: In Bezug auf solche entfernten Quellen befindet sich eine Person im sogenannten Fernfeld, und die Exposition wird als elektrische Feldstärke in V/m oder Leistungsflussdichte in W/m² gemessen. Da das Signal zeitlich gemittelt wird, werden modulationsbedingte Feldänderungen (bzw. Feldspitzen) nicht berücksichtigt. Zur Exposition durch diese Quellen vgl. *Kapitel 5.4*.
- Körpernah betriebene Quellen wie Mobil- und Schnurlostelefone oder Laptops: Die Person befindet sich typischerweise im Nahfeld, und die zeitlich und räumlich gemittelte spezifische Absorptionsrate (SAR-Wert) ist die massgebende Expositionsgrösse (Einheit: W/kg). Der SAR-Wert ist zeitlich gemittelt, d. h., er erfasst weder Modulation noch kurzzeitige Unterbrüche der Strahlung. Zur Exposition durch diese Quellen vgl. *Kapitel 5.5*.

5.3 NIS-Immissionen

NIS-Immissionen sind vielfältig:[36]

- Sie unterscheiden sich erstens durch ihre Frequenz; für den Mobilfunk kommen in der Schweiz seit längerem Frequenzbänder um 400 (Polycom), 800 und 900 MHz sowie 1,8, 2,1 und 2,6 GHz zum Einsatz. Anfang 2019 wurden zudem Frequenzen um 700 MHz, 1,4 und 3,5 GHz für den Mobilfunk freigegeben. Für WLAN werden Frequenzen um 2,4 und 5 GHz verwendet.
- Die NIS-Immissionen unterscheiden sich zweitens durch ihre Intensität. Diese hängt ab von der Stärke der Sendeleistung, dem Abstand zur Quelle und allfälligen Hindernissen auf dem Ausbreitungsweg. Stark emittierende Quellen führen bei gleichem Abstand zu höheren Immissionen als schwache. Wenn man sich jedoch bedeutend näher bei einer schwach emittierenden Quelle aufhält als bei einer entfernt stehenden starken, kann durchaus die schwache Quelle zu höheren Immissionen führen.

- Drittens weisen die Immissionen je nach Quelle ein unterschiedliches zeitliches Muster auf. Die Strahlung von Rundfunksendeanlagen beispielsweise ist zeitlich konstant, während diejenige von Mobilfunksendeanlagen je nach Auslastung des Netzes schwankt.
- Schliesslich hat die Strahlung je nach Quelle oder Technologie (Rundfunk, Mobilfunk, WLAN, Schnurlostelefone, Radar etc.) eine andere Signalform. Die Spanne reicht von einem annähernd sinusförmigen Signal ohne Verzerrungen und Unterbrüche bis zu gepulster Strahlung mit sehr kurzen Pulsen und vergleichsweise langen inaktiven Pausen im Fall der Radarstrahlung.

Welches Expositionsmass bei alltäglichen Immissionen biologisch relevant sein könnte, ist unklar. Denkbar ist, dass die mittlere Immission von Bedeutung ist, es könnte aber auch die Maximalbelastung relevant sein oder die Dauer, während derer ein bestimmter Pegel überschritten wird. Ungewiss ist auch, ob bestimmte Signalformen, insbesondere pulsierende, biologisch besonders wirksam sind.[37]

Mit der Netzstruktur (vgl. *Kap. 4.2*) kann sowohl die Höchstbelastung als auch die mittlere Immission in einem gewissen Rahmen beeinflusst werden. Die Signalform hingegen hängt von der eingesetzten Technologie ab.

5.4 Umweltexposition durch körperferne Quellen

5.4.1 Erhebungsmethoden

Die hochfrequente HF-NIS-Exposition in der Umwelt wird mittels verschiedener Methoden erhoben. Tragbare Messgeräte (Exposimeter) werden bei freiwilligen Probanden eingesetzt, um die persönliche Exposition in ihrem gewohnten Alltag zu erheben (Probandenmessungen). Exposimeter werden auch von Spezialisten für mobile Messungen im Gehen oder Fahren genutzt. Damit kann eine Vielzahl von Messdaten an Orten erhoben werden, wo sich die Bevölkerung typischerweise aufhält (Mikroumgebungsmessungen). Für die Erhebung der Immissionen werden stationäre Messungen mit ausgefeilten Messgeräten gemacht (Spot-Messungen) oder Ausbreitungsmodellierungen durchgeführt. Alle diese Methoden haben Vor- und Nachteile. Es ist zu betonen, dass mit keiner dieser Methoden, auch nicht mit persönlichen Messungen, die gesamte persönliche absorbierte Strahlendosis gemessen wird. Bei persönlichen Messungen wird der Beitrag des eigenen Telefons stark unterschätzt, da das eigene Telefon direkt am Körper betrieben wird und das weiter entfernte Messgerät nur einen kleinen Teil misst. Abschätzungen der kumulativ absorbierten HF-NIS-Dosis finden sich in *Kapitel 5.6.1*.

5.4.2 Resultate aus persönlichen Messungen

Bislang existieren erst wenige Erhebungen zur persönlichen HF-NIS-Exposition in der Schweiz. Die neuesten Daten wurden 2015/2016 bei 115 Personen aus dem Kanton Zürich erhoben.[38] Die mittlere gemessene persönliche HF-NIS-Exposition der Studienteilnehmenden betrug 0,18 V/m, wobei die Hauptbeiträge von Mobilfunkbasisstationen (38 %) und von Mobiltelefonen, hauptsächlich anderer Personen (35 %) stammten. Weniger relevant waren Rundfunk (18 %), WLAN (5 %) und Schnurlostelefone (4 %). Die HF-NIS-Exposition war bei jungen Erwachsenen (0,22 V/m) etwas höher als bei Jugendlichen und ihren Eltern (je 0,16 V/m). Der höchste gemessene Mittelwert lag bei 0,42 V/m. Bei diesen Messungen ist der Beitrag der eigenen Telefonnutzung nicht berücksichtigt (vgl. *Kap. 5.5*).

Neben Tagesmittelwerten wurden für jeden Teilnehmer auch die Mittelwerte pro Aktivität berechnet. Am höchsten war die HF-NIS-Exposition im Durchschnitt in den öffentlichen Verkehrsmitteln (Zug: 0,55 V/m, Bus: 0,39 V/m, Tram: 0,33 V/m; *Abbildung 10*). Im Auto betrug die HF-NIS-Exposition 0,29 V/m, draussen 0,30 V/m und am Arbeitsplatz 0,22 V/m. Die tiefsten Werte wurden in der Schule (0,15 V/m) und zu Hause (0,11 V/m) gemessen. Die Unterschiede zwischen Bewohnern von ländlichen und städtischen Gebieten waren relativ gering, tendenziell nahm jedoch die HF-NIS-Exposition von Mobilfunkbasisstationen mit zunehmender Urbanität zu.

Auch andere persönliche Messstudien aus Europa und Australien finden typischerweise eine durchschnittliche HF-NIS-Exposition im Bereich von 0,2 V/m.[39]

Bei der Interpretation von persönlichen Messungen ist zu beachten, dass man unterwegs das Messgerät am Körper trägt und die daraus resultierende Abschattung der Messgeräte durch den eigenen Körper zu einer Unterschätzung der gemessenen Exposition führen kann. Je nach Frequenzband und Situation beträgt die Unterschätzung bis zu 50 Prozent.[40] Auf der anderen Seite führt der Beitrag des eigenen Mobiltelefons zu einer kleinen Überschätzung der HF-NIS in der Umwelt.[41]

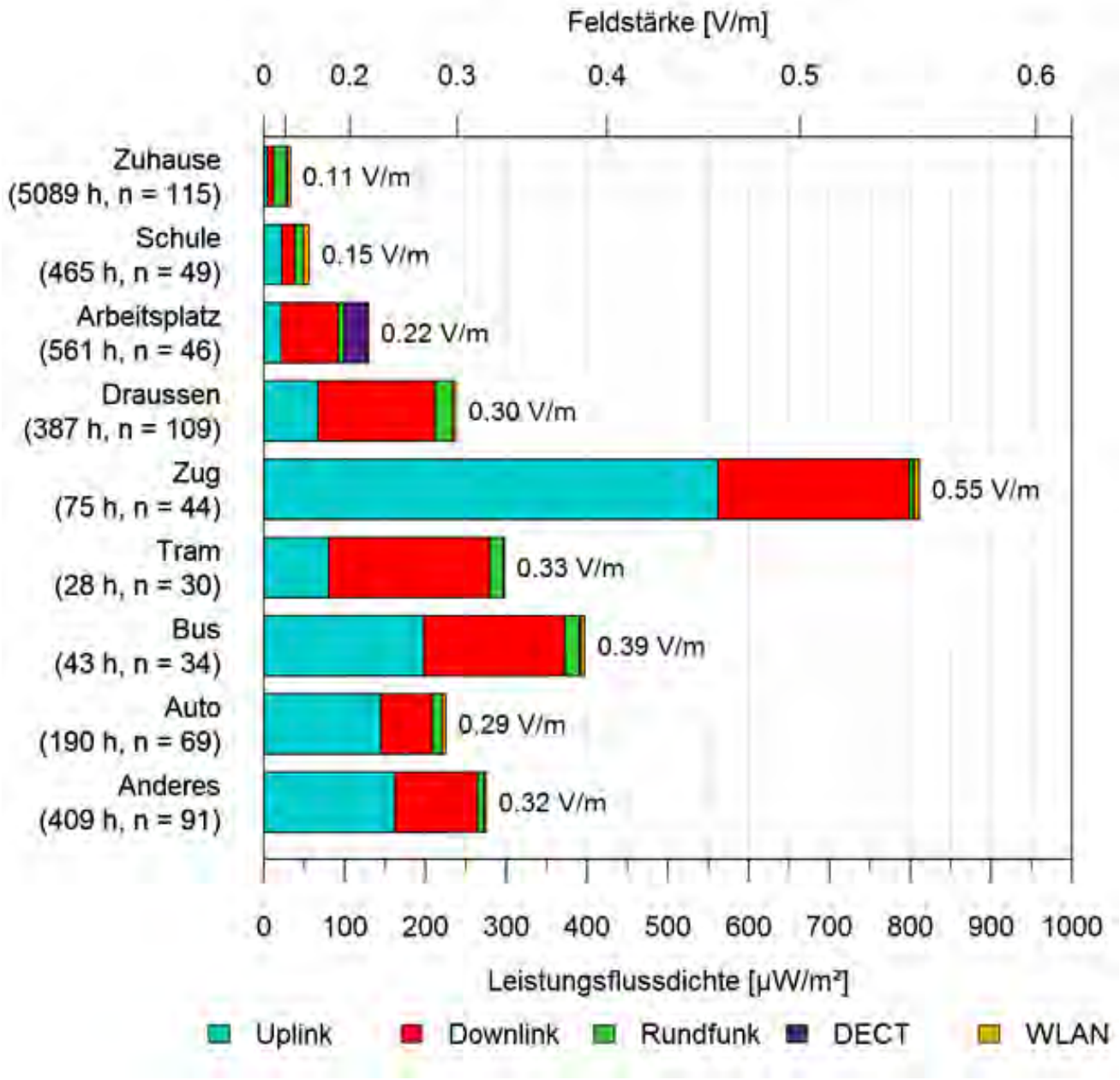

Abbildung 10: Vergleich der mittleren persönlichen HF-NIS-Exposition an verschiedenen Orten der Zürcher Studienpopulation. Die Aktivität «Anderes» bezieht sich auf alle anderen Tätigkeiten bzw. Aufenthaltsorte.[42] Die Beiträge aus verschiedenen Quellen in Leistungsflussdichte lassen sich linear addieren. Bei Angabe in elektrischer Feldstärke müssen die verschiedenen Beiträge quadratisch addiert werden, was sich in Balkendiagrammen nicht darstellen lässt. Die Zahlenangabe und die Skala der elektrischen Feldstärke in der Grafik beziehen sich daher nur auf die Gesamtexposition.

Für einen Vergleich mit den Grenzwerten sind vor allem auch die Maximalwerte relevant. Um diese zu charakterisieren, sind in *Tabelle 11* die mittleren und in *Tabelle 12* die maximal aufgetretenen 99-Perzentilwerte für die verschiedenen Aktivitäten aufgelistet. Das 99. Perzentil entspricht dem Expositionswert, der während 1 Prozent der Messzeit überschritten wird, bei einer 24-Stunden-Messung also während 14,4 Minuten.

Am höchsten waren die Werte beim Uplink (Strahlung von Mobilfunktelefonen), insbesondere unterwegs in Bus, Zug, Tram oder Bahn. In der Schule führte die gelegentliche Nutzung des Mobiltelefons der Schüler ebenfalls zu einem recht hohen 99-Perzentilwert für Uplink, obwohl die mittlere Exposition in der Schule relativ niedrig war.

Die maximal aufgetretenen 99-Perzentilwerte beim Downlink (Strahlung von Mobilfunkantennen) betrugen im Zug 5 V/m und sonst unter 3 V/m (*Tabelle 12*). Das bedeutet, dass selbst bei Summierung aller Frequenzbänder der Mobilfunk-basisstationen die gemessene Exposition nur selten in den Bereich von 4 bis 6 V/m kommt und damit in den Feldstärke-bereich, der als Anlagegrenzwert festgelegt ist. Anzumerken ist, dass sich der Anlagegrenzwert auf die Strahlung einer einzelnen Mobilfunkanlage bezieht und nicht überall, sondern nur an Orten mit empfindlicher Nutzung eingehalten sein muss.

Für DECT, Rundfunk und WLAN waren die 99. Perzentile typischerweise tiefer als für Mobilfunkbasisstationen, ausser zu Hause, wo sowohl die mittleren als auch die maximalen 99. Perzentile von WLAN und Rundfunk etwas höher waren als jene des Mobilfunk-Downlinks, beim Rundfunk mit grossem Unterscheid zwischen Maximalwert und Mittelwert der 99. Perzentile.

Tabelle 11: Mittlere 99. Perzentile in der Zürcher Studienpopulation für verschiedene Aktivitäten. Alle Werte sind in V/m angegeben.[43]

Ort	Total HF-EMF	Rundfunk	Downlink	Uplink	DECT	WLAN
zu Hause	0,22	0,14	0,11	0,07	0,05	0,12
Schule	1,29	0,21	0,58	1,12	0,02	0,13
Arbeitsplatz	0,49	0,10	0,29	0,28	0,28	0,09
draussen	1,08	0,29	0,78	0,72	0,03	0,11
Bus	1,71	0,43	0,95	1,47	0,11	0,13
Zug	2,23	0,14	1,23	1,98	0,03	0,15
Tram	1,19	0,20	0,85	0,89	0,04	0,07
Auto	1,29	0,21	0,58	1,12	0,02	0,13
anderes	1,15	0,12	0,62	0,90	0,05	0,12

Tabelle 12: Maximal aufgetretene 99. Perzentile in der Zürcher Studienpopulation für verschiedene Aktivitäten. Alle Werte sind in V/m angegeben.[44]

Ort	Total HF-EMF	Rundfunk	Downlink	Uplink	DECT	WLAN
zu Hause	0,84	0,84	0,46	0,41	0,34	0,57
Schule	6,04	0,96	2,52	5,01	0,05	0,54
Arbeitsplatz	1,83	0,31	1,09	1,25	1,76	0,42
draussen	5,00	1,13	1,85	5,00	0,15	0,60
Bus	5,01	2,11	2,35	5,00	0,44	0,44
Zug	7,11	0,58	5,02	5,15	0,10	0,55
Tram	4,18	0,47	1,84	4,15	0,08	0,14
Auto	6,04	0,96	2,52	5,01	0,05	0,54
anderes	5,01	0,51	2,34	5,00	0,22	0,41

5.4.3 Resultate aus Mikroumgebungsmessungen

Werden Mikroumgebungsmessungen durch Spezialisten durchgeführt, so kann die Abschattung durch den eigenen Körper reduziert werden, indem das Messgerät weiter entfernt vom Körper platziert wird. Solche Messungen wurden zwischen März und Juli 2014 in 51 verschiedenen Gebieten in der ganzen Schweiz durchgeführt.[45] Diese Messungen zeigen, dass die Hauptexpositionsbeiträge im Freien von Mobilfunkbasisstationen stammten (*Abbildung 11*). In öffentlichen Verkehrsmitteln spielte auch der Uplink (Emissionen von Mobiltelefonen Dritter; die Nutzung des eigenen Handys wird bei diesen Messungen nicht berücksichtigt) eine wichtige Rolle. Die HF-NIS-Belastung nimmt tendenziell mit zunehmender Urbanisierung zu. Relativ hoch war sie auch in Industriegebieten und öffentlichen Verkehrsmitteln (besonders im Tram). In ländlichen Wohngebieten war die HF-NIS-Exposition gering.

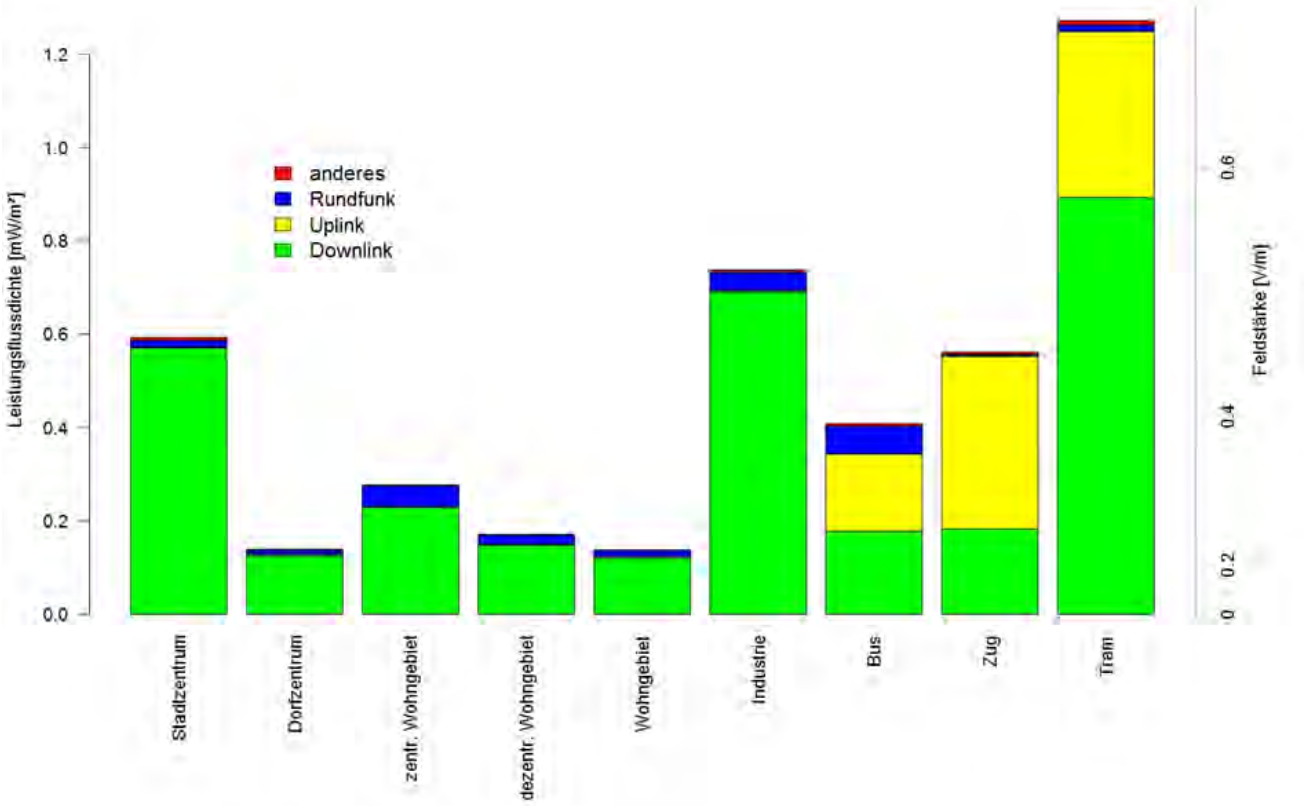

Abbildung 11: Beiträge der einzelnen Funkanwendungen an die mittlere Exposition in verschiedenen Typen von Mikroumgebungen. Die Beiträge aus verschiedenen Quellen in Leistungsflussdichte lassen sich linear addieren. Bei Angabe in elektrischer Feldstärke müssen die verschiedenen Beiträge quadratisch addiert werden. Die Skala der elektrischen Feldstärke in der Grafik bezieht sich daher nur auf die Gesamtexposition. («zentr. Wohngebiet» und «dezentr. Wohngebiet = städtisch; «Wohngebiet» = ländlich)

Die in der Schweiz gemessenen Werte sind ähnlich wie in anderen europäischen Ländern.[46] Jedoch zeigte eine Mikroumgebungsmessstudie in aussereuropäischen Ländern (Äthiopien, Australien, Nepal, Südafrika, USA) tendenziell höhere HF-NIS-Expositionen als in der Schweiz.[47]

5.4.4 Zeitliche Entwicklung der HF-NIS-Exposition

Angesichts der kleinen Zahl von Erhebungen zur persönlichen HF-NIS-Exposition in der Schweiz sind Aussagen zur zeitlichen Entwicklung nur begrenzt möglich. Erste Hinweise liefern zwei Studien. Ein Vergleich der persönlichen mittleren HF-NIS-Exposition der Erwachsenen bei der Zürcher Messstudie[48] mit der gemessenen Exposition in der Qualifex-Studie[49], welche 2007/2008 mit ähnlichen Methoden durchgeführt wurde, deutet nicht auf eine Zunahme der persönlichen

HF-NIS-Exposition hin (*Abbildung 12*).[50] In der Qualifex-Studie betrug die mittlere HF-NIS-Exposition 0,22 V/m und in der Zürcher Messstudie 0,18 V/m. Vor zehn Jahren war insbesondere der Beitrag durch DECT-Schnurlostelefone und durch Mobilfunkendgeräte höher als zur Zeit der Zürcher Messstudie. Zudem führen effiziente Leistungsregelungs-Algorithmen neuerer Technologien (UMTS und LTE) zu einer Reduktion der Sendeleistung von Endgeräten im Vergleich zu GSM. Auch auf der Seite der Mobilfunkstationen wurde durch die neuen Technologien die Datenübertragung effizienter, sodass die Exposition zwischen 2008 und 2015 nur wenig zugenommen hat, obwohl 2015 rund 200-mal mehr Daten per Mobilfunk übertragen wurden als 2008.

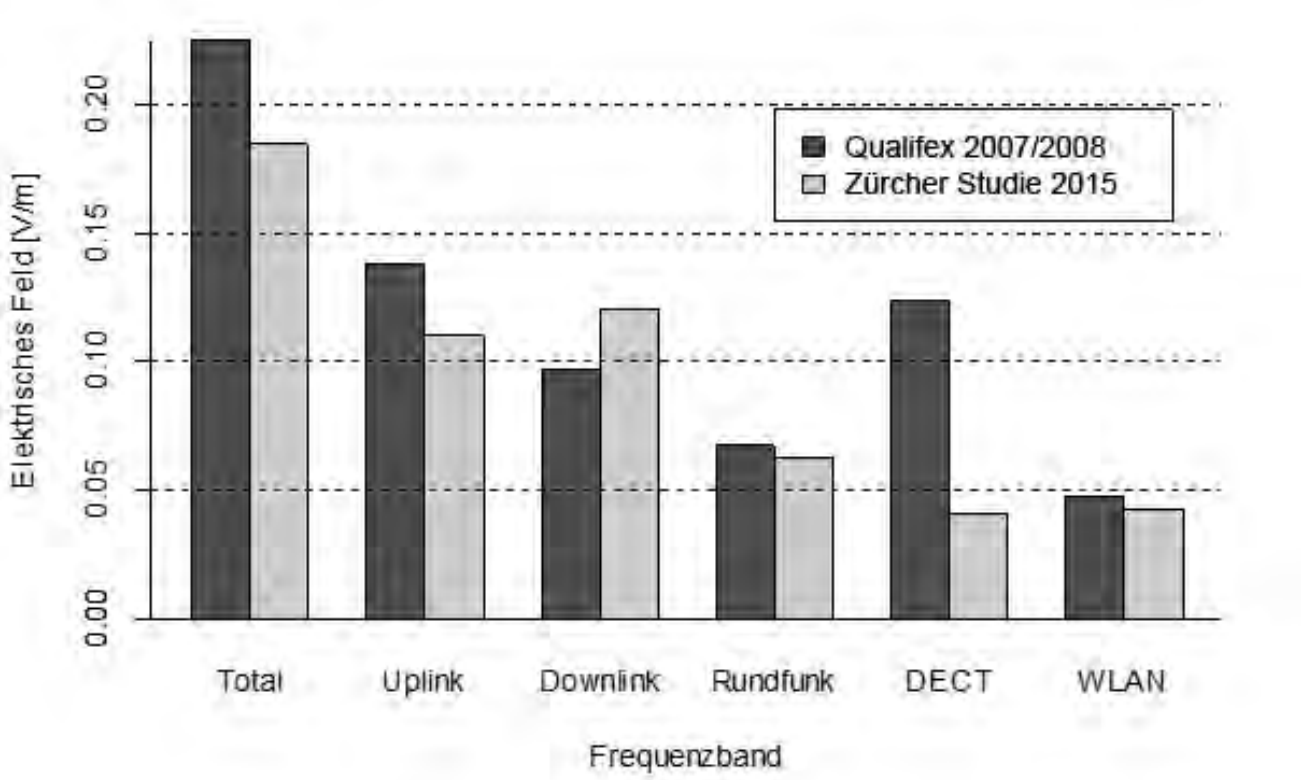

Abbildung 12: Vergleich der persönlichen HF-NIS-Exposition von zwei Messstudien aus der Schweiz[51]

5.4.5 Ausblick auf 5G

Da 5G in Europa noch nicht stark verbreitet ist, gibt es kaum Studien zur Exposition durch diese Technologie. Beim Aufbau von 5G werden Frequenzen zwischen 3,5 und 3,8 GHz genutzt, welche ein ähnliches Absorptionsverhalten im menschlichen Körper haben wie die bisher im Mobilfunk verwendeten Frequenzbänder. Da Studien gewisse Effekte – etwa eine Veränderung der Hirnströme – durch die Modulationsart nachgewiesen haben, ist die Frage nach der Modulationsart relevant. In dieser Hinsicht ist die Signalstruktur von 5G keine Revolution, sondern lediglich eine Evolution der Luftschnittstelle der Vorgängertechnologie 4G. So wird auch die neue Luftschnittstelle von 5G – New Radio (NR) genannt – das Orthogonale Frequenzmultiplexverfahren (OFDM) nutzen. Das bedeutet, dass die Signalstruktur und die Dynamik nur wenig von der Vorgängertechnologie LTE abweichen. Viele andere Technologien wie WLAN, DVB-T und DAB verwenden dieselbe Modulationsart, jedoch mit bedeutend weniger Subkanälen und viel schmaleren Frequenzbandbreiten. Dedizierte Studien gibt es dazu allerdings noch nicht.

Simulationen haben gezeigt, dass die Absorption von 3,5-GHz-Signalen bei einer Fernfeldexposition nicht zu höheren Ganzkörper-SAR-Werten führt als für die Vorgängertechnologien.[52] Verglichen mit tieferen Frequenzen wird die Energie weniger stark in den inneren Organen des Körpers absorbiert. Ungefähr 95 Prozent der Energie werden in der Haut und bis 2 cm darunter absorbiert. Interessant waren die Messungen an Testanlagen, die aufgezeigt haben, dass die mittleren Leistungsflussdichten in einem Abstand von nur 6 m zur adaptiven Antenne gerade 5 Prozent der Immissionsgrenzwerte der ICNIRP darstellten.

Einige Modellierungsarbeiten haben sich damit auseinandergesetzt, was eine realistische Maximalexposition (definiert als das 95. Perzentil) bei den bei 5G zum Einsatz kommenden Massiv-MIMO-Antennen im Vergleich zum theoretischen Maximum ist. Eine Modellierungsstudie aus dem Jahr 2017 geht davon aus, dass bei diesen adaptiven Antennen, welche sich kurzzeitig auf Nutzer ausrichten, die Exposition im zeitlichen Mittelwert tiefer ausfällt.[53] Für eine Vielzahl von realistischen, aber konservativ ausgewählten Konfigurationen mit einer adaptiven Antenne im Frequenzbereich von 3,5 GHz wurde berechnet, dass für 95 Prozent aller Situationen die über 6 Minuten gemittelte Exposition bezogen auf die Leistungsflussdichte weniger als 15 Prozent des theoretischen Maximalwertes betrage (bzw. 39 % bezogen auf die elektrische Feldstärke). Eine entscheidende Annahme bei diesen Berechnungen ist, wie die Nutzer geografisch verteilt sind und wie gross der Datentransfer zu diesen Nutzern ist. Bei einer angenommenen höheren Nutzerdichte im Zentrum der Funkzelle und einer Netzauslastung von rund 95 Prozent wurde der höchste Wert berechnet: Dieser lag bei 22 Prozent des theoretischen Maximalwerts bezogen auf die Leistungsflussdichte (bzw. 47 % bezogen auf die elektrische Feldstärke). Die Langzeitmittelwerte liegen dabei mit 1,5 bis 7 Prozent (bezogen auf die Leistungsflussdichte) weit unterhalb der höchsten 6-Minuten-Mittelwerte. Jedoch zeigen auch die älteren Mobilfunkstandards 6-Minuten-Mittelwerte, die deutlich unter dem maximalen Betriebszustand liegen (UMTS sendet im Stand-by im Vergleich zur Volllast mit 16 % Leistung, und für LTE beträgt die Sendeleistung in 90 % aller Situationen bei hoher Auslastung weniger als 12 % der maximal erlaubten Leistung.)

Zu einem ähnlichen Ergebnis kam eine Studie aus dem Jahr 2018.[54] Sie beschreibt, dass mit einer statistischen Betrachtungsweise der Extremwerte die Sicherheitsdistanz bei MIMO-Antennen um den Faktor zwei reduziert werden kann. Die über 6 Minuten gemittelte Sendeleistung erreichte in 99 Prozent der Fälle 32 Prozent der Maximalleistung und in 95 Prozent der Fälle 26 Prozent der Maximalleistung.

5.5 Exposition durch körpernah betriebene Geräte

5.5.1 Bisherige Technologien

Die Benutzung eines Mobiltelefons führt zu einer Exposition des Kopfes oder der Hand einer Person durch HF-NIS, wenn die Person das Gerät zum Telefonieren direkt an das Ohr oder für weitere Anwendungen wie beispielsweise die Nutzung des mobilen Internets in der Hand hält.[55] Die Exposition durch Endgeräte (Handy, Laptop, Tablet, Schnurlostelefon etc.) hängt von folgenden Faktoren ab:[56]

- Nutzungsdauer: Die Strahlung tritt insbesondere dann auf, wenn das Gerät sendet. Im Ruhezustand oder wenn das Gerät Daten empfängt, ist die Exposition klein.
- Distanz des Geräts zum Körper: Mit zunehmender Distanz nimmt die Exposition rasch ab. Dies kann zum Beispiel bei Mobiltelefonen durch den Einsatz von Freisprecheinrichtungen (Head-Sets) erreicht werden (Abnahme der Exposition bis zu einem Faktor 100).
- Sendeleistung: Je stärker die Sendeleistung, desto höher die Exposition. Die Sendeleistung ihrerseits ist abhängig von:
  - «Sendeeigenschaften» des Geräts: Die spezifische Absorptionsrate SAR gibt an, wie viel Strahlung beim Nutzen des Endgerätes maximal vom Köper absorbiert wird. Je tiefer der SAR-Wert, desto geringer die Exposition.
  - Mobilfunktechnologie: Das Telefonieren mit den neueren Technologien UMTS und LTE statt mit der älteren GSM-Technologie führt zum Beispiel zu einer deutlich tieferen Exposition.
  - Verbindungsqualität: Je besser die Verbindungsqualität ist, je «einfacher» das Signal also eine Basisstation bzw. einen Access Point erreichen kann, also insbesondere je kürzer die Distanz zwischen Gerät und Basisstation ist, desto geringer ist die Sendeleistung, die das Gerät dafür aufbringen muss.

Endgeräte weisen eine Leistungsregelung auf. Je nach Netzwerkqualität und Netzwerktyp unterscheiden sich deshalb die Sendeleistungen deutlich. Einige Messstudien zu Mobiltelefonen haben gezeigt, dass Anrufe auf dem 3G-Netzwerk (UMTS) im Alltag zu rund 100- bis 500-mal weniger hohen Emissionen führen als Anrufe auf dem 2G-Netzwerk (GSM).[57] Die Art der Mobiltelefonnutzung (Anruf, Daten) spielt für die Sendeleistung ebenfalls eine Rolle. Da die Verbindungsqualität im städtischen Gebiet im Allgemeinen besser ist, ist die Sendeleistung von Mobiltelefonen dort im Durchschnitt

geringer als in ländlichen Gegenden.[58] Dieser Befund wurde bei Messungen im Jahr 2010 auch für die Schweiz bestätigt.[59] Die Sendeleistung eines UMTS-Telefons war mehr als 100-mal kleiner als diejenige eines GSM-Telefons, und je besser die Verbindungsqualität war, desto tiefer war die Sendeleistung.

Für 4G-Endgeräte ergaben 300 000 Messwerte der Sendeleistung in Schweden während sieben Tagen ähnliche Werte wie für UMTS-Endgeräte, trotz zehnmal höherem Datentransfer.[60] In ländlichen Gegenden lag das 95. Perzentil der Sendeleistung bei 2,2 Prozent der maximalen Sendeleistung und in städtischen Gebieten bei weniger als 1 Prozent der maximalen Sendeleistung. Noch geringer waren die Werte in Bürogebäuden.

Kürzlich wurden die Sendeleistungen von Endgeräten bei verschiedenen Nutzungen in verschiedenen Netzwerken (GSM, UMTS und WLAN) bei guter und schlechter Verbindungsqualität in Serbien systematisch untersucht.[61] Dabei zeigte sich, dass UMTS bei guter Empfangsqualität zu geringeren Emissionen führt als GSM und WLAN.

Eine französische Modellierungsstudie kam zum Schluss, dass bei 4G der Beitrag des eigenen Endgerätes im Vergleich zum Fernfeld noch geringer ist als bei 3G.[62] Das kommt daher, dass der Datenverkehr sehr schnell ist. Für die Modellierungen wurden realistische Annahmen zum Anruf- und Datennutzungsverhalten der Bevölkerung getroffen und unter anderem auch der Ganzkörper-SAR-Wert berechnet, wenn ein Mobiltelefon für Datenaustausch vor die Brust gehalten wird. Die Berechnungen ergaben, dass das eigene Gerät nur 25 Prozent der gesamten absorbierten 4G-Immissionen ausmacht.

5.5.2 Ausblick auf 5G

Für 5G-Mobiltelefone werden die SAR-Messungen und die einschlägigen Normen für Messungen für den Frequenzbereich von 30 MHz bis 6 GHz angewendet.[63] Anders sieht es für diejenigen 5G-Mobiltelefone aus, die Millimeterwellen oberhalb 6 GHz (typischerweise über 24 GHz) nutzen werden. Dieser Frequenzbereich soll zu einem späteren Zeitpunkt für 5G eingesetzt werden – in Europa wahrscheinlich frühestens um 2020, für die Schweiz liegt noch kein Zeitplan vor. Für diese Frequenzen mit einem wesentlich anderen Ausbreitungsverhalten wurden in den letzten Jahren neue Messtechniken entwickelt, die es erlauben, die in diesem Frequenzbereich relevante Leistungsflussdichte (in W/m^2) zu messen.[64] Bisher wurde für numerische Studien der Absorption von elektromagnetischen Wellen im Menschen die Haut in den meisten Fällen als absorbierendes, homogenes Medium mit einem bestimmten Wassergehalt modelliert. Weitere Details wie die verschiedenen Schichten der Haut und weitere darin enthaltene Strukturen wurden meist nicht berücksichtigt. Es handelt sich hier um grosse Vereinfachungen, da die Haut als komplexes Organ aufzufassen ist. In verschiedenen Publikationen wurde aber auch mit einem Schichtmodell der Haut die Temperaturerhöhung durch Millimeterwellen berechnet. So wurde 2018 ein Temperaturanstieg von 0,1 °C durch die Exposition mit einem Handy bei 28 GHz berechnet.[65] Im Weiteren wurde festgestellt, dass die Haut durch verschiedene Schichten gut angenähert werden kann.[66] Diese Studie unterstreicht auch die Wichtigkeit der Mittelungsfläche, damit bei Einhaltung der Grenzwerte ein Temperaturanstieg von mehr als 1 °C vermieden werden kann.

Eine Studie aus dem Jahr 2018 findet solche Näherungen zunehmend unzureichend.[67] Die Autoren untersuchten den Einfluss der Struktur der Schweissdrüsen auf die Absorption. Da vorerst noch keine Messdaten der entsprechenden Gewebe im entsprechenden Frequenzbereich vorliegen, wurden die physikalischen Gewebeparameter basierend auf dem Wassergehalt der einzelnen Schichten abgeschätzt. Die Resultate der Modellierung zeigen, dass bei Millimeterwellen die Topologie und die feineren Strukturen der Haut einen signifikanten Einfluss auf die Absorption in der Haut haben können. Der Unterschied der lokal maximalen SAR in der Haut mit und ohne Berücksichtigung von Schweissdrüsen beträgt in dieser Studie einen Faktor 1000 bis 10 000 (aber erst ab einer Frequenz von 50 GHz). Die Schweissdrüsen stellen sich dabei als Mikrostrukturen mit einer sehr stark erhöhten Absorptionsfähigkeit heraus. Die Resultate der Studie sollten in weiteren Untersuchungen verifiziert und validiert werden. Zudem sollten die entsprechenden Gewebeparameter durch Messungen bestimmt werden.

5.6 Vergleich der Exposition durch körpernahe und körperferne Quellen

5.6.1 Grundsätzliches

Die Exposition durch eine Basisstation oder durch ein Endgerät weist wesentliche Unterschiede auf. Mobiltelefone und andere Endgeräte haben zwar in den allermeisten Fällen eine wesentlich niedrigere Sendeleistung als eine Basisstation. Die Exposition des Menschen durch das Endgerät während der Nutzung (Datenverkehr, Gespräch) ist im Allgemeinen jedoch viel höher als jene durch die leistungsstärkste Basisstation. Grund dafür ist, dass sich das Endgerät oft nur einige Millimeter vom Kopf oder wenige Zentimeter vom Körper entfernt befindet, während man sich der Antenne einer Basisstation selten auf kürzere Distanzen als einige Meter nähert. Aufgrund der grösseren Distanz zur Basisstation ist der ganze Körper gleichmässig deren Strahlung ausgesetzt. Das Endgerät bestrahlt hingegen vorwiegend den Kopf oder eine Körperpartie in dessen unmittelbarer Nähe.

Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass bei 2G, 3G und 4G die Basisstation dauernd ein Kontrollsignal sendet, das Endgerät jedoch nur während eines Gesprächs oder bei Datenverkehr (auch im Standby-Modus); bei 5G sendet die Basisstation weniger Kontrollsignale als bei den früheren Technologien. Wenn kein Gespräch oder keine Daten übermittelt werden – also im Bereitschafts- oder Stand-by-Modus – sendet ein eingeschaltetes Endgerät nur alle paar Minuten ein kurzes Signal, um mitzuteilen, in welcher Zelle es sich befindet.

Tabelle 13: Exposition durch Basisstationen (Makrozellen) und Endgeräte im Vergleich

Basisstation	Endgerät
· meistens stärkerer Sender	· schwacher Sender
· grössere Distanz zu Personen	· je nach Anwendung sehr kleine bis kleine Distanz zum Körper
· gleichmässige Exposition des ganzen Körpers	· lokale Exposition eines Körperteils
· geringe absorbierte Leistung	· sehr hohe lokal absorbierte Leistung
· Exposition dauernd vorhanden, aber im Tagesgang und bei dynamischer Steuerung der Leistung und Senderichtung unterschiedlich	· Strahlung nur während einer Verbindung vorhanden (Gespräch, Datenverkehr)
· gibt die Strahlung grossflächig ab und exponiert alle Personen in der Umgebung	· exponiert hauptsächlich den Benutzer sowie in der Nähe befindliche Nichtnutzer

5.6.2 Vergleich der absorbierten Dosis

Der Vergleich der Exposition durch Fern- und Nahfelder ist nicht trivial. Das zeigt sich schon bei den unterschiedlichen Masseinheiten (vgl. *Kap. 5.2*). A priori ist daher nicht klar, welches das beste Vergleichsmass ist. In der Epidemiologie hat sich international ein kumulatives Dosismass (J/kg) durchgesetzt, welches den SAR-Wert über grosse Volumen (z. B. Hirnmasse) mittelt und mit der Expositionsdauer multipliziert. Es ist aber zu betonen, dass ein solches Mass nicht geeignet ist, um Effekte zu beschreiben, die dosisabhängig sind oder nur oberhalb einer bestimmten Schwelle stattfinden, wie zum Beispiel thermische Effekte, welche erst oberhalb einer bestimmten Temperatur auftreten (siehe z. B. maximale SAR im *Kap. 5.8*). Grundsätzlich ist es ein konservatives Mass in dem Sinne, dass es auch Dosisbeiträge von tiefen Expositionen miterfasst. Modulationsbedingte Feldänderungen (bzw. Feldspitzen) werden mit dieser Metrik jedoch nicht berücksichtigt.

2013 wurde erstmals ein Vergleich zwischen Nah- und Fernfeldexposition durchgeführt.[68] Dazu wurden für verschiedene Fernfeld- und Nahfeldexpositionssituationen die Ganzkörper- und organspezifische SAR berechnet und diese Werte mit der entsprechenden Expositions- oder Nutzungsdauer multipliziert, um auf diese Weise die kumulative Dosis pro 24 Stunden zu erhalten. Als Grundlage für die Berechnungen wurden die in der Qualifex-Studie[69] erhobenen mittleren HF-

NIS-Expositionswerte verwendet. Für Fernfeldquellen sind diese Werte in *Abbildung 12* dargestellt, für Mobil- und Schnurlostelefonbenützung wurden 26 Min./Woche (Betreiberdaten) bzw. 62 Min./Woche (selbst berichtet) angenommen. Es wurden zwei Szenarien berechnet: Beim ersten Szenario wurde angenommen, dass eine Person nur das GSM-Netzwerk benutzt, beim zweiten Szenario nur das UMTS-Netzwerk. Die Berechnungen ergaben, dass bei GSM-Nutzung die kumulative Ganzkörperdosis durch die eigene Mobiltelefonnutzung dominiert wird (*Tabelle 14*). Bei UMTS-Nutzung ist jedoch der Beitrag des Mobiltelefons gering und der grösste Teil stammt von den Fernfeldquellen und dem Schnurlostelefon.

Tabelle 14: Ganzkörper- und organspezifische kumulative 24-Stunden-Dosis (in mJ/kg) für die mittlere Exposition in der Qualifex-Studie.[70] (Mittelwert von total 198 Exposimetermessungen)

Organ	GSM-900-Mobiltelefon	UMTS- Mobiltelefon	DECT Schnurlostelefon	Summe Fernfeldquellen	Verhältnis (Nah-/Fernfeld) für GSM	Verhältnis (Nah-/Fernfeld) für UMTS
Ganzkörper	*111*	*0,7*	*27*	*35*	*3*	*0,8*
Gehirn (graue Substanz)	1002	5	197	42	24	5
Hypothalamus	1109	5	187	27	41	7
Nervengewebe	23	0,09	4	7	3	0,6
Rotes Knochenmark	46	0,2	9	20	2	0,5
Hoden	0,7	0,001	0,03	76	1:100	1:2350

Diese Dosisberechnungen wurden 2015 aktualisiert und mit weiteren Szenarien (z. B. Internetgebrauch von Smartphones) ergänzt.[71] Auf der Basis der gemessenen Fernfeld-HF-NIS-Exposition und der selbst geschätzten Nutzung von drahtlosen Kommunikationsgeräten während der Messperiode wurde die im Durchschnitt während 24 Stunden kumulative absorbierte Gehirn- und Ganzkörper-HF-NIS-Dosis berechnet. Es wurden verschiedene Szenarien berechnet:

- Mittleres Szenario unter der Annahme, dass je 50 Prozent der Anrufe auf dem GSM- und dem UMTS-Netzwerk stattfinden;
- alle Anrufe finden entweder auf dem UMTS- oder dem GSM-Netzwerk statt;
- Sensitivitätsanalyse, bei welcher für jedes Frequenzband der Mobilfunkbasisstationen jeweils der höchste gemessene Mittelwert eines Probanden während der gesamten Messperiode verwendet wird.

Wenn man die Downlink-Bänder addiert, ergibt sich für das erste und zweite Szenario eine mittlere Feldstärke von 0,11 V/m für die Immissionen von Mobilfunkbasisstationen. Bei der Sensitivitätsanalyse mit dem jeweils höchsten gemessenen Downlink ergibt sich für die fünf einbezogenen Frequenzbänder ein Summenwert für Downlink von 0,51 V/m.

Abbildung 13 zeigt die verschiedenen Quellenbeiträge der durchschnittlichen HF-NIS-Gehirn- und Ganzkörperdosis. Beim Gehirn stammen 96,2 Prozent der gesamten Dosis von 594 mJ/kg/Tag von Nahfeldquellen. Am relevantesten sind Mobiltelefonanrufe, die 78 Prozent zur kumulativen Gehirndosis beitragen. Fernfeldquellen tragen nur minimal zur Ge-

hirndosis bei: Rundfunk 0,9 Prozent, Mobilfunk-Downlink 2,1 Prozent, WLAN 0,1 Prozent, Schnurlostelefonbasisstationen 0,1 Prozent und Mobiltelefone anderer Personen 0,5 Prozent. In Bezug auf die Ganzkörperexposition sind Fernfeldquellen relevanter, dennoch tragen sie zur kumulativen Dosis von insgesamt 194 mJ/kg/Tag nur 10,2 Prozent bei. Etwa die Hälfte des Fernfeldbeitrags stammt von Mobilfunkbasisstationen (5 % an der gesamten Dosis). Bei der Gerätenutzung sind für die kumulative Ganzkörperdosis neben Mobiltelefonanrufen (33 %) auch die Beiträge von Schnurlostelefonaten (8 %), Datenverkehr mit Mobiltelefonen (19 %) sowie Computer, Laptops und Tablets (29 %) relevant.

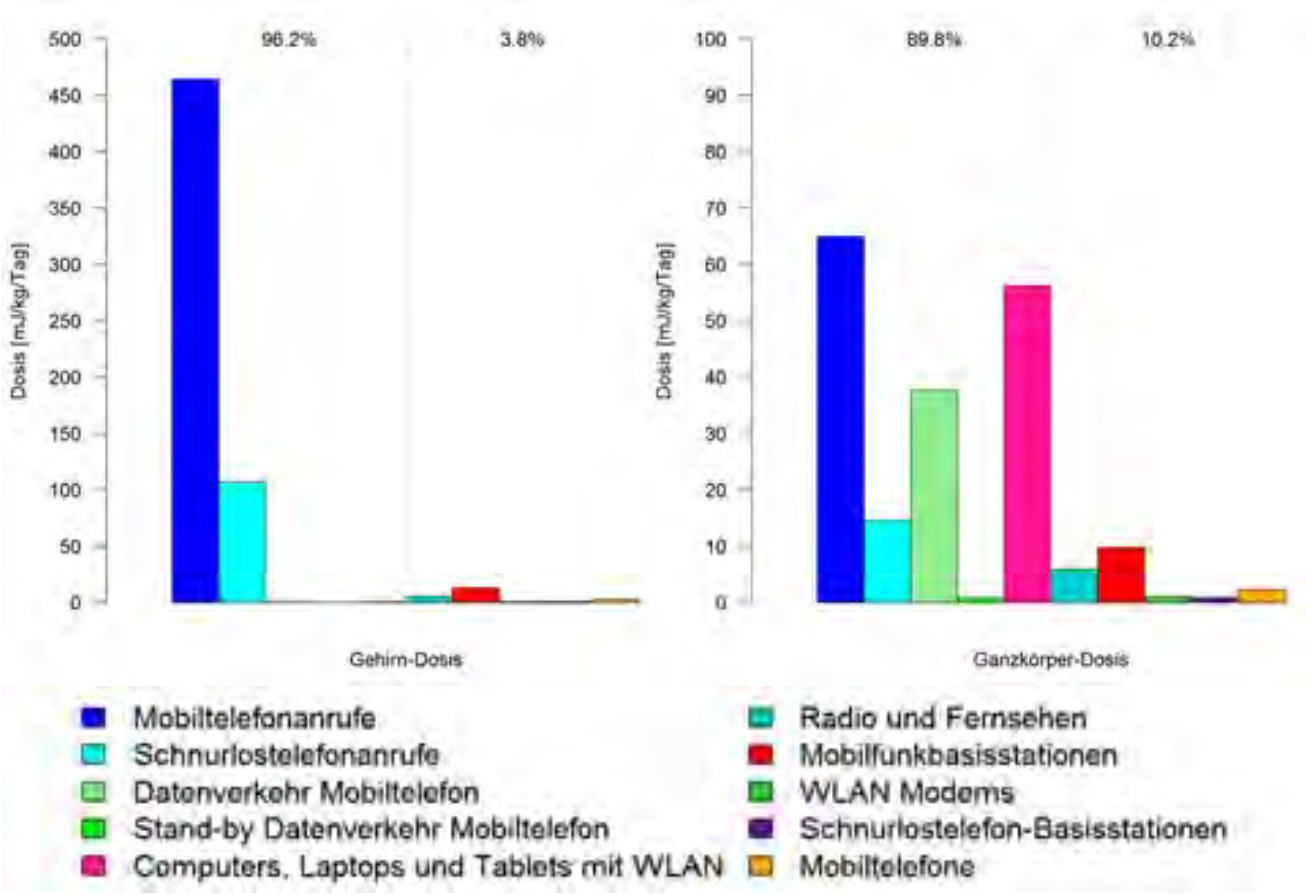

Abbildung 13: Überblick über die durchschnittliche 24-stündige kumulative HF-NIS-Dosis des Gehirns (links) und des ganzen Körpers (rechts) unter der Annahme, dass Mobiltelefonanrufe zu je 50 Prozent auf dem GSM- und dem UMTS-Netzwerk stattfinden. Man beachte die unterschiedliche Skalierung. Die Prozentwerte geben jeweils die Anteile von körpernah (links) und körperfern (rechts) betriebenen HF-NIS-Quellen an der Gesamtdosis an.

Da bei Mobiltelefonanrufen auf dem UMTS-Netzwerk die Emissionen deutlich geringer sind, ergibt sich für das zweite Szenario ein ganz anderes Bild, wenn man annimmt, dass alle Mobiltelefonanrufe auf dem UMTS-Netzwerk stattfinden. In diesem Fall verringert sich die 24-stündige kumulative HF-NIS-Gehirndosis auf 136 mJ/kg/Tag und die Ganzkörperexposition auf 130 mJ/kg/Tag. Mobiltelefonanrufe tragen in diesem Falle nur noch 5 Prozent zur Gehirndosis bei, und der grösste Anteil an der kumulativen Gehirndosis stammt von Schnurlostelefonanrufen (78 %). Bei der Ganzkörperexposition stammen die Hauptbeiträge vom Datenverkehr mit Mobiltelefonen (29 %) sowie von Computern, Laptops und Tablets (43 %). Der Anteil von Mobiltelefonanrufen macht nur 0,7 Prozent an der Gesamtkörperdosis aus. Nimmt man hingegen an, dass alle Mobiltelefonanrufe auf dem GSM-Netzwerk durchgeführt werden, kommt man auf eine kumulative Gehirndosis von 1052 mJ/kg/Tag (Beitrag Mobiltelefonanrufe: 87 %) und auf eine kumulative Ganzkörperdosis von 258 mJ/kg/Tag (Beitrag Mobiltelefonanrufe: 50 %).

Im dritten Szenario wurde evaluiert, wie gross der Beitrag von Mobilfunkbasisstationen an der kumulativen HF-NIS-Dosis ist, wenn für den Downlink der maximale Wert von 0,51 V/m verwendet wird. Da diese Höchstwerte von verschiedenen Probanden stammen, stellt dieses Szenario also einen absoluten Worst-Case dar, der so nicht im Studienkollektiv vorgekommen ist. Für die Mobiltelefonanrufe wurde wiederum angenommen, dass sie je zu 50 Prozent auf dem GSM- und dem UMTS-Netzwerk stattgefunden haben. Bei diesem Downlink-Worst-Case-Szenario beträgt die kumulative Gehirndosis 817 mJ/kg/Tag und die Ganzkörperdosis 333 mJ/kg/Tag. Die tägliche Benützung eines Mobiltelefons während 5,2 Min./Tag trägt aber immer noch stärker zur Gehirndosis bei als die Exposition durch den Downlink (57 % gegenüber 29 %). Bei der Ganzkörperexposition stammt in diesem Fall knapp die Hälfte (44 %) vom Downlink. Dieser Beitrag ist ungefähr gleich gross wie der Beitrag von Mobiltelefonanrufen und Datenverkehr auf Mobiltelefonen, Computern, Laptops und Tablets zusammen (48 %). Dies zeigt, dass auch unter Worst-Case-Bedingungen bei durchschnittlicher Kommunikationsgerätenutzung ein erheblicher Teil der kumulativen Ganzkörperdosis von der eigenen Gerätenutzung stammt (52 %).

Es ist zu betonen, dass diese mittleren Dosisberechnungen mit grossen Unsicherheiten behaftet sind und im Einzelfall auch deutlich andere Ergebnisse liefern könnten. Es gibt nur wenige Daten zur typischen Sendeleistung der verschiedenen Geräte und zur Distanz zwischen dem Körper und dem Gerät in typischen Nutzungssituationen. Beides sind sehr wichtige Parameter, die individuell im Rahmen der technischen Entwicklung stark variieren können. In der Geronimo-Studie[72] wurde das Dosisberechnungsmodell weiter verfeinert und aktualisiert. Es ist aber noch nicht öffentlich zugänglich. Es gilt auch zu beachten, dass die Absorption der HF-NIS keine Aussage über mögliche nicht-thermische Effekte zulässt.

5.7 Einflussfaktoren auf die Exposition und Möglichkeiten der Minimierung

5.7.1 Faktoren, welche die Exposition durch Basisstationen beeinflussen

Die Exposition in der Umgebung einer Basisstation hängt grundsätzlich von folgenden Faktoren ab:

- Äquivalente Sendeleistung der Antenne
- Räumliches Abstrahlungsmuster der Antenne (Senderichtung/Antennendiagramm)
- Abstand zur Antenne
- Dämpfung durch Mauerwerk und Dächer (Gebäudedämpfung); Dämpfung durch Atmosphäre
- Menge der übermittelten Daten (Datenverkehr)

Sind diese Faktoren für eine konkrete Situation bekannt, lässt sich die durch eine Mobilfunkantenne an einem bestimmten Ort in der Umgebung verursachte Immission, ausgedrückt als elektrische Feldstärke in Volt pro Meter (V/m), berechnen. Für die Berechnung der Immissionen verwendet man die äquivalente Strahlungsleistung ERP (effective radiated power oder equivalent radiated power) in Watt (W). Die ERP beschreibt die in Hauptstrahlrichtung wirksame Sendeleistung, wobei die fokussierende Wirkung der Sendeantennen berücksichtigt wird. Sie ist nicht zu verwechseln mit der zugeführten Sendeleistung, welche bei Antennen mit Richtwirkung wesentlich niedriger ist als die ERP.

Je grösser die äquivalente Sendeleistung einer Anlage, desto grösser ist auch die an einem bestimmten Ort in der Umgebung erzeugte Exposition. Wird diese als elektrische Feldstärke ausgedrückt, ist die Beziehung zwischen Sendeleistung und Exposition jedoch nicht linear: Wird die Sendeleistung verdoppelt, erhöht sich die elektrische Feldstärke nur um den Faktor $\sqrt{2}$, d. h. um 41 Prozent; wird die Leistung verdreifacht, erhöht sich die elektrische Feldstärke um den Faktor $\sqrt{3}$, d. h. um 73 Prozent.

Um eine gezielte Abdeckung zu erreichen, verwendet man im Mobilfunk spezielle Antennen mit einer horizontalen und vertikalen Richtcharakteristik. Diese Antennen senden nicht gleichförmig in alle Richtungen, sondern bündeln die Funksignale und lenken diese kegelförmig in die gewünschte Hauptstrahlrichtung. Ausserhalb des Kegels ist die Strahlung zwar noch vorhanden, aber stark reduziert. Allerdings treten neben dem Hauptstrahl sogenannte «Nebenkeulen» auf,

in denen die Strahlung ebenfalls erhöht ist. Entlang der Hauptstrahlrichtung sinkt die elektrische Feldstärke bei doppeltem Abstand auf die Hälfte. Am Boden ist der Verlauf komplexer. So stammen die Immissionen im Nahbereich einer Antenne primär von den Nebenkeulen.

Treffen die Mobilfunksignale auf eine Gebäudehülle, wird ein Teil davon reflektiert und ein Teil in der Hülle absorbiert. Der restliche Teil des Mobilfunksignals im Gebäude ist daher gedämpft. Insbesondere Betonmauern und -decken sowie Metallfassaden und Isolierglasfenster dämpfen die Funksignale stark. Mauerwerk, Dächer aus Ziegel, Holz oder unbeschichtete Glasfenster dämpfen die Signale hingegen nur wenig.

Die Exposition in der Umgebung einer Mobilfunkanlage variiert im Tagesverlauf auch je nach Anzahl der übermittelten Gespräche und Daten respektive der Anzahl Nutzer. Neben Kontroll- oder Steuerkanälen, die bei 2G, 3G und 4G dauernd senden, werden zusätzliche Verkehrskanäle je nach Bedarf zugeschaltet, welche die Exposition für die Dauer der Zuschaltung erhöhen. Die Tagesgänge der Immissionen widerspiegeln das Verhalten der Nutzer von mobilen Geräten, die von der Basisstation bedient werden: Tagsüber erfolgt normalerweise ein Anstieg der Nachfrage nach Daten, entsprechend werden Verkehrskanäle zugeschaltet. In den Abendstunden ist nochmals eine Spitze zu beobachten, und in der Nacht nehmen die übermittelten Datenmengen und damit auch die Immissionen ab.

5.7.2 Minimierung der Immissionen durch Basisstationen

Eine Minimierung der Immissionen durch Basisstationen ist mittels Einflussnahme auf verschiedene Faktoren möglich:

- Sendeleistung: Die Sendeleistung einer Antenne muss so stark sein, dass die zu übermittelnden Funksignale die Endgeräte auch am Rand der Zelle noch erreichen. Sie darf aber dort nicht zu intensiv sein, weil sonst die Signale in anderen Zellen gestört würden. Eine Basisstation benötigt umso weniger Sendeleistung, je kleiner die abzudeckende Funkzelle ist, da sich die zu bedienenden Endgeräte näher an der Basisstation befinden als in einer sehr grossen Funkzelle. Allerdings braucht ein Signal mit höherer Bandbreite, etwa 100 MHz im 3,5-GHz-Band, entsprechend mehr Leistung, auch wenn nur eine kleine Zelle versorgt wird.
- Als Kriterium für die Mobilfunkversorgung wird oft nur die Abdeckungsfeldstärke herangezogen, wobei Abdeckung bedeutet, dass eine Mobilfunkverbindung grundsätzlich möglich ist. Das Kriterium der Kapazität (und damit das verfügbare Datenvolumen, das sich alle gleichzeitig aktiven Nutzenden in einer Funkzelle teilen müssen) wird oft ausser Acht gelassen, spielt für die Mobilfunkplanung jedoch eine entscheidende Rolle. Insbesondere die hohen Datenraten, die mit 5G erzielt werden sollen, sind nur mit einer Erhöhung der eingesetzten Bandbreite zu erreichen.
- Kapazität: Bei gleichbleibender Kapazität (übertragbare Datenmenge) benötigt ein dichteres Netz mit leistungsschwachen Sendern, aber gleicher Funktechnologie und Bandbreite insgesamt weniger Sendeleistung und erzeugt weniger Immissionen als ein weitmaschiges Netz mit starken Sendern.[73] Das sagt aber noch nichts über die tatsächliche Exposition aus, da diese auch davon abhängt, in welcher Distanz zu den Sendern sich eine Person aufhält.
- Bei gleichbleibender mittlerer Immission hat ein dichteres Netz mit kleineren Makrozellen (mit leistungsschwachen Sendern, aber identischer Funktechnologie und Bandbreite) insgesamt eine höhere Kapazität als ein weniger dichtes Netz mit starken Antennen.
- Abstand zur (Kleinzellen-)Antenne: In unmittelbarer Nähe von Kleinzellenantennen (d. h. zu Antennen mit einer Sendeleistung unter 6 Watt ERP) kann die Immission ähnlich gross sein wie in der Nachbarschaft einer Makrozellenanlage.[74] Es ist deshalb von Bedeutung, dass bei Kleinzellennetzen – insbesondere auch bei Indoor-Anlagen – die Antennen sorgfältig dort platziert werden, wo sich keine Menschen über längere Zeit in unmittelbarer Nähe aufhalten. Dies kann zur Folge haben, dass Kleinzellenantennen aus Netz-Sicht nicht optimal platziert werden können. In diesem Fall können sie die Versorgungsziele (Abdeckung, Kapazität etc.) nicht voll erfüllen und es sind zusätzliche Anlagen notwendig, um die Lücken zu füllen.

- Kleinzellen können netzplanerisch jedoch nur dann effizient eingesetzt werden, wenn sie sich dort befinden, wo auch die Nutzer sind, denn die Verbindung und die Datenrate des Endgeräts ist umso besser, je kürzer die Funkstrecke ist und je weniger dämpfende Hindernisse sich darin befinden.
- Datenverkehr (Aspekt Kontrollsignal): Zusätzlich liesse sich ein Teil der Immissionen reduzieren, wenn anstelle von mehreren unabhängigen Mobilfunknetzen nur noch ein Einheitsnetz betrieben würde. Insbesondere müsste die Signalisierung nur noch einmal pro Fläche erfolgen, statt für jedes Netz unabhängig. Im Falle der neuen 5G-Technologie sind diese Kontrollsignale schlanker und flexibler geworden. 5G wird daher wesentlich weniger Kontrollsignale aussenden als der Vorgängerstandard LTE.
- Neue Antennentechnologien: Heutige Antennen strahlen die für einen Nutzer zu übertragenden Signale auf die gesamte Funkzelle ab. Neue Technologien wie adaptive Antennen («smart antennas», «beam forming» etc.) erlauben es hingegen, die Signale nur noch in diejenigen Richtungen zu senden, wo diese angefordert werden. Richtungen, in denen keine Endgeräte sind, werden damit weniger exponiert. Insgesamt ist zu erwarten, dass die über die Fläche gemittelte Exposition durch adaptive Antennen (bei gleicher Datenmenge) geringer ausfällt als durch herkömmliche statische Antennen.[75]

5.7.3 Faktoren, welche die Exposition durch Endgeräte beeinflussen

Nur ein Teil der in *Kapitel 5.5.1* erwähnten Faktoren, welche die Exposition durch ein Endgerät bestimmen, weisen einen Zusammenhang mit der Netzstruktur auf. Bezüglich Netzstruktur keine Rolle spielen der maximale SAR-Wert und die Distanz des Geräts zum Körper, weshalb diese Faktoren bei den nachfolgenden Betrachtungen nicht mehr einbezogen werden.

Im Hinblick auf ein Netz, das zur Minimierung der Immissionen durch Endgeräte beiträgt, sind die Mobilfunktechnologie und die Verbindungsqualität wesentlich:

- Mobilfunktechnologie: In *Kapitel 5.5.1* ist dargelegt, dass UMTS- und LTE-Mobiltelefone ihre Leistung sehr viel effizienter regeln als GSM-Geräte und daher auch zu weniger Exposition führen.
- Für die Nutzung von 5G im 3,5-GHz-Bereich kann davon ausgegangen werden, dass ein ähnliches Verhalten wie bei LTE zu beobachten sein wird.
- Verbindungsqualität: Bei einer guten Qualität der Funkverbindung zwischen Mobilgerät und Basisstation ist die Sendeleistung des Geräts und damit auch die Exposition des Nutzers gering. Die Verbindungsqualität wird besser, je kürzer die Funkstrecke ist und je weniger dämpfende Hindernisse sich darin befinden. Die im Zusammenhang mit guter Verbindungsqualität manchmal verbreitete Aussage, «je stärker die Sendeleistung der Basisstation – desto tiefer die Sendeleistung des Endgerätes», trifft somit nicht zu, sondern es kommt einzig darauf an, wie gut ein Signal vom Mobiltelefon zur Basisstation gelangen kann.

5.7.4 Minimierung der Immissionen durch Endgeräte

Um den Akku zu schonen, ist ein Mobiltelefon bestrebt, mit möglichst tiefer Leistung zu senden. Zu diesem Zweck wird die Sendeleistung der Endgeräte von der Basisstation so geregelt, dass sie deren Signale mit genügender Qualität empfangen kann.[76] Wenn die Basisstation das Endgerät auch dann noch mit genügender Qualität empfangen soll, wenn dieses mit minimaler Leistung sendet, sollte das Endgerät also möglichst nahe bei der Basisstation sein (kurze Funkstrecke), und in der Funkstrecke sollten sich möglichst keine dämpfenden Hindernisse befinden (z. B. Gebäudehüllen oder Fahrzeugkarosserien).

Kurze Funkstrecken mit kleiner Dämpfung haben gegenüber langen Funkstrecken mit grösserer Dämpfung auch den Vorteil höherer übertragbarer Datenmengen. Dadurch wird auch die Sendedauer des Endgeräts verkürzt, was wiederum die Exposition verkleinert.

Weil die Empfängerempfindlichkeit der Basisstationen einen Einfluss auf die Sendeleistung des Endgeräts hat, könnte eine weitere Effizienzsteigerung (und damit eine zusätzliche Expositionsminderung) mit qualitativ hochwertigerer Elektronik in den Endgeräten und den Basisstationen erreicht werden.

5.7.5 Möglichkeiten der Minimierung der Exposition der Bevölkerung beim Netzausbau

Aus den vorangegangenen Überlegungen ergeben sich auch auf der Ebene der Netzstruktur und des Netzausbaus Möglichkeiten zur Minimierung der Exposition der Bevölkerung, welche von Basisstationen und Endgeräten ausgeht.

Wie oben hergeleitet, benötigen sowohl Endgeräte als auch Basisstationen umso weniger Sendeleistung, je kürzer die Funkstrecke ist und je weniger dämpfende Hindernisse sich auf dieser Funkstrecke befinden. Die Immissionen durch Mobilfunk können daher am besten minimiert werden, wenn die Signale über Glasfasernetze (oder bei rund zwei Drittel der Schweizer Haushalte und Unternehmen auch über Richtfunkstrecken) möglichst nahe an den Endkunden geführt werden und die Reststrecke durch die Luft möglichst kurz und hindernisfrei ist.

Das beste Netz für die Minimierung der Immissionen durch Mobilfunkstrahlung ist daher – zumindest unter theoretischen Betrachtungen – ein möglichst dichtes Netz mit schwachen Sendern, aber trotzdem grosser Kapazität der einzelnen Anlagen. Bei gegebener Kapazität verursachen stärker verdichtete Netze im Durchschnitt tiefere Immissionen als grosszellige Netze.

Für eine Erhöhung der Kapazität müsste die Leistung der Zellen erhöht werden oder nochmals eine weitere Verdichtung der Zellen vorgenommen werden. Aus funktechnischer Sicht ist zu beachten, dass durch eine hohe Verdichtung grössere Interferenzprobleme auftreten können, die einen negativen Einfluss auf die Kapazität der Netze haben. Dasselbe gilt auch für Leistungserhöhungen bei Makrozellen.

Damit die Sendeleistungen sowohl im Uplink als auch im Downlink tief gehalten werden können, sollten die Mobilfunksignale möglichst keine Hindernisse wie Gebäudehüllen oder Fahrzeugkarosserien durchdringen müssen. Das kann durch eine Trennung von Indoor- und Outdoor-Versorgung erreicht werden. Hier setzt die Physik gewisse Grenzen; so ist eine solche Trennung speziell für tiefe Frequenzen, die gut in Gebäude eindringen, schwierig zu erreichen, solange nicht alle Gebäudehüllen und Fenster abgeschirmt werden. Rein funktechnisch ist eine vollkommene Trennung von Indoor- und Outdoor-Versorgung nicht wünschenswert, da hiermit die Wahrscheinlichkeit eines Verbindungsabbruchs in der Übergangsregion zunimmt. Zudem ist in bestimmten Fällen eine Indoor-Versorgung von aussen bzw. eine garantierte Indoor-Versorgung unerlässlich – beispielsweise benützen Spitex-Organisationen Tablets und sind auf ein gutes Mobilfunknetz angewiesen.

Für die Trennung von Indoor- und Outdoor-Versorgung können Innenräume mit Innenantennen (Femto-, Picozellen, WLAN, Repeater) versorgt werden. Unter Umständen braucht es in jedem grösseren Raum eines Gebäudes eine entsprechende Antenne. Aufgrund der typischen Nutzungsdauer ist davon auszugehen, dass ein Grossteil der mobil zu übertragenden Daten quasistationär im Innern von Gebäuden anfällt,[77] was eine Indoor-Versorgung von Innen noch sachgerechter erscheinen lässt.

In der Schweiz gibt es etwa 2,5 Millionen Gebäude. Wenn die Mehrheit der Gebäude mit dedizierten Indoor-Anlagen versorgt werden müsste, würden sich für die Installation solcher Antennen (zum Teil in mehreren Räumen eines Gebäudes) insgesamt sehr hohe Kosten ergeben.

Insbesondere bei Indoor-Sendern macht es Sinn, diese überlegt zu platzieren (gute Abdeckung der Räume, Mindestabstand zu Personen). Denn auch leistungsschwache Sender können in geringen Distanzen die Exposition erhöhen.

Falls Gebäudefassaden oder Fahrzeugkarosserien zu überwinden sind, kann die Exposition reduziert werden, wenn die genannten Hüllen für die Mobilfunkstrahlung möglichst durchlässig sind. In Eisenbahnwagen werden hierfür seit kurzem Wärmeisolationsfenster eingesetzt, deren Metallbeschichtung in geeigneter Weise perforiert ist und die Mobilfunksignale damit weniger stark abschwächt. Für Gebäude ist dieser Ansatz weniger geeignet, da andere Gebäudestrukturen meist ohnehin weniger dämpfen als die beschichteten Gläser. Eine Laserung und damit bessere Durchlässigkeit der Scheiben bringt daher nur bei Metallfassaden oder Eisenbetonmauern mehr Signal und auch nur im ersten Raum hinter dem Fenster.

Im Weiteren können die Möglichkeiten der neuen Technologien genutzt werden, um die Immissionen zu minimieren, wie adaptive Antennen.[78] Zudem benötigen effizientere Funktechnologien weniger Energie pro übertragener Datenmenge. Deshalb sollten veraltete, ineffiziente Funkdienste wie 2G möglichst rasch durch moderne ersetzt werden.

5.8 Modellierung der Exposition durch 5G-Basisstationen und -Endgeräte

5.8.1 Vorgehen

Die vorangegangenen grundsätzlichen Überlegungen werden durch die Resultate einer Studie ergänzt, welche die mit der ETH Zürich assoziierte IT'IS Foundation im Auftrag des BAFU im Rahmen der Erarbeitung des vorliegenden Berichtes durchgeführt hat. Von dieser Untersuchung existiert ein detaillierter Bericht in englischer Sprache.[79] Nachfolgend werden einige wesentliche Punkte der Studie zusammengefasst.

Das Ziel der Studie war es, die Gesamtexposition der Bevölkerung unter 5G für verschiedene Netzstrukturen und Nutzungsszenarien zu modellieren. Durch die Ermittlung verschiedener Einflussfaktoren auf die Gesamtexposition können gezielte Massnahmen abgeleitet werden, um die Exposition der Bevölkerung durch Mobilfunk zu minimieren.

Bei der hier berechneten Gesamtexposition handelt es sich um die kombinierte Exposition durch die Mobilfunk-Basisstationen, das eigene Endgerät und die Endgeräte umstehender Nutzer. Es wurde jeweils der maximal am Körper auftretende SAR-Wert berechnet und nicht wie in *Kapitel 5.6* die kumulative Ganzkörperdosis pro 24 Stunden. Der maximale SAR-Wert ist aussagekräftig für Auswirkungen, welche erst oberhalb eines Schwellenwertes stattfinden (vgl. *Kap. 5.6.1*).

Angesichts der knappen Zeit, welche für die Studie zur Verfügung stand, waren umfangreiche Simulationen unter Einbezug von Ausbreitungs- und Expositionsmodellierungen nicht möglich. Es wurde daher ein Vorgehen nach dem Konzept der Monte-Carlo-Simulation gewählt. Da derzeit noch keine zuverlässigen Daten für das 5G-Netz im realen Betrieb vorliegen, wurde eine Extrapolation der Daten aus dem LTE-Netz durchgeführt.

Nach Angaben der Mobilfunkbetreiber ist beim 5G-Netz mit den 3,5-GHz-Frequenzen eine Übertragungsrate von 100 MBit/s überall (entspricht einer 10- bis 20-mal höheren Übertragungsrate als bei LTE) und von 3 GBit/s als Spitzenwert vorgesehen. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Studie keine absoluten Expositionsangaben liefert, sondern einen relativen Vergleich der Exposition bei den verschiedenen Szenarien von Netzstrukturen und Nutzungsverhalten. Da 5G in der Schweiz voraussichtlich mit einer hybriden Netzwerk-Topologie (Netzwerk mit Makro- und Kleinzellen) umgesetzt wird, wurde der Fokus der Studie auf den Einfluss gelegt, den der Anteil von Kleinzellen im hybriden Netz (Grad der Indoor-Versorgung) auf die Gesamtexposition hat.

5.8.2 Resultate

Im ersten Teil der Studie wurde anhand verschiedener Kopfmodelle die Exposition des Gehirns durch das eigene Mobiltelefon für Frequenzen zwischen 700 MHz und 3,6 GHz untersucht. Es zeigte sich:

- Je höher die Frequenz, desto weniger tief dringen die Felder in den Kopf ein.
- Bei Frequenzen von 3,6 GHz wird das Gehirn rund 6-mal weniger exponiert als bei Frequenzen von unter 1 GHz und rund 2-mal weniger als bei Frequenzen um 1,8 bis 2 GHz.
- Allerdings kann die Exposition von Geweben nahe bei exponierten Körperoberflächen wie Haut, Augen etc. bei Frequenzen um 3,6 GHz leicht erhöht sein.
- Der lokale Spitzenwert an der äusseren Oberfläche der grauen Substanz des Zentralnervensystems bleibt über alle Frequenzen konstant.

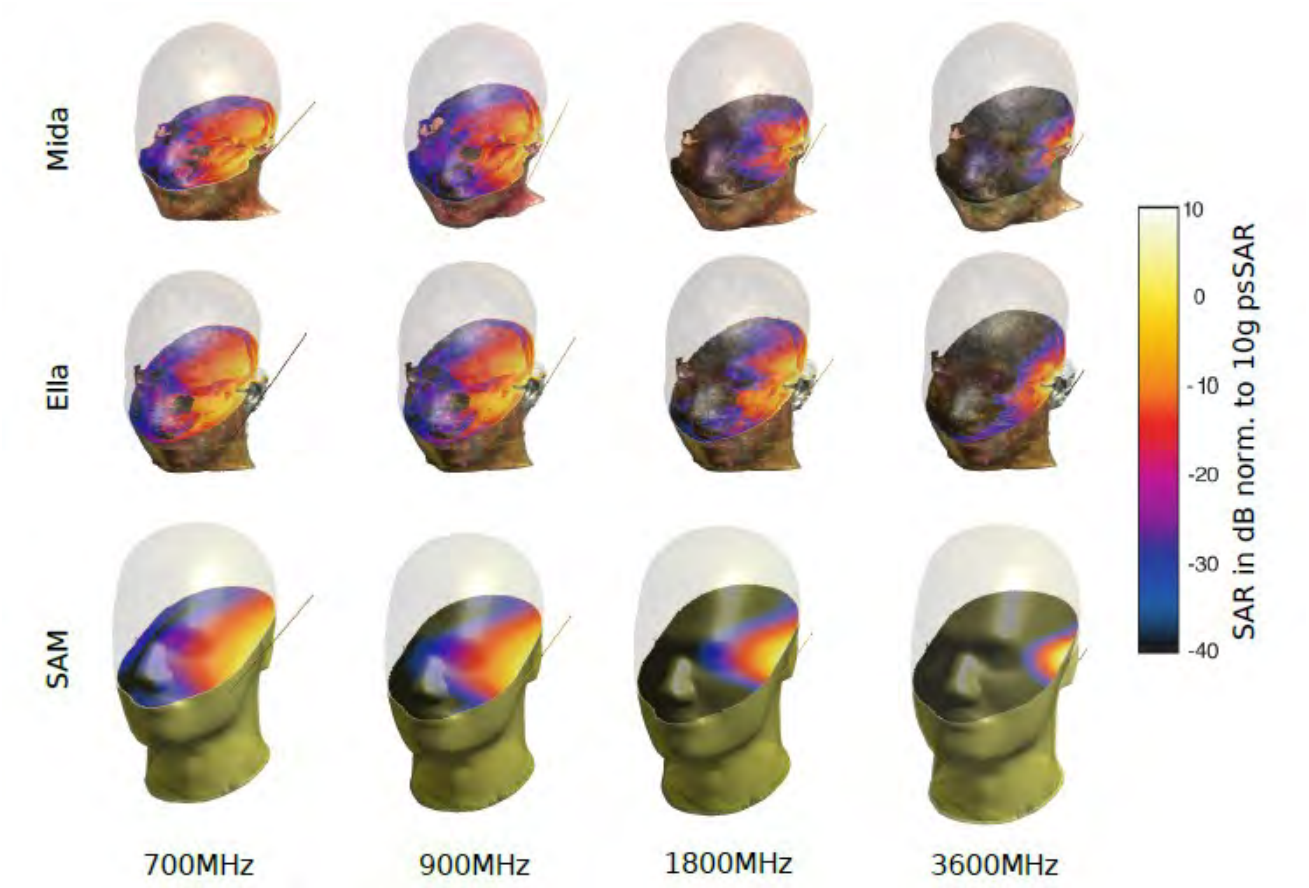

Abbildung 14: Verteilung der spezifischen Absorptionsrate SAR in verschiedenen Modellen des menschlichen Kopfes bei Frequenzen von 700 MHz bis 3,6 GHz. Die SAR ist dargestellt in dB normiert auf 10g psaSAR. Je höher die Frequenz, desto weniger tief dringen die Felder in den Kopf ein. Die oberste Reihe zeigt das MIDA-Modell, ein multimodales, detailliertes anatomisches Modell des menschlichen Kopfs und Nackens. In der mittleren Reihe ist «Ella», das Modell des Kopfes einer Frau dargestellt. Und die unterste Reihe zeigt das homogene SAM-Phantom, das auch für standardisierte SAR-Messungen herangezogen wird.

Im zweiten Teil der Studie wurde der Einfluss der Netzstruktur und des Nutzungsverhaltens auf die Gesamtexposition der Bevölkerung durch Mobilfunk untersucht. In über 200 Expositionsszenarien wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Netzwerkstrukturen (durch eine Veränderung der Zellgrössen und zusätzlicher Innenraumversorgung mittels Kleinzellen), des eigenen Nutzungsverhaltens und von Nutzern in der nahen Umgebung auf die Gesamtexposition berechnet. Dabei zeigte sich:

- Bei allen Mobilfunknutzern ist die Exposition durch das eigene Endgerät dominierend (wie bereits mit den heutigen Mobilfunkfrequenzen).
- Im Vergleich zu den Nichtnutzern ist die Exposition:
  - 4- bis 10-mal höher bei Wenig-Nutzern (100 MByte Datenupload pro Tag);
  - 20- bis 300-mal höher bei moderaten Nutzern (1 GByte Datenupload pro Tag);
  - 300- bis 10 000-mal höher bei Vielnutzern (10 GByte Datenupload pro Tag).
- Im Durchschnitt ist die Exposition bei Nichtnutzern um einen Faktor 1000 tiefer als bei Nutzern.
- Die maximale Exposition für einen Nichtnutzer wird nicht durch eine Basisstation, sondern durch das Endgerät eines sich nahe befindenden Nutzers bestimmt. Der Einfluss von umstehenden Nutzern ist im urbanen Szenario viermal höher als jener der Basisstation. Für die kumulative Ganzkörperdosis pro 24 Stunden sind aber die Immissionen der Basisstationen dominierend.

- Die Reduktion des Zellenradius führt zu einer Verringerung der Gesamtexposition der Nutzer um einen Faktor 2 bis 10. Die Nichtnutzer erfahren jedoch eine leichte Erhöhung um den Faktor 1,6 auf tiefem Expositionsniveau.
- Die zusätzliche Versorgung des Innenraums durch Kleinzellen führt für alle Nutzer zu einer Reduktion der Exposition um den Faktor 10. Die Vielnutzer erfahren sogar eine Reduktion um den Faktor 600, wenn die Innenraumabdeckung rein durch Kleinzellen erfolgt.
- Bei Nichtnutzern erhöhen zusätzliche Kleinzellen die Exposition um den Faktor 2 bis 10. Diese bleibt jedoch um den Faktor 10 bis 1000 kleiner als die Exposition der Nutzer.
- Die Gesamtexposition wird durch die höhere spektrale Effizienz der neuen Technologie bis zu einem Faktor 3 verringert.

Die Ergebnisse der Studie sind aufgrund der zur Verfügung gestandenen Netzdaten und der getroffenen Annahmen begrenzt. Nicht in die Studie miteinbezogen wurden folgende Aspekte:

- Der Effekt von adaptiven Antennen bei Basisstationen (Massive MIMO) und von Multi-User-MIMO-Systemen bei den Mobilfunkgeräten;
- alternative Datenübertragungsstrecken (z. B. Nutzung WLAN);
- Millimeterwellen (da diese in naher Zukunft in der Schweiz nicht für den Mobilfunk eingesetzt werden);
- Exposition durch andere Quellen wie WLAN, Rundfunk oder andere Funkanwendungen;
- die Reduktion der Exposition der Nichtnutzer durch eine sorgfältige Platzierung der Kleinzellenantennen im Raum oder deren Abschaltung bei Nichtgebrauch;
- modelliert wurde nur für einen, und nicht für drei Netzbetreiber;
- die Auswirkungen nicht optimaler Funkversorgung in Innenräumen.

Im Hinblick auf die Interpretation der Ergebnisse ist weiter anzumerken:

- Es handelt sich um eine Worst-Case-Betrachtung, die im Alltag selten vorkommen dürfte (95. Perzentil der Maximalbelastungen der modellierten Quellen zur selben Zeit am selben Ort).
- Das Expositionsmass lässt keine Aussagen zu Gesundheitsauswirkungen zu, weil nicht unterschieden wird, wo die Exposition am Körper stattfindet (Kopf, Torso, Extremitäten).

Die Exposition durch das eigene Mobilgerät ist stark davon abhängig, wo am Körper das Mobilgerät verwendet wird (z. B. am Kopf, in der Hand etc.). In der Studie wurde der über alle möglichen Nutzungspositionen gemittelte SAR-Wert verwendet. Es lassen sich damit keine Rückschlüsse auf die tatsächliche Belastung empfindlicher Organe wie des menschlichen Gehirns ziehen. Die Belastung durch das eigene Mobilgerät hängt zudem stark von der Distanz zum Körper während der Nutzung ab. Durch eine Vergrösserung des Abstands (z. B. durch Platzieren des Geräts auf einem Schreibtisch vor dem Nutzer) kann die Belastung um einen Faktor von deutlich mehr als 10 reduziert werden.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Studie, dass bei aktiven Mobilfunknutzern der Hauptteil der Exposition vom eigenen Mobilgerät ausgeht. Neben dem persönlichen Nutzungsverhalten ist die Gesamtexposition aber auch eng mit der Netzwerkinfrastruktur verknüpft. Im Allgemeinen wird ein Mobilfunknetz, das den Wegverlust durch kleinere Zellen und zusätzliche Indoor-Abdeckung verringert, dazu beitragen, die Gesamtexposition der Nutzer zu reduzieren. Für Nichtnutzer ergibt die zusätzliche Verdichtung jedoch eine Erhöhung der Exposition.

6 Gesundheitliche Auswirkungen

6.1 Vorbemerkungen

Im Jahr 2000 wurde die NISV entsprechend den Vorgaben des Umweltschutzgesetzes in Kraft gesetzt. Gemäss dem Umweltschutzgesetz müssen Immissionsgrenzwerte nach dem Stand der wissenschaftlichen Forschung und der Erfahrung festgelegt sein, empfindliche Bevölkerungsgruppen berücksichtigen und sicherstellen, dass die Immissionen weder schädlich sind noch das Wohlbefinden erheblich beeinträchtigen. Den Unsicherheiten bezüglich biologischer Effekte und möglicher Langzeitfolgen von NIS unterhalb des Immissionsgrenzwertes wurde mit einer vorsorglichen Emissionsbegrenzung (Anlagegrenzwert AGW) Rechnung getragen.

Als die NISV Ende der 1990er-Jahre erarbeitet wurde, gab es noch deutlich weniger Forschung zu den gesundheitlichen Auswirkungen der hochfrequenten nichtionisierenden Strahlung (HF-NIS) als heute. Im 1998 vom damaligen Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) publizierten Bericht «Begrenzung der Immissionen von nichtionisierender Strahlung»[80] wurden praktisch nur gesundheitliche Wirkungen von niederfrequenter NIS angesprochen, nicht aber von HF-NIS. 2003 wurde dann für die Schweiz der damalige Kenntnisstand zu den gesundheitlichen Auswirkungen für HF-NIS erstmals systematisch bewertet (Umwelt-Materialien Nr. 162). Als wahrscheinlich wurden damals Effekte durch die Mobiltelefonnutzung auf die Hirnströme, auf kognitive Funktionen und die Schlafphasen sowie unspezifische Symptome erachtet. Für die Expositionen durch Mobilfunkantennen oder Radiosender wurden Effekte auf die subjektive Schlafqualität und Leukämien als möglich gewertet. Ebenfalls als möglich erachtet wurden elektromagnetische Hypersensibilität und das Hirntumorrisiko im Zusammenhang mit der Mobiltelefonbenutzung. Seither wurden weltweit und in der Schweiz eine Vielzahl von Studien durchgeführt, unter anderem im Rahmen des NFP 57 (Nationales Forschungsprogramm «Nichtionisierende Strahlung – Umwelt und Gesundheit») und der von zwei Mobilfunkbetreibern und Swissgrid getragenen Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation (FSM). Damit hat sich die Datenlage zur Wirkung von HF-NIS verbessert. Trotzdem gibt es noch viele Wissenslücken, insbesondere zu Effekten, die nicht mit dem thermischen Wirkmodell erklärt werden können.

Weltweit wird der Kenntnisstand zu den gesundheitlichen Auswirkungen von HF-NIS von internationalen Expertengruppen oder Fachbehörden von Regierungen regelmässig in Übersichtsberichten festgehalten. Das BAFU hat die neuen Erkenntnisse aus der Forschung laufend in entsprechenden Fachberichten publiziert. Der letzte Bericht, Hug et al. (2014)[81], wurde 2014 für den Bericht «Zukunftstaugliche Mobilfunknetze»[82] des Bundesrates in Erfüllung der Postulate Noser (12.3580) und FDP-Liberale Fraktion (14.3149) verfasst. Dabei wurde basierend auf der Literatur, welche bis Ende Juli 2013 publiziert worden war, die Evidenz für biologische Effekte schwacher Hochfrequenzstrahlung beurteilt. Im Jahr 2014 hat das BAFU die Beratende Expertengruppe NIS (BERENIS) zur fachlichen Unterstützung einberufen. Seither sichtet BERENIS die publizierten wissenschaftlichen Arbeiten zum Thema elektromagnetische Felder und wählt diejenigen zur detaillierten Bewertung aus, die aus ihrer Sicht für den Schutz des Menschen von Bedeutung sind oder sein könnten, wodurch bewusst ein Selektionsbias entsteht. Die Bewertung der Ergebnisse wissenschaftlicher Studien dient der Früherkennung potenzieller Risiken. Es soll möglichst kein Hinweis auf eine mögliche Schädlichkeit, der ein Handeln erfordern würde, übersehen werden. Die entsprechenden Evaluationen werden vierteljährlich als Newsletter publiziert.

6.2 Ziele und Vorgehen

Für den vorliegenden Bericht wurde bezüglich der gesundheitlichen Auswirkungen das folgende Ziel definiert: Aufzeigen des Stands der Forschung zu den Wirkungen von hochfrequenter Strahlung auf den Menschen, ausgehend vom Stand im Bericht Hug et al. (2014) mit Ergänzung und Diskussion der seither neu publizierten relevanten Studien.

Die Hauptfragestellung ist dabei, ob es im Hinblick auf das Vorsorgeprinzip Hinweise oder gesicherte Erkenntnisse für Effekte unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte (bzw. der Immissionsgrenzwerte der NISV) gibt. Ausgangspunkt bildete der Bericht Hug et al. (2014), «Beurteilung der Evidenz für biologische Effekte schwacher Hochfrequenzstrahlung», dessen Ergebnisse im *Kapitel 6.4* zusammengefasst sind. Die als wichtig beurteilten, seither publizierten Originalarbeiten wurden spezifisch aufgearbeitet und bezüglich Exposition und Gesundheitsauswirkungen dargestellt. Diese Publikationen sind in erster Linie anhand der BERENIS-Newsletter identifiziert worden. Zusätzlich wurden die neueren internationalen

Übersichtsberichte dargestellt. Schliesslich wurden die Evidenz bzw. die Veränderung der Evidenz seit 2013 beurteilt. Die Beurteilung der Evidenz erfolgt nach der international etablierten EFHRAN-Klassifizierung, die auf dem Bewertungsschema der «International Agency for Research on Cancer» (IARC) basiert und auch dem Bericht Hug et al. (2014) zugrunde lag. Diese Klassifizierung bezieht sich nicht nur auf das Krebsrisiko, sondern auch auf andere gesundheitliche oder physiologische Zielgrössen und lässt sich so breiter anwenden. Die Klassifizierung der Evidenz richtet sich nach den vier Stufen «ausreichend», «begrenzt», «unzureichend» und «Evidenz für Abwesenheit» (*Tabelle 15*).

Die Einschätzung der Evidenz wurde in der Untergruppe 3 im Konsensverfahren durchgeführt. Dabei wurde für jeden betrachteten Effekt die Datenlage mit der Definition der Evidenzklassierung abgeglichen. Bei Einigkeit innerhalb der Gruppe ist die entsprechende Evidenzklasse dargestellt. Bei Uneinigkeit ist die Bandbreite dargestellt, und die Argumente für die unterschiedlichen Einschätzungen werden transparent aufgelistet. Zudem wurde evaluiert, ob Aussagen gemacht werden können, ab welcher Exposition entsprechende Effekte auftreten.

Es ist zu betonen, dass es sich bei diesem Bericht nicht um einen systematischen wissenschaftlichen Übersichtsbericht im Sinne einer Cochrane-Review[83] handelt, sondern um eine Zusammenstellung von Fakten zu den Auswirkungen auf die Gesundheit. Von der Vielzahl veröffentlichter Publikationen werden dabei nur die für die Fragestellung aussagekräftigsten und relevantesten berücksichtigt. Hinsichtlich eventueller gesundheitlicher Wirkungen der 5G-Funktechnologie gibt es keine abgeschlossenen wissenschaftlichen Studien. Die Risikoabschätzung der Arbeitsgruppe hat sich deshalb auf Studien abgestützt, die in der Vergangenheit zur 2G-, 3G- und 4G-Technolgie durchgeführt wurden und mit Frequenzen arbeiten, die im selben Bereich liegen, wie diejenigen Frequenzen, die gegenwärtig für 5G genutzt werden.

Tabelle 15: Das vierstufige Bewertungsschema der EFHRAN

Klassifizierung	Notwendige Kriterien
Ausreichende Evidenz	· Es wurde ein positiver Zusammenhang zwischen Exposition und Effekt beobachtet. · Der Effekt wurde in mehreren Studien von unabhängigen Forschern oder mit verschiedenen Untersuchungsprotokollen bestätigt, und es besteht eine übereinstimmende Expositions-Wirkungsbeziehung. · Andere Einflussfaktoren (Confounder) können mit zufriedenstellender Sicherheit ausgeschlossen werden.
Begrenzte Evidenz	· Die Evidenz für den Effekt beruht nur auf wenigen Studien, oder es bestehen ungeklärte Fragen hinsichtlich Studiendesign, Durchführung oder Interpretation der Studien. · Andere Einflussfaktoren können in den vorliegenden Studien nicht mit zufriedenstellender Sicherheit ausgeschlossen werden.
Unzureichende Evidenz	· Die Qualität, Übereinstimmung oder statistische Aussagekraft der vorliegenden Studien lässt keine eindeutigen Schlussfolgerungen zu.
Evidenz für Abwesenheit	· In mehreren Studien wurden von unabhängigen Forschern mit unterschiedlichen Untersuchungsprotokollen an mindestens zwei Spezies oder zwei Zelltypen und bezogen auf einen ausreichenden Bereich von Feldintensitäten keine Effekte beobachtet.

6.3 Methodische Aspekte

Idealerweise wird die Wirkung von HF-NIS auf den Menschen basierend auf einer systematischen Literaturübersicht eingeschätzt. Eine solche systematische Übersichtsarbeit wird zurzeit von der WHO durchgeführt. In diesen Prozess sind rund 20 Wissenschaftler aus verschiedenen Disziplinen involviert. Die Arbeit dauert nun bereits mehr als fünf Jahre. Als Nächstes sind systematische Literaturreviews zu den Aspekten Krebs, Fortpflanzung, kognitive Beeinträchtigungen und unspezifische Beschwerden vorgesehen. Die WHO rechnet mit einem weiteren Zeitbedarf von rund einem Jahr, falls die

Finanzierung gesichert ist. Angesichts dieses Aufwands ist demnach klar und zu betonen, dass es unmöglich ist, im Rahmen der vorliegenden Berichterstattung einen solchen systematischen Ansatz zu verfolgen.

Der Stand des Wissens wurde auf zwei Arten zusammengetragen:

- durch eine Zusammenstellung der Aussagen wichtiger internationaler Expertengremien über gesundheitliche Effekte (insgesamt sieben Fachberichte);
- durch eine Zusammenstellung der im Zeitraum von 2013 bis 2018 wichtigsten publizierten Originalstudien. Dabei wurden hauptsächlich Studien ausgewählt, welche durch BERENIS als relevant ausgewählt und in einem der bisherigen 16 Newsletter bewertet wurden. Diese Auswahl wurde durch separate Literatursuchen und Expertenwissen ergänzt.

6.3.1 Originalstudien

Insgesamt hat die BERENIS 1757 Publikationen gesichtet, die zwischen dem 1. Januar 2014 und Ende November 2018 erschienen sind. Diese Publikationen behandeln den ganzen Frequenzbereich von statischen, niederfrequenten elektrischen oder magnetischen Feldern bis zu HF-NIS. Von allen gesichteten Studien wurden 189 Publikationen detailliert diskutiert, und schliesslich wurden 83 Publikationen in einem Newsletter zusammengefasst und bewertet. Daraus wurden für den vorliegenden Bericht jene Studien ausgewählt, die folgende Bedingungen möglichst gut erfüllen:

- relevant für die Gesundheit oder das Wohlbefinden von Menschen;
- informativ für die Herleitung von Expositions-Wirkungsbeziehungen von hochfrequenter NIS in der Umwelt;
- wichtig für das Verständnis von biologischen Wirkungsmechanismen;
- hohe wissenschaftliche Qualität.

Zusätzlich wurde anhand von separaten Literatursuchen und Expertenwissen überprüft, ob wichtige Studien fehlen.

Studien zur Bevölkerungsexposition ohne Untersuchung möglicher Gesundheitseffekte haben bei der Arbeit von BERENIS bisher keine Priorität. Solche Daten sind aber wichtig, um die reale Belastung der Bevölkerung durch Basisstationen und Endgeräte gegenwärtig und soweit möglich in Zukunft mit 5G aufzuzeigen. Entsprechende Studien wurden in einer separaten Literatursuche identifiziert. Da der vorliegende Bericht auf eine Evaluierung der realen HF-NIS-Exposition der Schweizer Bevölkerung zielt, wurde der Schwerpunkt der Literatursuche auf Studien zur Expositionssituation in der Schweiz gelegt. Internationale Messstudien mit Schweizer Beteiligung sind informativ für einen Vergleich der Exposition in der Schweiz mit dem Ausland. Die Ergebnisse der Literatursuche zur Exposition sind in den *Kapiteln 5.4 bis 5.6* zusammengefasst.

6.3.2 Internationale Expertenberichte

Es wurden die Risikoeinschätzungen zu HF-NIS von sieben Expertengruppierungen berücksichtigt. Die Berichte dieser Gruppierungen wurden durch folgende Institutionen veröffentlicht: SCENIHR (Expertenkommission der Europäischen Union, veröffentlicht 2015)[84], SSM (Schweden, 2018)[85], ARPANSA (Australien, 2014)[86], Anses (Frankreich, zwei Berichte 2016 und 2018)[87], ICNIRP (international, 2018)[88], TAB (Deutschland, 2017)[89].

Der ARPANSA-Report ist keine systematische Literaturanalyse, sondern eine summarische Bewertung der Literatur durch drei von der Regierung bestimmte Experten, welche den Zeitraum von 2002 bis August 2012 umfasst. Der SSM-Bericht ist die neueste Ausgabe von regelmässig erscheinenden Literatur-Updates, in denen wichtige Erkenntnisfortschritte diskutiert werden. Diese Übersichtsberichte dienten bei der Literatursuche ab 2014 als Kontrolle, um zu überprüfen, dass keine wichtigen Studien fehlen. Ein Bericht der Anses bezieht sich ausschliesslich auf Kinder (2016)[90], und ein weiterer behandelt ausschliesslich elektromagnetische Hypersensibilität (2018)[91]. Der TAB-Bericht ist noch nicht offiziell publiziert, seine Inhalte (nicht-systematische Literaturanalyse bis Ende 2017) waren der Arbeitsgruppe jedoch zugänglich.

Die in den Berichten aufgeführten wissenschaftlichen Evidenzen bzw. Einschätzungen der Experten zu den hier interessierenden Endpunkten (Gesundheitseffekte) wurden tabellarisch gelistet, um sie mit den Beurteilungen aus dem Bericht Hug et al. (2014) zu vergleichen. Die internationalen Expertenberichte von SCENIHR und ARPANSA waren in den Bericht Hug et al. (2014) ebenfalls bereits eingeflossen.

6.4 Zusammenfassung des Kenntnisstandes 2014

Im Jahr 2014 wurde der wissenschaftliche Kenntnisstand über biologische Auswirkungen von Hochfrequenzstrahlung niedriger Intensität in einem ausführlichen Bericht zusammengefasst (Hug et al., 2014). Dabei wurden Resultate von Studien an Menschen, Tieren und Zellkulturen berücksichtigt, und sowohl Felder von Basisstationen oder anderen Sendeanlagen als auch solche von Geräten wie Mobiltelefonen einbezogen. Ein besonderes Augenmerk lag auf Schlüsselbefunden zu Effekten, die im Vorsorgebereich der Umweltschutzgesetzgebung lagen, weil sie unterhalb der Immissionsgrenzwerte auftraten, die zum Schutz vor den anerkannten thermischen Auswirkungen festgelegt worden waren. Der Bericht schloss Publikationen bis Ende Juli 2013 ein.

Als Ausgangslage für diesen Bericht wurde die gesundheitliche Bewertung im Bericht Hug et al. (2014) verwendet, die im Folgenden dargestellt wird (s. auch *Tabelle* **16**):

- *Risiko von Tumoren im Kopfbereich: begrenzte Evidenz.* Im Jahr 2011 stufte die internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) hochfrequente Strahlung als möglicherweise krebserregend für den Menschen ein. Epidemiologische Studien weisen auf ein erhöhtes Risiko für Gliome und Akustikusneurinome hin, wobei eine Entstehung durch Zufall oder methodische Mängel der Studien nicht mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden können. Die Ergebnisse neuer epidemiologischer Studien zum Zusammenhang zwischen Mobiltelefonnutzung und Tumorentwicklung im Kopfbereich sind uneinheitlich, jedoch finden sich vereinzelte Hinweise auf ein erhöhtes Risiko. Wegen der noch bestehenden Wissenslücken, vor allem bezüglich langsam wachsender Tumoren und der unzureichenden Datenlage zum Risiko von Langzeitbenutzern lässt sich die Frage nach allfälligen Zusammenhängen mit dem Hirntumorrisiko noch nicht abschliessend beantworten. Dies auch deshalb, weil sich das Nutzerverhalten (während früher einzelne Gespräche geführt wurden, gibt es heute Anwender, die fast ständig mit funkbasierenden Geräten online sind und dadurch einer höheren Dosis ausgesetzt sind) und die benutzten Geräte (andere Abstrahl-charakteristik und Modulation) in den letzten 20 Jahren stark geändert haben.
- *Auswirkungen auf das Verhalten von Kindern und Jugendlichen: unzureichende Evidenz.* Es liegen vereinzelte Hinweise für Auswirkungen der prä- oder postnatalen Hochfrequenzexposition auf das Verhalten vor. Es handelt sich lediglich um Einzelbefunde, weil jede der Studien eine andere Exposition untersucht hat (Handybenutzung der Kinder, der schwangeren Mütter oder ortsfeste Sendeanlagen). In einer qualitativ guten Studie wurden die Effekte der Exposition durch ortsfeste Sendeanlagen untersucht. Für Kinder ergab sich kein Zusammenhang zwischen Expositionsniveau und Verhaltensauffälligkeiten. Dagegen hatten Jugendliche, die zum obersten Expositionsviertel gehörten, statistisch signifikant häufiger Auffälligkeiten bezüglich Benehmen und Hyperaktivität als weniger stark Exponierte, wobei andere Einflussfaktoren auf das Resultat im Einzelfall nicht ausgeschlossen werden können.
- *Unspezifische Beschwerden und elektromagnetische Hypersensibilität: unzureichende Evidenz.* Rund 5 Prozent der Schweizer Bevölkerung bezeichnen sich als elektrosensibel. Diese Personen führen Befindlichkeits- und Gesundheitsstörungen subjektiv auf die Belastung durch elektromagnetische Felder in ihrem Wohn- oder Arbeitsumfeld zurück. Experimentelle Doppelblindstudien ergaben starke Evidenz gegen die Auslösung unspezifischer Beschwerden durch kurzfristige Hochfrequenzexpositionen. Mangels gezielter Untersuchungen mit wiederholten Tests lässt sich jedoch bisher nicht gänzlich ausschliessen, dass einzelne Menschen besonders empfindlich auf die Belastung reagieren könnten. Für langfristige Hochfrequenzbelastungen ist bisher ebenfalls kein Zusammenhang mit unspezifischen Beschwerden nachgewiesen. Allerdings ist die Aussagekraft der Studien zur Langzeitbelastung eingeschränkt, weil es sich mehrheitlich um Querschnittsanalysen handelte und die Expositionsunterschiede sehr gering waren.
- *Auswirkungen auf die Fruchtbarkeit: begrenzte Evidenz.* Studien haben negative Auswirkungen auf verschiedene Parameter der Qualität von Spermien festgestellt, die in vitro einer Hochfrequenzstrahlung ausgesetzt wurden.

Auch aus Tierexperimenten gibt es Hinweise auf Veränderungen von Spermien nach Mobilfunkexpositionen. In vivo durchgeführte Humanstudien, die ebenfalls relativ einheitlich negative Effekte auf die Spermienqualität zeigten, wurden aufgrund methodischer Limitierungen als wenig aussagekräftig beurteilt.

- *Auswirkungen auf Hirnströme: ausreichende Evidenz.* Eine Reihe von experimentellen Humanstudien mit guter Qualität kommt zum Ergebnis, dass die Hochfrequenzexposition durch ein Mobiltelefon am Kopf die Hirnströme sowohl im wachen Ruhezustand als auch während des Schlafes beeinflusst. Es bestehen Hinweise auf modulationsspezifische Effekte, die auf einen nicht-thermischen Wirkungsmechanismus hindeuten. Diese Wirkungen sind nicht mit dem thermischen Wirkungsmodell erklärbar. Interindividuelle Variabilität der Effekte weist darauf hin, dass es Unterschiede in der Empfindlichkeit gegenüber Hochfrequenzstrahlung gibt. Die Signalcharakteristik, d. h. die Spezifität der Pulsmodulation, scheint für die Auslösung des Effektes nicht entscheidend zu sein. Pulsmodulierte Signale mit einer Modulationsfrequenz im Bereich biologisch relevanter Rhythmen scheinen zu genügen. Die physiologischen Effekte unterhalb der thermischen Schwelle der vorliegenden Studienlage wirken sich nicht auf die kognitive Leistungsfähigkeit oder die Schlafqualität aus. Ihre Bedeutung für die Gesundheit ist unklar.
- *Auswirkungen auf Durchblutung und Stoffwechsel des Gehirns: begrenzte Evidenz.* Eine Mehrheit der Studien wies auf Effekte der GSM-Mobiltelefonexposition hin, wobei das Reaktionsmuster nicht einheitlich war. In einer Studie wurde ein Anstieg der Durchblutung beobachtet, während in anderen Studien ein Rückgang oder Veränderungen in beide Richtungen für verschiedene Hirnregionen beschrieben wurden. Insgesamt ist die Evidenz schwächer als bei Veränderungen der Hirnströme. Es bestehen Hinweise auf modulationsspezifische Effekte, die auf einen nicht-thermischen Wirkungsmechanismus hindeuten. Die Bedeutung der beobachteten Veränderungen für die Gesundheit ist unklar.
- *Karzinogenese und Ko-Karzinogenese: begrenzte Evidenz.* Langzeitstudien mit Hochfrequenzexposition von Mäusen oder Ratten ergaben insgesamt keine Evidenz für eine Zunahme von Neuerkrankungen an Tumoren. Hingegen ergaben verschiedene Studien in Tiermodellen zur Ko-Karzinogenese eine Zunahme oder Beschleunigung des Tumorwachstums bei exponierten Versuchstieren – d. h. bei Tieren mit genetischen Defekten, die das Risiko einer Tumorerkrankung erhöhen, oder bei Tieren, die zusätzlich zur Hochfrequenzexposition auch einer bekanntermassen krebserregenden Behandlung ausgesetzt wurden. Da auch Menschen in ihrer Alltagsumgebung häufig mehreren potenziell schädlichen Belastungen gleichzeitig ausgesetzt sind, haben diese Experimente für die Risikoabschätzung ein hohes Gewicht. Die Expertengruppe der IARC bewertete deshalb bei ihrer Beurteilung des Krebsrisikos im Jahr 2011 die Gesamtevidenz der Hochfrequenzstrahlung bei Tieren als «begrenzt».
- *Blut-Hirn-Schranke: unzureichende Evidenz.* In mehreren Tierexperimenten, die aus verschiedenen Gründen allerdings wenig aussagekräftig sind, wurde eine verstärkte Durchlässigkeit der Blut-Hirn-Schranke durch Hochfrequenzbelastung beobachtet. Die zahlreichen Replikationsversuche ergaben überwiegend keine Effekte bzw. eine sehr schwache Evidenz.
- *Effekte auf die genetische Stabilität: unzureichende bzw. begrenzte Evidenz.* Die Datenlage ist aufgrund der unterschiedlichen Qualität und Versuchsanordnungen der Zellstudien generell sehr heterogen. Die Evidenz für direkte DNS-schädigende Effekte der Hochfrequenzexposition wird kontrovers diskutiert. Dagegen wurde bei der Ko-Exposition mit bekannten gentoxischen Substanzen beobachtet, dass die DNS-schädigende Wirkung eines Mutagens infolge der Exposition verstärkt wird. Ausserdem weisen Studien auf eine Störung der Chromosomenteilung hin.
- *Zellvermehrung (Proliferation): unzureichende Evidenz.* Verschiedene Studien ergaben Hinweise darauf, dass hochfrequente Felder die Zellvermehrung beeinflussen können. Die Datenlage ist jedoch nicht eindeutig, und es ist noch unklar, wie diese an kultivierten Krebszellen beobachteten Effekte auf normale Zellen im Verbund von menschlichem Gewebe übertragbar sind.
- *Programmierter Zelltod (Apoptose): begrenzte Evidenz.* In mehreren neueren Studien an verschiedenen menschlichen Zelllinien und Säugetierzellen wurden erhöhte Zelltod-Raten beobachtet.
- *Reaktive Sauerstoffspezies (oxidativer Stress): begrenzte Evidenz.* In einigen Zellstudien wurde beobachtet, dass Hochfrequenzstrahlung die Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies (ROS) verstärkte, die wiederum zu Zell- oder Erbgutschädigung führen können.

- *Gen- und Proteinexpression: begrenzte Evidenz.* Zur Expression von Hitzeschockproteinen bei Hochfrequenzexposition liegen sowohl positive wie negative Studien vor. Auch für andere Proteine ist die Datenlage noch unklar. Da sich viele Arbeiten auf das Beschreiben von Unterschieden beschränken, ohne eine nachträgliche funktionelle Validierung, bleibt die Bedeutung von beobachteten Veränderungen unklar.
- *Molekulare und biophysikalische Wechselwirkungsmechanismen:* Die ICNIRP-Grenzwerte, welche für die Immissionsgrenzwerte in der Schweiz übernommen wurden, schützen vor thermischen Wirkungen. Die beobachteten Effekte unterhalb der Grenzwerte werden entsprechend als nicht-thermische Effekte bezeichnet. Diese Unterscheidung in thermische und nicht-thermische Wirkung kann irreführend sein, weil auch unterhalb der Immissionsgrenzwerte mikrothermische Prozesse Effekte verursachen können. In Humanstudien zur Gehirnphysiologie, aber auch bei gentoxischen Effekten (in vitro) wurden mehrfach modulationsspezifische Effekte gefunden, die zeigen, dass nicht nur der Energieeintrag, sondern auch die Charakteristik des Expositionssignals eine Rolle spielt. Dies und auch die Tatsache, dass die Modulation keinen Einfluss auf die absorbierte Energie und somit auf einen thermischen Einfluss hat, sind deutliche Hinweise auf nicht-thermische biophysikalische Effekte, für die es jedoch noch kein Wirkungsmodell gibt. Für viele der diskutierten biophysikalischen Wirkungsmechanismen ist es eher unwahrscheinlich, dass sie unterhalb der thermischen Schwelle einen relevanten Einfluss auf biologische Systeme ausüben können, jedoch sind wohl noch nicht alle relevanten Interaktionsmechanismen zwischen schwachen elektromagnetischen Feldern mit unterschiedlichen Signalcharakteristiken und biologischen Strukturen entdeckt worden. Sporadische Beobachtungen deuten auf biologische Effekte der Hochfrequenzexposition hin, die sich nicht mit klassischen radiobiologischen Modellen erklären lassen. Für mögliche molekulare Mechanismen oder Feldeffekte eine eindeutige experimentelle Bestätigung zu erbringen, ist schwierig.

Im Bericht Hug et al. (2014) wurde festgehalten, dass die Sicherheitsfaktoren bei der Grenzwertsetzung in bestimmten ungünstigen Situationen überschätzt werden. Aufgrund des Auftretens von modulationsspezifischen Wirkungen wäre ein besseres Verständnis der biophysikalischen und biologischen Mechanismen erforderlich. Dieses Wissen würde die Unsicherheiten reduzieren, die bezüglich der möglichen Auswirkungen von hochfrequenter Strahlung auf die Gesundheit, insbesondere im Niedrigdosisbereich und bei langfristigen Expositionen, noch bestehen.

6.5 Internationale Expertenberichte seit 2014

Im Folgenden sind für Überblickszwecke, basierend auf den Endpunkten des Berichts von Hug et al. (2014) mit kleinen Erweiterungen, die Evidenzkategorien der verschiedenen Berichte dargestellt, welche seit 2014 publiziert wurden (*Tabelle 16*). Einige der Expertenberichte haben keine formale Evidenzbewertung durchgeführt, und die Evidenzklassierung erfolgte durch Abgleich der Texte mit den entsprechenden Evidenzkategorien. Einige Berichte haben eine fünfstufige Klassierung verwendet, bei welcher die Klassierung «unzureichend» in «schwach» und «offen» unterteilt wurde. Letzteres bezieht sich auf Endpunkte, bei denen es zu wenige Studien gibt, um Aussagen machen zu können. Die Expertenberichte sind zwischen 2014 und 2018 publiziert worden und haben deshalb ganz neue Studienresultate nicht berücksichtigt, welche in den vorliegenden Bericht eingeflossen sind.

Tabelle 16: Überblick über die Evidenzlage von Expertenberichten, welche seit 2014 publiziert wurden

Endpunkt	Hug et al., 2014	SCENIHR	SSM	ARPANSA	Anses-Kids	ICNIRP	TAB
Tumoren im Kopfbereich (Handy)	B	B	U	B	O	U	U
Krebs (Anlagen)	U	N	--	U	--	U	U
Verhalten bei Kindern und Jugendlichen	U	U	O	O	O	O	U
Befinden und Symptome (chronisch)	U	N	N	O U	O	N	N
Befinden und Symptome (akut)	N	N	N	O U	U	N	N
Fertilität	B	N	O	O	O	U	U
Hirnströme	A	A	B	B	--	A	A
Durchblutung und Stoffwechsel Gehirn	B	--	--	--	--	U	--
Ko-Karzinogenese im Tierversuch	B	O	--	--	--	U	U
Blut-Hirn-Schranke	U	U	O	--	--	?	N
DNS-Schädigung (direkt)	U	U	U	--	O	U	U
DNS-Schädigung (Ko-Exposition)	B	U	U	--	O	U	U
Zellproliferation	U	U	U	--	O	U	U
Apoptose	B	U	U	--	O	U	U
Oxidativer Stress	B	U	U	--	O	U	U
Gen- und Proteinexpression	B	U	U	--	O	U	U
Entwicklung, Schwangerschaft	--	U	U	--	O	O	U
Kognition	--	U	U	--	B	B	U

Die Evidenzkategorien sind mit einem Farbschlüssel und Buchstaben wie folgt codiert:

	Hug / TAB		Andere Berichte
A	Ausreichend	A	Ausreichend
B	Begrenzt	B	Begrenzt
U	Unzureichend	U	Schwach
		O	Offen
N	Abwesenheit	N	Abwesenheit
--	Keine Aussage	--	Keine Aussage

Neben den in *Tabelle 16* aufgelisteten Expertenberichten hat die französische Umweltbehörde Anses mit 16 französischen Experten die von April 2009 bis Juli 2016 veröffentlichte Literatur zum Thema Elektrohypersensibilität (EHS) evaluiert.[92] Die 16-köpfige Expertengruppe stellte fest, dass die Studienlage insgesamt mit grossen methodischen Defiziten behaftet ist. Insbesondere die Rekrutierung sei sehr heterogen, da es keine objektiven und allgemeingültigen Kriterien für die Charakterisierung von EHS-Patienten gibt. Ebenso heterogen sei die Erhebung der Symptome und der Quellen.

Erhebungen zur Häufigkeit von EHS werden entsprechend mit Vorbehalt bewertet, die Studienlage der letzten Jahre lasse etwa 5 Prozent annehmen, insbesondere nicht zunehmend. Dass experimentelle Provokationstests negativ ausgefallen seien, könne heissen, dass es keinen Zusammenhang gibt, es könnte aber auch sein, dass die methodischen Defizite der Studien – vor allem bei der Rekrutierung – der Grund sind, warum ein tatsächlich vorhandener Zusammenhang verkannt werden könne. Auch wäre es möglich, dass sich die Effekte nur unter bestimmten Bedingungen oder Expositionssituationen manifestieren, welche bisher noch nicht verstanden werden. Der wissenschaftlich wiederholt beschriebene Nocebo-Effekt[93] begünstige die Persistenz der Beschwerden und schliesse eine NIS-Quelle als Auslöser nicht aus. Aufgrund der Studienlage dürfe ausgesagt werden, dass EHS-Patienten ein weniger gutes Wohlbefinden haben und depressiver und ängstlicher sind als ein Vergleichskollektiv, wobei chronische und seltene Krankheiten typischerweise mit erhöhter Ängstlichkeit und Depression einhergehen. Ob Veränderungen in der Exposition etwas am Gesundheitszustand der Betroffenen änderten, sei unklar. Strahlenfreie Zonen und Räume seien so gesehen wissenschaftlich nicht gerechtfertigt.

6.6 Evidenzbewertung anhand neuer Studien

Ziel der Evidenzbewertung ist das Aufzeigen des Forschungsstandes zu den Wirkungen von hochfrequenter Strahlung auf den Menschen. Die Hauptfragestellung ist dabei, ob es im Hinblick auf das Vorsorgeprinzip Hinweise oder gesicherte Erkenntnisse für Effekte unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte (bzw. Immissionsgrenzwerte der NISV) gibt.

Die Evaluation der wissenschaftlichen Literatur seit 2014 ergab unter Berücksichtigung der publizierten Expertenberichte die folgende Evidenzbewertung für verschiedene mögliche Effekte von NIS:

- *Tumoren durch langfristige Mobiltelefonnutzung:* Die Resultate von neuen epidemiologischen Studien zu bösartigen Hirntumoren sind uneinheitlich. Eine prospektive Kohortenstudie findet einen negativen Zusammenhang zwischen Mobiltelefonnutzung und Gliomen, während zwei Fall-Kontrollstudien für die stärksten Mobiltelefonnutzer ein erhöhtes Risiko beobachten. Da Risiken in der Grössenordnung, wie sie in den beiden Fall-Kontrollstudien beobachtet wurden, sich auch in einem Anstieg der Hirntumorerkrankungen äussern müssten, wurden Trends in den Erkrankungsraten in mehreren Ländern untersucht. Diese Studien finden keine Hinweise, dass die Inzidenz der Tumoren mit einer gewissen Verzögerung ansteigt, nachdem die Mehrheit der Bevölkerung in den entsprechenden Ländern begonnen hat, Mobiltelefone zu benützen. Das deutet darauf hin, dass zumindest die in einigen Fall-Kontrollstudien beobachteten stark erhöhten Risiken wahrscheinlich methodisch bedingt sind und auf eine systematische Überschätzung der Telefonnutzungsdauer von Hirntumorpatienten im Vergleich zu gesunden Kontrollpersonen zurückzuführen sind.
- Seit 2014 sind zwei grosse Tierstudien erschienen, welche Hinweise auf karzinogene Wirkungen bei HF-NIS-Exposition fanden (NTP und Ramazzini). Jedoch gibt es wie bei allen Tierversuchen Unsicherheiten bei der Übertragung der Resultate auf den Menschen und die alltägliche HF-NIS-Expositionssituation. Resultate von Tierversuchen spielen jedoch für die Klassierung des Krebsrisikos durch die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) eine wichtige Rolle.
- Im Vergleich zum Kenntnisstand im Jahr 2014 sprechen nach Meinung einiger Mitglieder der Arbeitsgruppe die neuen Tierstudien eher für eine Zunahme der Evidenz, nach Meinung anderer sind die Ergebnisse zu wenig robust für eine solche Aussage. Die konstanten Erkrankungsraten in mehreren Krebsregistern deuten eher auf eine Abnahme der Evidenz hin. Insgesamt wird deshalb die Evidenz weiterhin als begrenzt beurteilt. Das heisst, dass ungeklärte Fragen hinsichtlich des Studiendesigns, der Durchführung oder der Interpretation der Studien bestehen, und andere Einflussfaktoren nicht mit zufriedenstellender Sicherheit ausgeschlossen werden können.
- *Tumoren durch Sendeanlagen:* Zu dieser Fragestellung gibt es immer noch sehr wenige Studien. Eine 2014 veröffentlichte Studie fand für alle in der Schweiz zwischen 1985 und 2008 diagnostizierten Kinderkrebsfälle keinen Zusammenhang mit der Exposition durch TV- und Radiosender. Eine der oben erwähnten Tierstudien fand bei männlichen Ratten eine Zunahme von Herz-Schwannomen bei lebenslanger Exposition im Bereich der Immissionsgrenzwerte (50 V/m). Die Evidenz wird wie 2014 als unzureichend eingeschätzt.

- *Ko-Karzinogenese im Tierversuch:* Eine 2015 publizierte Studie konnte frühere Resultate bestätigen, wonach die gleichzeitige Exposition von HF-NIS mit einer erwiesenermassen krebserregenden Substanz zu schnellerem Tumorwachstum führt als mit der krebserregenden Substanz allein. Die Tatsache, dass es gelungen ist, diese Tumorpromotion zu replizieren, könnte als Argument für eine Heraufstufung der Evidenz von begrenzt zu ausreichend verwendet werden. Jedoch sprechen die fehlende Expositions-Wirkungsbeziehung und methodische Limitierungen in der Studie gegen eine solche Heraufstufung. Experimente zur Ko-Karzinogenese sind prinzipiell relevant, da auch Menschen in ihrer Alltagsumgebung häufig mehreren potenziell schädlichen Belastungen ausgesetzt sind. Eine Kohortenstudie zur Überlebenswahrscheinlichkeit von 806 Gliom-Patienten in Abhängigkeit von ihrem Mobiltelefongebrauch fand jedoch keine Hinweise auf eine tumorpromovierende Wirkung. Insgesamt wird deshalb die Evidenz als begrenzt gewertet.
- *Befinden und Symptome durch Alltagsexposition wie Nutzung von Mobiltelefonen und Sendeanlagen:* Eine Reihe von neuen Studien aus Holland und der Schweiz fand keinen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Symptomen und der modellierten HF-NIS am Wohnort. Das deutet darauf hin, dass es keinen solchen Zusammenhang gibt (Evidenz für Abwesenheit). In diesen Studien (wie auch in der Realität) ist der Anteil Personen, die im Durchschnitt höheren Expositionen ausgesetzt sind (z. B. >0,5 V/m) sehr gering, und sie sind deshalb nicht genügend aussagekräftig, um Auswirkungen bei Expositionen im Bereich des Anlagegrenzwertes und darüber zu evaluieren. Diesbezüglich wird die Evidenz als unzureichend klassiert. Einige Mitglieder der Arbeitsgruppe waren der Meinung, dass aufgrund der Erfahrungen aus der Praxis mit Patienten, welche Beschwerden plausibel auf hohe NIS-Expositionen zurückführen, ein Zusammenhang nicht ausgeschlossen werden könne, auch wenn ein Beweis für solche Wirkungen im Einzelfall nicht geleistet werden kann.
- *Befinden und Symptome durch kurzfristige Expositionen:* Seit 2014 sind kaum mehr Provokationsstudien zu akuten Effekten von HF-NIS auf das Befinden durchgeführt worden. Schon damals gab es Evidenz, dass kein diesbezüglicher Zusammenhang besteht.
- *Auswirkungen auf das Verhalten von Kindern und Jugendlichen durch pränatale Exposition oder Mobiltelefonnutzung und Exposition bei ortsfesten Sendeanlagen:* Es gibt zwar einige neue Studien zu diesem Thema, jedoch zeigen vereinzelt beobachtete Assoziationen kein konsistentes Bild, und eine longitudinale Studie deutet eher darauf hin, dass Jugendliche mit Verhaltensproblemen häufiger Mobiltelefone nutzen, als dass Mobiltelefonnutzung zu Verhaltensproblemen führt (umgekehrte Kausalität). Die Evidenz wird daher als unzureichend beurteilt.
- *Kognition bei intensiver Mobiltelefonnutzung:* Eine 2018 veröffentlichte Studie hat einen langfristigen Einfluss von HF-NIS auf das Kurzzeitgedächtnis beobachtet, und in einer experimentellen Studie konnte gezeigt werden, dass nach Nächten mit HF-NIS-Exposition die schlafabhängige Verbesserung in einem kognitiven Test reduziert war. Falls solche kognitiven Effekte real wären und längerfristig nicht kompensiert würden, hätte das relevante Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Gesellschaft. Mehrere andere experimentelle Kurzzeitstudien und einige andere epidemiologische Studien ergeben insgesamt aber kein konsistentes Bild, sodass die Evidenz als unzureichend eingeschätzt wird. Dieser Effekt wurde 2014 nicht evaluiert.
- *Entwicklung des Fötus bei intensiver mütterlicher Mobiltelefonnutzung während der Schwangerschaft:* Eine erste grosse prospektive Kohortenstudie aus Norwegen findet keinen Hinweis für einen diesbezüglichen Zusammenhang.[94] Die Studie kann allerdings keine Aussage zum Einfluss von HF-NIS auf spontane Aborte vor der 15. Schwangerschaftswoche machen, weshalb die Faktenlage noch unklar ist. Die Evidenz wird deshalb als unzureichend eingeschätzt.
- *Spermienqualität:* Im Bericht von Hug et al. (2014) wurde aufgrund von damals neuen Studien zum Einfluss der täglichen Mobiltelefonnutzung auf die Spermienqualität die Evidenz als begrenzt eingestuft. Seither konnten diese Beobachtungen nicht mit qualitativ verbesserten Untersuchungen beim Menschen gestützt werden. Es gibt jedoch auch Tierstudien, die experimentell einen Hinweis auf negative Effekte bei relativ geringen Expositionen finden (150 mW/kg). Nicht im Detail evaluiert wurden In-vitro-Studien zur Thematik. Aufgrund der Humanstudien wird die Evidenz als unzureichend eingeschätzt. Da potenzielle Einflüsse auf die Fortpflanzung relevant sind, sollte dieser Thematik noch verstärkt Beachtung geschenkt werden.

- *Hirnströme durch Mobiltelefonexposition:* Wie 2014 wird die Evidenz als ausreichend eingeschätzt. Die wenigen neuen Studien bestätigen die bisherigen Resultate, wobei es gewisse Unterschiede zwischen den Studienresultaten gibt.

Wie oben erläutert, wurden die vielen In-vitro- und In-vivo-Studien von der Arbeitsgruppe nicht vertieft evaluiert, da diese eine Vielzahl von biologischen Systemen beinhalten und die entsprechende Expertise in der Arbeitsgruppe nicht vertreten war. Entsprechend wird für eine Reihe von biologischen Effekten (Blut-Hirn-Schranke, DNS-Schädigung, Zellproliferation, Apoptose, oxidativer Stress, Gen- und Proteinexpression) keine Evidenzbeurteilung gemacht. Ein Einfluss von HF-NIS auf den oxidativen Stress (reaktive Sauerstoffspezies, ROS) ist jedoch in mehreren Publikationen beschrieben worden. Nach heutigem Kenntnisstand sind ROS in niedriger Konzentration gesundheitsfördernd und wichtig als Reaktion auf entzündliche Prozesse, während sie in hoher Konzentration mit verschiedensten Erkrankungen wie Krebs, neurodegenerative Erkrankungen, Diabetes und Herz-Kreislauf-Erkrankungen in Verbindung gebracht worden sind.

Zusammenfassend kommt die Arbeitsgruppe damit zu den nachstehenden Schlussfolgerungen:

- Bisher sind keine konsistenten Gesundheitsauswirkungen unterhalb der ICNIRP-Richtwerte (bzw. der Immissionsgrenzwerte der NISV) und mit den heute verwendeten Mobilfunkfrequenzen nachgewiesen worden.
- Evidenz für physiologische Effekte beim Menschen gibt es bei Exposition des Gehirns im Bereich des ICNIRP-Richtwertes für lokale Absorption (v. a. Hirnströme). Diese experimentellen Studien fanden teilweise auch unterschiedliche Effekte in Abhängigkeit der Modulation, was darauf hindeutet, dass neben der Signalstärke auch die Signalform der Exposition eine Rolle spielen könnte, was nicht mit dem thermischen Wirkmodell erklärbar ist. Inwiefern die Signalcharakteristik (z. B. Modulation) eine Rolle spielt, ist aber noch zu wenig systematisch evaluiert worden.
- Es gibt kaum Studien an Menschen, bei denen der ganze Körper im Bereich des Ganzkörpergrenzwertes exponiert ist. Im Alltag kommen solche Expositionen, obwohl prinzipiell zulässig, praktisch nicht vor, was beobachtende Studien schwierig macht. In epidemiologischen Studien sind die am stärksten exponierten Personen deutlich weniger stark exponiert (ca. 0,2–1 V/m). Bei diesen Expositionen findet man keine Hinweise auf Gesundheitsauswirkungen.
- In der ärztlichen Praxis gibt es Fälle, bei denen Patienten ihre Beschwerden plausibel auf hohe NIS im Alltag zurückführen. Ein Beweis für eine solche Wirkung kann jedoch im Einzelfall nicht geleistet werden. Auch in doppelblinden, randomisierten Studien konnte kein Nachweis für eine solche elektromagnetische Hypersensibilität erbracht werden, wobei mehrheitlich die Wahrnehmung von Kurzzeitexpositionen untersucht wurde.
- Es sind sehr viele In-vitro- und In-vivo-Studien gemacht worden. Diese finden häufig biologische Effekte (z. B. ROS), aber die Ergebnisse sind nicht einheitlich. So findet sich zum Beispiel kein konsistentes Muster in Bezug auf Expositions-Wirkungsbeziehungen oder in Bezug auf die Frage, welche Zellen besonders sensitiv wären.
- Es gibt bereits einige In-vitro- und In-vivo-Studien für Expositionen im Bereich von 30 bis 65 GHz. Die Resultate sind jedoch zu wenig robust für eine Evidenzbeurteilung.
- Aufgrund der offenen Fragen wird in *Kapitel 10.4.1* beschrieben, für welche potenziellen Effekte weitere Forschung angezeigt ist.

Tabelle 17: Überblick über die Evidenzlage gemäss Einschätzung der Arbeitsgruppe (Evidenzeinschätzung 2019) im Vergleich zur Evidenzeinschätzung im Bericht Hug et al. (2014)

Endpunkt	Exposition	Evidenzeinschätzung 2014	Evidenzeinschätzung 2019
Tumoren (v. a. Glioblastome und Neurilemmome)	Langfristige oder intensive Mobiltelefonnutzung	begrenzt	begrenzt
	Sendeanlagen	unzureichend	unzureichend
Ko-Karzinogenese im Tierversuch	2014: ≥0,9 W/kg 2019: ≥0,04 W/kg	begrenzt	begrenzt
Befinden und Symptome	Alltagsexposition durch Mobiltelefone und Sendeanlagen	unzureichend	Abwesenheit / unzureichend
	Kurzfristig: Mobiltelefone und Sendeanlagen (<1 h)	Abwesenheit	Abwesenheit
Auswirkungen auf das Verhalten bei Kindern und Jugendlichen	Diverse: pränatal (Mobiltelefonnutzung der Mutter), Mobiltelefonnutzung des Kindes, ortsfeste Sendeanlagen	unzureichend	unzureichend
Kognition	Intensive Mobiltelefonnutzung	nicht beurteilt	unzureichend
Entwicklung, Schwangerschaft	Intensive mütterliche Mobiltelefonnutzung	nicht beurteilt	unzureichend
Fertilität (Spermienqualität)	Tägliche Mobiltelefonnutzung	begrenzt	unzureichend
Hirnströme	≤8 h Mobiltelefonexposition	ausreichend	ausreichend
Durchblutung und Stoffwechsel des Gehirns	≥0,9 W/kg*	begrenzt	nicht beurteilt
Blut-Hirn-Schranke	<0,1 W/kg*	unzureichend	nicht beurteilt
Direkte DNS-Schädigung	≥2 W/kg*	unzureichend	nicht beurteilt
Indirekte DNS-Schädigung	≥2 W/kg* bzw. ≥0,1 W/kg*	begrenzt	nicht beurteilt
Zellproliferation (Vermehrung)	≥1 W/kg*	unzureichend	nicht beurteilt
Apoptose (programmierter Zelltod)	≥1,6 W/kg*	begrenzt	nicht beurteilt
Oxidativer Stress – Reaktive Sauerstoffspezies (ROS)	≥2 W/kg*	begrenzt	nicht beurteilt
Gen- und Proteinexpression	unklar	begrenzt	nicht beurteilt

*Für die tier- und zellexperimentellen Endpunkte ist jeweils der niedrigste SAR-Wert angegeben, bei dem in mindestens einer der Studie in Hug et al. (2014) Effekte beobachtet wurden.

7 Verfahren und Vollzug

7.1 Standortsuche für Antennen

7.1.1 Grundlagen

Der rechtliche Rahmen für das Bewilligungsverfahren von Mobilfunk-Basisstationen umfasst die folgenden Gesetze und Verordnungen sowie die damit verbundenen Vollzugshilfen:

- Im Fernmeldegesetz und in den Konzessionen für die Nutzung der Frequenzen für den Mobilfunk sind unter anderem der Umfang der Mitbenutzung von Infrastrukturen der Mobilfunkanbieter sowie die Anforderungen an die Mindestabdeckung der Fläche und der Bevölkerung mit Mobilfunkdiensten geregelt.
- Basierend auf den Vorgaben und Grundsätzen des Umweltschutzgesetzes sind in der NISV und den Vollzugsempfehlungen zur NISV Immissionsgrenzwerte, Anlagegrenzwerte, der Anlagebegriff sowie die Art und Weise der rechnerischen und messtechnischen Ermittlung der elektrischen Feldstärken geregelt.
- Das Raumplanungsgesetz regelt die Anforderungen für Standorte ausserhalb von Bauzonen. Da gemäss Raumplanungsgesetz die Siedlungsgebiete grundsätzlich durch Anlagen im Siedlungsgebiet versorgt werden sollen, sind Anlagen in Bauzonen und somit mitunter in Wohnzonen zu errichten.
- Die Bewilligungsverfahren sind kantonal geregelt. In der Regel ist für jede Anlage mit Sendeleistung über 6 W ERP sowie für Änderungen im Sinne der NISV ein Baugesuch erforderlich (vgl. *Kap. 7.2.1.2 ff.*).

Die Empfehlungen der Eidgenössischen Kommission für Denkmalpflege[95] (Grundsatzdokument 2018) schränken die Akquisition von Mobilfunkstandorten zusätzlich ein. Geschützte Objekte sollen durch die Installation einer Mobilfunkanlage in ihrer materiellen Substanz nicht angetastet werden. Dies verunmöglicht vielfach die Akquisition von potenziellen Objekten in Stadtzentren (Altstadt). Dazu kommt um jedes geschützte Objekt ein Bereich mit Umgebungsschutz. Es darf zu keiner massgeblichen Beeinträchtigung des Schutzobjektes kommen. Zahlreiche Gemeinden befinden sich zudem im Bundesinventar der schützenswerten Ortsbilder der Schweiz von nationaler Bedeutung (ISOS) oder in einer durch das Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BLN) geschützten Landschaft.[96]

Aufgrund politischer Beschlüsse haben verschiedene Städte und Gemeinden ihre gesamten Immobilien aus dem Finanz- und Verwaltungsvermögen für den Bau von Mobilfunkstationen ausgeschlossen (z. B. Antennenmoratorien Stadt Bern, Stadt Genf, Teilmoratorium Stadt Zürich).

7.1.2 Planungsrechtliche Vorgaben

Der gesamte Gebäudebestand der Schweiz umfasst ca. 2,5 Millionen Gebäude. 24 Prozent oder 595 000 Objekte liegen ausserhalb der Bauzonen und ca. 10 Prozent werden als Bürofläche, Gewerbe- und Lagerfläche benutzt. Fast zwei Drittel aller Gebäude der Schweiz dienen hauptsächlich dem Wohnen, wiederum zwei Drittel davon sind Einfamilienhäuser.

Mobilfunkanlagen, die das Siedlungsgebiet versorgen, sollen grundsätzlich innerhalb der Bauzone errichtet werden; sie sind hier grundsätzlich zonenkonform. Ausserhalb der Bauzonen werden Mobilfunkanlagen nur dann bewilligt, wenn die Standortgebundenheit gegeben ist.

Die neuere bundesgerichtliche Rechtsprechung stellt jedoch klar, dass durch die Nutzungsplanung Einfluss auf die Standortwahl von Mobilfunkantennen innerhalb des Baugebiets genommen werden kann. Gemeinden und Kantone sind im Rahmen ihrer bau- und planungsrechtlichen Zuständigkeiten in einem gewissen Mass befugt, Bau- und Zonenvorschriften in Bezug auf Mobilfunkanlagen zu erlassen, sofern die bundesrechtlichen Schranken beachtet werden. Dies kann im Einzelfall dazu führen, dass eine Anlage ihr ursprüngliches Versorgungsziel nicht erreichen kann und daher zusätzliche Anlagen notwendig sind.

So kann im Interesse des Ortsbildes und Landschaftsschutzes sowie der Siedlungsentwicklung die Wahl von Standorten für Mobilfunkanlagen mit verschiedenen kommunalen und kantonalen Instrumenten zur Standortplanung und -koordination im Sinne einer Positiv-/Negativplanung gesteuert werden. Das sogenannte Kaskadenmodell dient der zonenspezifischen Priorisierung möglicher Antennenstandorte: Ein Standort in einem Gebiet untergeordneter Priorität (z. B. gemischte Wohn- und Gewerbezone oder reine Wohnzone) ist nur dann zulässig, wenn ein Standort in einem Gebiet übergeordneter Priorität (z. B. Industriezone) nicht infrage kommt. Nicht als Mobilfunkanlagen erkennbare Anlagen (z. B. Anlagen, die versteckt gebaut oder kaschiert werden) können jedoch nicht unter die Kaskadenregelung fallen.

Das Bundesgericht hat sich bezüglich der möglichen planerischen Massnahmen auch für eine Vereinbarung mit den Betreibern ausgesprochen. Seit 2009 haben sich zudem verschiedene Gemeinden für einen Beitritt zum sogenannten Dialogmodell entschieden. Grundsätzlich geht es dabei um eine frühzeitige Information der kommunalen Behörden über die Ausbaupläne der Betreiber, um eine Zusammenarbeit mit den Gemeinden zu erleichtern. Das ermöglicht den zuständigen Behörden eine gewisse Mitsprache bei der Suche nach geeigneten Antennenstandorten. Inzwischen haben gesamtschweizerisch rund die Hälfte der Gemeinden eine Vereinbarung mit den Betreibern über das Dialogmodell getroffen.

7.1.3 Mietpreise

Der Schweizer Telekommunikationsmarkt wurde 1998 liberalisiert. Im April desselben Jahres wurden zur bestehenden Lizenz für Swisscom zwei weitere GSM-Lizenzen an diAx (heute Sunrise) und Orange (heute Salt) vergeben. Momentan und über die nächsten Jahre laufen daher viele auf 15 bzw. 20 Jahre befristete Mietverträge für Mobilfunkstationen (frei stehend auf Grundstücken oder auf Gebäudedächern) aus und müssen neu verhandelt werden. Die meisten Verträge sehen vor, dass der Mietzins dem Index folgt, weshalb sie laufend der Teuerung angepasst werden. Da sich die Suche nach Ersatzstandorten oftmals schwierig gestaltet und viel Zeit beansprucht, resultieren teilweise überproportional gewachsene Mieten. Ein Drittel der neu verhandelten Verträge führt zu einer Preiserhöhung von über 50 Prozent.

7.1.4 Herausforderungen bei der Standortsuche

Die Mietpreise für Mobilfunkstationen steigen laufend – bei einem ständig schrumpfenden Portfolio (z. B. Negativplanung, Moratorien, bereits bestehende Anlagen etc.). Es ist nicht davon auszugehen, dass bei den derzeitigen Rahmenbedingungen genügend Standorte für einen 5G-Rollout zu wirtschaftlich tragbaren Bedingungen zur Verfügung stehen werden. Ausserdem ist es aufgrund der heutigen Regulierungsdichte (Planungszonen, Kaskaden, Bewilligungsauflagen, geschützte Objekte, Ortsbilder und Landschaften etc.) und vor allem aufgrund der Widerstände in den Gemeinden und Städten schwierig, die benötigten zusätzlichen Mobilfunkstandorte für einen schnellen 5G-Rollout zeitnah zu akquirieren und zu bewilligen.

Die Verdichtung und der Ausbau der Netze sind aufgrund der schwierigen Standortakquisition sowie der bereits hohen Anlagendichte nur begrenzt möglich. Oftmals ist innerhalb der Bauzone eine Mitbenutzung eines bestehenden Standorts durch einen weiteren Anbieter (und damit eine Beschränkung der Anzahl Anlagen auf ein notwendiges Minimum) insbesondere innerhalb der Bauzone kaum umsetzbar: Wenn der Anlagegrenzwert der NISV an einem Ort mit empfindlicher Nutzung bereits durch einen oder mehrere Standorte bzw. Anlagen eines Mobilfunkbetreibers praktisch ausgeschöpft wird, besteht kein Platz mehr für zusätzliche Leistungen anderer Anbieter, und innerhalb eines bestimmten Radius ist aufgrund der bestehenden Anlagedefinition der NISV auch keine weitere Mobilfunkstation möglich. Selbst wenn eine Anlage noch bestehende Kapazität vorrätig hat, besteht für den Betreiber keine grundsätzliche Verpflichtung, diese einem Konkurrenten zur Verfügung zu stellen. Die Mitbenutzungsrate in der Schweiz ist tendenziell tiefer als im Ausland.

Die fehlenden Ausbau- oder Mitbenutzungsmöglichkeiten können zusammen mit der beschränkten Verfügbarkeit von geeigneten Alternativstandorten dazu führen, dass bei der notwendigen Verdichtung der Netze auf Standorte ausgewichen werden muss, die weder aus Sicht der Betreiber noch der Standortgemeinden optimal sind, oder dass gar keine Standorte gefunden werden können.

7.2 Bewilligung und Vollzug durch Kantone und Gemeinden

7.2.1 Heutige Situation

Für den Vollzug der NISV sind bei kommerziellen Mobilfunkanlagen die Kantone und Gemeinden und bei Mobilfunkanlagen für den Bahnfunk (GSM-Rail) das Bundesamt für Verkehr zuständig. In der Regel führen städtische oder kantonale NIS-Fachstellen die umweltrechtliche Beurteilung von Mobilfunkanlagen im Rahmen von Baugesuchen durch (nachfolgend, wo nicht präzisiert, «NIS-Fachstellen» genannt), die Bewilligung erfolgt über die zuständige Behörde.

Die Verfahren zur Bewilligung und Kontrolle von kommerziellen Mobilfunkanlagen können je nach Kanton in den Einzelheiten etwas anders ablaufen. Die Grundsätze sind jedoch überall dieselben.

7.2.1.1 Bewilligungspflichtige Neu- und Umbauten

- *Einreichung von Baugesuch mit Standortdatenblatt:* Der Mobilfunkbetreiber ist verpflichtet, für den Bau von neuen Mobilfunkanlagen mit einer Leistung von mehr als 6 W ERP und bei deren Umbauten (mit gewissen Ausnahmen, vgl. *Kap. 7.2.1.2*) bei der Bewilligungsbehörde ein Baugesuch einzureichen. Zu den erforderlichen Unterlagen gehört auch das Standortdatenblatt. Darin liefert der Betreiber Angaben zu allen relevanten Betriebsparametern der Anlage – wie zum Beispiel Sendeleistung und Hauptstrahlrichtung aller Antennen – und berechnet die zu erwartende Strahlung in der Umgebung der Anlage. Bei Mobilfunkanlagen mit einer Sendeleistung bis maximal 6 Watt ERP muss kein Standortdatenblatt ausgefüllt werden; es genügt in der Regel ein einfaches Meldeformular. Über die Notwendigkeit einer Baubewilligung entscheidet die zuständige Behörde.
- *Publikation des Baugesuchs und Einsprachemöglichkeit:* Die Gemeinde ist verpflichtet, das Baugesuch zu publizieren und öffentlich aufzulegen. Aus dem Standortdatenblatt geht hervor, bis zu welchem Abstand zur Anlage Betroffene zu einer Einsprache berechtigt sind. In vielen Kantonen können Anwohner die Unterlagen während dieser Zeit einsehen und allenfalls Einsprache einreichen. In anderen Kantonen (z. B. Kanton Zürich) kann während dieser Zeit der Baurechtsentscheid verlangt werden, der nach Bewilligung oder Bauabschlag der Anlage zum Rekurs berechtigt.
- *Materielle Prüfung des Baugesuchs mit Standortdatenblatt:* Die zuständige Baubewilligungsbehörde prüft das Gesuch und nimmt für die Beurteilung des Standortdatenblattes in der Regel die Unterstützung der zuständigen NIS-Fachstelle in Anspruch. Diese überprüft die Angaben im Standortdatenblatt, was meistens einen vorgängigen Augenschein vor Ort und eine unabhängige Strahlungsmodellierung (Berechnung) bedingt. Erst wenn sicher ist, dass mit den beantragten Betriebsparametern die Grenzwerte der NISV rechnerisch eingehalten werden können, empfiehlt die NIS-Fachstelle die Bewilligung der Anlage (allenfalls unter Auflagen). Findet die NIS-Fachstelle relevante Fehler im Standortdatenblatt, muss der Gesuchsteller das Standortdatenblatt korrigieren. In der Praxis kommt es vor, dass mehrere Korrekturrunden notwendig sind, bevor mittels Fachbericht die abschliessende Empfehlung zur Bewilligung durch die NIS-Fachstelle gegeben werden kann.
- *Baubewilligung und Rekursmöglichkeiten:* Hält eine geplante Mobilfunkanlage die baurechtlichen Vorschriften sowie gemäss den rechnerischen Prognosen die Grenzwerte der NISV ein, muss sie von der zuständigen Behörde bewilligt werden. Der Entscheid über das Baugesuch wird dem Gesuchsteller und allfälligen Einsprechern mitgeteilt. Diese (genau wie Rekurrenten, die erst nach Bewilligung der Anlage vor Gericht gehen können) haben die Möglichkeit, den Entscheid über kantonale Beschwerdeinstanzen bis hin zum Bundesgericht anzufechten.
- *Bauabnahme:* Nach Errichtung oder Umbau der Anlage wird diese durch die Baubewilligungsbehörde auf ihre Übereinstimmung mit der Baubewilligung hin überprüft. Diese Prüfung umfasst die Lokalisation der Masten und Antennen sowie die montierten Antennentypen und deren Ausrichtung. Die nichtionisierende Strahlung der Antennen kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht geprüft werden, da die Anlage erst nach der Schlussabnahme durch die Behörde in Betrieb genommen werden darf.
- *Abnahmemessungen:* An Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) in der Umgebung der Anlage, bei denen der Anlagegrenzwert rechnerisch zu mehr als 80 Prozent ausgeschöpft ist, können die Behörden (in der Regel auf Empfehlung der NIS-Fachstelle) eine Abnahmemessung der Strahlungsbelastung nach Inbetriebnahme der neuen

oder umgebauten Anlage verlangen. Diese wird meist von einer akkreditierten Messfirma durchgeführt und muss vom Anlagebetreiber bezahlt werden. Damit wird nicht nur auf dem Papier, sondern im realen Betrieb überprüft, ob eine erstellte Anlage den Anlagegrenzwert auch unter Worst-Case-Bedingungen einhält. Abweichungen zwischen Berechnung und Messung können zum Beispiel durch abweichende Dämpfungsparameter sowie Abschattungen oder Reflexionen entstehen. Bei einer gemessenen Überschreitung werden die Betriebsparameter der Anlage so angepasst, dass der Grenzwert eingehalten wird. Das Standortdatenblatt wird entsprechend überarbeitet und ersetzt das bewilligte nahtlos. Sowohl der Messbericht als auch allfällige Anpassungen am Standortdatenblatt werden in der Regel durch die zuständige NIS-Fachstelle geprüft.

- *Qualitätssicherungssystem (QS-System):* Das Bundesgericht verlangte in einem Entscheid aus dem Jahr 2005, dass der Betrieb von Mobilfunkanlagen besser kontrolliert werden müsse und sicherzustellen sei, dass bewilligte Sendeleistungen und Senderichtungen eingehalten werden. Die Netzbetreiber haben daraufhin QS-Systeme auf ihren Netzzentralen eingerichtet, welche durch unabhängige Stellen periodisch überprüft und beglaubigt werden. Bei den QS-Systemen handelt es sich um Datenbanken, in denen für jede einzelne Anlage für jede betriebene Frequenz und jeden betriebenen Funkdienst die eingestellten Werte für die Senderichtung und die maximale Sendeleistung erfasst und täglich mit den bewilligten Parametern verglichen werden. Abweichungen vom bewilligten Betrieb müssen innert 24 Stunden behoben werden, sofern dies durch Fernsteuerung möglich ist, andernfalls innerhalb einer Arbeitswoche. Die NIS-Fachstellen haben keinen direkten Zugriff auf die internen QS-Datenbanken der Betreiber. Sie werden aber zweimonatlich schriftlich über alle Abweichungen und deren Behebung informiert. Auf Verlangen haben die Betreiber den Behörden uneingeschränkte Einsicht in ihre Datenbanken zu gewähren. Die NIS-Fachstellen haben jedoch jederzeit die Möglichkeit, die Betriebs- und Bewilligungsdaten aller Anlagen in einer Datenbank des BAKOM einzusehen und zu kontrollieren. Die Betreiber sind verpflichtet, die Betriebsdaten für die BAKOM-Datenbank zur Verfügung zu stellen und alle zwei Wochen zu aktualisieren.

7.2.1.2 Nicht baubewilligungspflichtige Änderungen an Mobilfunkanlagen

Die Kantone haben die Möglichkeit, bestimmte operative und bauliche Änderungen ohne ein ordentliches Baubewilligungsverfahren zu erlauben, obwohl sie Änderungen im Sinne von Anhang 1 Ziffer 62 Absatz 5 der NISV darstellen. Hierzu hat die Bau-, Planungs- und Umweltdirektoren-Konferenz (BPUK) in einer Empfehlung[97] spezifische Immissionskriterien definiert. Der Nachweis der Einhaltung dieser Immissionskriterien wird mit einem entsprechend aktualisierten Standortdatenblatt erbracht. Zudem darf sich der leistungsabhängige Einspracheperimeter für die Anlage durch die Änderung nicht vergrössern, ansonsten müsste neu Betroffenen die Möglichkeit zur Einsprache gegeben werden, wozu wiederum ein Baubewilligungsverfahren notwendig wäre. Nicht alle Kantone machen von der Möglichkeit der Bagatelländerung Gebrauch.

Was als sogenannte Bagatelländerung gilt, wurde durch die Arbeitsgruppe NIS des Cercl'Air in ihrer Empfehlung vom 12. August 2015 präzisiert. Typische Bagatelländerungen sind etwa Wechsel von Antennen durch solche mit einem anderen Antennendiagramm und Leistungsverschiebungen zwischen Antennen und Frequenzen mit unterschiedlichen AGW bei gleicher horizontaler Abstrahlrichtung.

Bestimmte operative Änderungen fallen nicht unter die Änderungsdefinition der NISV und es ist daher kein Baubewilligungsverfahren notwendig. Diese sind präzisiert im Nachtrag des BAFU vom 28. März 2013 zur Vollzugsempfehlung zur NISV für Mobilfunk- und WLL-Basisstationen. Zu diesen Änderungen gehören zum Beispiel Umverteilungen der Sendeleistung sowie die Summierung oder Hinzunahme von Frequenzbändern innerhalb derselben Antenne und desselben AGW. Das Standortdatenblatt muss jedoch aktualisiert und die im Nachtrag beschriebenen Immissionskriterien müssen eingehalten werden. Das aktualisierte Standortdatenblatt wird in der Regel von den NIS-Fachstellen auf die Einhaltung der entsprechenden Vorgaben des BAFU geprüft.

Die seit 2010 geltende Technologieneutralität des Standortdatenblattes erlaubt dem Betreiber jederzeit Änderungen der Übertragungstechniken (derzeit 2G, 3G, 4G, 5G) auf den verschiedenen Frequenzen ohne Anpassung des Standortdatenblattes. Ebenso sind Leistungsumverteilungen innerhalb bereits summierter Frequenzbänder ohne Anpassung des Standortdatenblattes jederzeit erlaubt.

7.2.1.3 Anteil der nicht baubewilligungspflichtigen Änderungen im Vergleich zu ordentlichen Baugesuchen

Um bei geringfügigen Änderungen an Anlagen Baubewilligungsverfahren zu vermeiden, können diese als Bagatellen bewilligt werden. Dies schliesst nicht nur Änderungen an einzelnen Anlagen aufgrund wechselnder Kundenbedürfnisse ein, sondern auch die Einführungen neuer Mobilfunkgenerationen, die häufig mit einem Wechsel von Antennen verbunden sind. Daher müssen wesentlich mehr Standortdatenblätter aufgrund von Bagatelländerungen von den Behörden kontrolliert werden als solche im Rahmen von Baugesuchen (rund dreimal mehr Bagatellen als Baugesuchs-Standortdatenblätter). Obwohl der Kontrollaufwand für eine Bagatelle grundsätzlich geringer ist als für ein Standortdatenblatt, das im Rahmen eines Baugesuchs geprüft wird, verursacht die Kontrolle der grossen Menge an Bagatellen bei den NIS-Fachstellen einen erheblichen Aufwand. Dasselbe gilt für aktualisierte Standortdatenblätter wegen Leistungsumverteilungen, Frequenzhinzunahmen oder -summierungen, die keine Änderungen im Sinne der NISV darstellen. Sind adaptive Antennen enthalten, kann sich der Kontrollaufwand aufgrund der deutlich verschiedenen Antennendiagramme signifikant erhöhen. Der administrative Aufwand ist für die NIS-Fachstellen in beiden Fällen (Baugesuch und nicht bewilligungspflichtige Änderungen) etwa gleich gross.

7.2.1.4 Ablauf der Kontrolle nicht bewilligungspflichtiger Änderungen

Die Kontrolle von Standortdatenblättern, die nicht-bewilligungspflichtige Änderungen dokumentieren, unterliegt von Kanton zu Kanton unterschiedlichen Verfahren. So kann das Standortdatenblatt entweder nur bei der kantonalen NIS-Fachstelle, nur bei der Gemeinde oder bei beiden eingereicht werden (Möglichkeiten gemäss BPUK-Empfehlung). In verschiedenen Kantonen werden nicht bewilligungspflichtige Änderungen nur von der NIS-Fachstelle ohne Einbezug der Baubewilligungsbehörde geprüft. In der Regel bestätigt die NIS-Fachstelle dem Betreiber das Einhalten der Bagatellkriterien, sodass Letzterer das aktualisierte Standortdatenblatt aktiviert und allfällige bauliche Anpassungen umsetzt.

7.2.2 Einflussfaktoren im bisherigen Vollzug

Im Jahr 2013 hat das BAFU mit den Vollzugsverantwortlichen der Kantone und ausgewählten Bundesstellen eine Analyse des Vollzugs der Umweltvorschriften[98] durchführen lassen. Zu diesem Zeitpunkt stellten die befragten Kantone betreffend NIS im Vergleich zu anderen Umweltbereichen am wenigsten Vollzugsdefizite fest.

7.2.2.1 Erfolgsfaktoren

Die allermeisten Mobilfunkanlagen in der Schweiz werden im Rahmen der bewilligten Betriebsparameter betrieben, Grenzwertverletzungen an OMEN sind daher ausserordentlich selten. Das BAFU und die Kantone führen dies auf folgende Faktoren im Vollzugssystem für Mobilfunkanlagen zurück:

- *Klare rechtliche Grundlagen und gute Vollzugshilfen:* Die Bewilligung einer neuen oder die substanzielle Änderung einer bestehenden Anlage benötigt ein Baugesuch und unterliegt klaren Regeln, die in der NISV des Bundes rechtlich verankert sind und in der Vollzugshilfe präzisiert werden. Die klaren Regulierungen tragen dazu bei, dass alle Akteure wissen, was zu tun ist. Eine Vorlage für ein standardisiertes Standortdatenblatt (Emissionserklärung) sorgt dafür, dass alle NIS-relevanten Angaben zum Betrieb einer Anlage sowie Strahlungsberechnungen für die höchstbelasteten OMEN in der Umgebung der Anlage von allen Betreibern einheitlich deklariert werden. Verschiedene weitere Vollzugshilfsmittel (Nachtrag zur Vollzugshilfe, BPUK-Empfehlung) definieren Bagatellkriterien, sodass kleine operative Änderungen oder Antennenwechsel auch ohne Baugesuch durchgeführt werden können.
- *Existenz von zentralen NIS-Fachstellen:* Obwohl in vielen Kantonen Baubewilligungsverfahren Sache der Gemeinden sind, wird die umweltrechtliche Beurteilung von Mobilfunkanlagen im Rahmen von Baugesuchen in der Regel durch zentrale kantonale (oder städtische) NIS-Fachstellen durchgeführt. Diese besitzen Fachkompetenz, Erfahrung und Arbeitshilfsmittel, über die (insbesondere kleinere) Gemeinden nicht verfügen.

- *Gute Zusammenarbeit der NIS-Fachstellen untereinander und mit übergeordneten Bundesstellen:* Ein regelmässiger Austausch zwischen den NIS-Fachstellen untereinander sowie mit den relevanten Bundesstellen (BAFU, BAKOM, BAV) im Rahmen der Arbeitsgruppe NIS des Cercl'Air erlaubt eine rasche Klärung rechtlicher, technischer oder vollzugstechnischer Fragen und stellt einen möglichst einheitlichen Vollzug der NISV schweizweit sicher. Die Arbeitsgruppe ist auch ein zentrales Ansprechgremium für die kommerziellen Mobilfunkbetreiber, sodass Anliegen von der und an die Anbieterseite effizient abgewickelt werden können.
- *Funktionierende Qualitätssicherungs- und Kontrollsysteme:* Die Kontrolle des rechtskonformen Betriebs nach Abschluss des Baubewilligungsverfahrens wird durch effiziente firmeninterne Qualitätssicherungssysteme sowie durch externe Kontrollen des laufenden Antennenbetriebs via BAKOM-Datenbank durch die NIS-Fachstellen gewährleistet.

In einer kürzlich veröffentlichten Studie[99] wurden die Erfolgsfaktoren (aus Sicht der Behörde) in denjenigen Umweltbereichen untersucht, in welchen der Vollzug gut funktioniert. Im Bereich NIS wurden hierzu Experteninterviews mit Vertretern des BAFU, von fünf kantonalen NIS-Fachstellen, dem Städteverband, der Association Suisse des Télécommunications (ASUT) und eines Mobilfunkbetreibers durchgeführt. Die Autoren haben vier Schlüsselfaktoren identifiziert, die massgeblich zum Erfolg des Vollzugs der NISV bei Mobilfunkanlagen beitragen. Drei der Erfolgsfaktoren decken sich mit den oben genannten Punkten: Klare Regulierungen in der NISV und gute Vollzugshilfen, gute Arbeit der kantonalen und kommunalen Behörden sowie der Mobilfunkanbieter in der Baubewilligungsphase, gutes Kontrollsystem.

Ergänzend erkannten die Autoren, dass der (lokale) öffentliche Druck einen massgeblichen Einfluss auf den Vollzug habe. Dieser Druck resultiere vor allem aus einem latenten Unbehagen in der Bevölkerung gegenüber der Strahlung von Mobilfunkantennen. Aktivitäten kritischer Organisationen und die Berichterstattung in den Medien unterstützen ihn. Der Druck führe dazu, dass die Gemeinden und die Kantone viel in den Vollzug investierten. Die Baubewilligungsverfahren böten Transparenz bezüglich der geplanten Antennen. Zudem würden sie eine Mitwirkungsmöglichkeit beinhalten, welche die Beschwerden kanalisieren und auf die konkreten Fälle fokussieren würde.

Das Vorsorgeprinzip des USG wurde in der NISV angesichts ungewisser gesundheitlicher Langzeitauswirkungen strikt umgesetzt. Die Umsetzung des Vorsorgeprinzips wird von verschiedenen Seiten kritisiert. Grundsätzlich stellt die Art der Umsetzung ein klares Signal dar, das im Zusammenhang mit dem latenten Unbehagen der Bevölkerung und dem (lokalen) öffentlichen Druck politisch bewusst gesetzt wurde. Da die Anlagegrenzwerte die vom USG verlangte Vorsorge abschliessend regeln, bieten sie für die beteiligten Akteure auch Rechtssicherheit. Hält eine Mobilfunkanlage die Grenzwerte der NISV sowie die weiteren baurechtlichen Vorschriften ein, muss sie von der zuständigen Behörde bewilligt werden.

Der (lokale) öffentliche Druck hat in Form von Einsprachen während des Baubewilligungsprozesses oder Anfragen bezüglich des Betriebs vorhandener Mobilfunkantennen strenge Anforderungen begünstigt und zu einer guten Arbeit der Vollzugsakteure beigetragen.

7.2.2.2 Herausforderungen

Die Kantone stellen im gegenwärtigen NIS-Vollzug die folgenden Herausforderungen fest:

- *Steigende Anzahl zu prüfender Standortdatenblätter:* Die Einhaltung der genauen und strengen rechtlichen Vorgaben, unter denen eine Mobilfunkanlage gebaut und betrieben werden darf, bedarf einer entsprechend genauen und daher zeitintensiven Kontrolle durch die NIS-Fachstellen im Bewilligungsverfahren und während des Betriebs.
- *Grosse Dynamik der Mobilfunktechnologie:* Durch die grosse Dynamik des Mobilfunks werden kleine, nicht bewilligungspflichtige Änderungen sowie Neu- und Umbauten von Anlagen in immer kürzeren Intervallen durchgeführt. In jedem Fall müssen die entsprechenden Standortdatenblätter auf Rechtskonformität geprüft werden. Die zeitlichen Ressourcen der meisten NIS-Fachstellen sind ausgeschöpft. Dass eine bestimmte Anzahl der geprüften Standortdatenblätter betrieblich nie aktiviert werden, macht dies umso problematischer. Die schnelle Weiterentwicklung der Mobilfunktechnologien bedingt auch eine kontinuierliche fachliche Weiterbildung der NIS-Fachstellen, um Standortdatenblätter vollumfänglich prüfen zu können. Nicht selten – so zum Beispiel derzeit vor dem

Hintergrund der Einführung der Mobilfunktechnologie 5G – sind auch Anpassungen an Vollzugsempfehlungen, weiteren Hilfsmitteln oder sogar der NISV selbst notwendig. Messfirmen, die zum Beispiel im Rahmen von Baubewilligungsverfahren Abnahmemessungen durchführen, sind auf die regelmässige Aktualisierung der Messvorschriften von METAS und BAFU angewiesen.

- *Qualität der Standortdatenblätter der Mobilfunkbetreiber:* Gleichzeitig mit dem Anstieg der Menge an zu bewilligenden oder zu kontrollierenden Standortdatenblättern ist deren Qualität im Durchschnitt zuletzt gesunken. Bis zu einem Drittel der eingereichten Standortdatenblätter müssen aufgrund ungenügender Qualität von den Mobilfunkbetreibern überarbeitet werden. Fehlerhafte Standortaufnahmen, die Nicht- oder Falschberücksichtigung freier Bauparzellen und falsche Verortungen der sogenannten Worst-Case-Punkte an OMEN sind die häufigsten Fehler, wegen deren Standortdatenblätter durch den Gesuchsteller korrigiert werden müssen, bevor sie bewilligungsfähig sind. Die Fehlerabklärungen und Korrekturforderungen seitens der NIS-Fachstellen sind für diese ausserordentlich zeitaufwendig, und auch die Umsetzung der Korrekturen durch die Betreiber verzögert den Abschluss der Verfahren in der Regel deutlich.
- *Dreiecksbeziehung Gemeinde, Kanton und Mobilfunkbetreiber:* Eine zusätzliche Schwierigkeit im Bewilligungsverfahren besteht darin, dass die Bewilligung einer Mobilfunkanlage inklusive des Standortdatenblattes in den meisten Kantonen Sache der Gemeinden ist. Die kantonale NIS-Fachstelle ist zwar in der Praxis die zentrale Ansprechpartnerin für die Betreiber, soweit es um NIS-relevante Anliegen geht. Aufgrund der fehlenden Entscheidungskompetenz der kantonalen NIS-Fachstelle müssen die Anliegen aber in der Regel an die bewilligende Gemeinde herangetragen werden, die dann – wiederum mit Fachunterstützung des Kantons – eine Entscheidung trifft. Obwohl diesbezüglich zum Beispiel die BPUK-Empfehlung gewisse Vereinfachungsempfehlungen enthält, verlangsamt die Kommunikation über die Dreiecksbeziehung zwischen Gemeinde, Kanton und Mobilfunkbetreiber alle Bewilligungs- und Kontrollverfahren und bindet bei beiden Behörden Ressourcen, ohne zu einem besseren Schutz vor NIS beizutragen.
- *Beratung und Information:* Die Angst eines substanziellen Bevölkerungsteils gegenüber der Strahlung von Basisstationen bleibt weiterhin eine Realität. Die damit verbundene aufwendige Beratungs- und Informationstätigkeit obliegt zu einem grossen Teil den NIS-Fachstellen.
- *Mobilfunk als Technologie von (inter-)nationaler Bedeutung in kommunaler Verantwortung:* Drahtlose Kommunikation hat sich längst zu einem Grundbedürfnis in der heutigen Wirtschaft und Gesellschaft entwickelt. Leistungs- und zukunftsfähige Netzinfrastrukturen und Funkstrategien müssen von den kommerziellen Anbietern schweizweit (bzw. sogar grenzübergreifend) abgestimmt und geplant werden. Dies steht im deutlichen Gegensatz zur Handhabung der Bewilligungsverfahren, die in der Regel kommunal unterschiedlichen Baugesetzgebungen und kantonal unterschiedlichen Verfahren unterliegen. Die Gemeinden haben häufig nicht die Fachkompetenz, um selbst die Beurteilung einer Anlage in Bezug auf nichtionisierende Strahlung zu prüfen. Sie müssen sich deshalb auf die Einschätzungen einer externen Kontrollstelle (in der Regel die kantonale NIS-Fachstelle) verlassen. Sie sind aber – mit wenigen Einschränkungen (Ortsbild, Kaskade) – durch das Bundesrecht gezwungen, Mobilfunkanlagen bei NIS-Konformität zu bewilligen. Damit setzen sie sich oftmals dem Unmut der lokalen Bevölkerung aus und müssen auch entsprechend häufig Einsprachen und Rekurse zu Anlagen erdulden, die von einer kantonalen Fachstelle als bewilligungsfähig beurteilt wurden.

7.2.3 Zukünftige Herausforderungen für Bewilligungsbehörden

Der heutige Vollzug der NISV zeigt zwei Facetten. Es kann einerseits festgestellt werden, dass der Mobilfunk genauer und produktspezifischer reguliert ist als andere Umweltbereiche. Eine Konsequenz aus dieser klaren und straffen Regulierung sind vergleichsweise wenige Unklarheiten bei der operativen Umsetzung. Beurteilungen von Anlagen nach ihrer Umweltkonformität erfolgen schweizweit weitgehend einheitlich und strukturiert. Die Kehrseite besteht in einem beträchtlichen administrativen Aufwand seitens der Vollzugsbehörden, aber auch der Betreiber. Der Aufbau von 5G-Mobilfunknetzen, zusätzlich zu den bestehenden Netzen der kommerziellen Anbieter, erfordert in den nächsten Jahren den Bau einer grossen Anzahl neuer und Anpassungen an praktisch allen der schweizweit bestehenden Mobilfunkanlagen. Daraus resultiert ein beträchtlicher Mehraufwand in Bezug auf Bewilligungs-, Kontroll- und Beratungstätigkeit für die

betroffenen Fachstellen der kantonalen und kommunalen Behörden, der ohne eine substanzielle Erhöhung der Ressourcen nicht zu bewältigen sein wird.

Konkrete Auswirkungen auf die Bewilligungs-, Kontroll- und Beratungstätigkeit der kommunalen und kantonalen Behörden sind in folgenden Bereichen zu erwarten:

- Standortsuche für neue Anlagen: Besonders in städtischen Gebieten und Agglomerationen, aber auch in kleineren Gemeinden und ländlichen Gebieten ist mit einer Intensivierung der Standort-suche für neue Mobilfunkanlagen durch die Betreiber zu rechnen. Dies kann für Bewilligungsbehörden, die durch den Beitritt zum Dialogmodell Mitspracherechte bei der Standortsuche erhalten haben, zu einem deutlichen Mehraufwand führen, da die Bevölkerung von der Behörde entsprechenden Einsatz erwartet.
- Baueingaben: Per sofort und anhaltend über mehrere Jahre wird ein deutlicher Anstieg an Baueingaben für Neu- und Umbauten erwartet.
- Messberichte und weitere Kontrollen: In ähnlichem Mass wird auch die Anzahl der zu prüfenden Messberichte und weiteren Kontrollen ansteigen.
- Einsprachen bzw. Rekurse: Entsprechend dem Anstieg an Baueingaben ist mit einem – möglicherweise überproportionalen – Anstieg an Einsprachen bzw. Rekursen und entsprechendem Mehraufwand für deren Bearbeitung zu rechnen. Gegenwärtig sind zahlreiche Baugesuche für Umrüstungen und Neubauten durch Einsprachen und Beschwerden blockiert, was zu einer Zunahme der Arbeitsbelastung bei den Beschwerdeinstanzen, aber auch bei den Bewilligungsbehörden (Vernehmlassungen) verursacht.
- Nicht bewilligungspflichtige Änderungen an bestehenden Anlagen: Es ist damit zu rechnen, dass die Anzahl der zur Kontrolle eingereichten Standortdatenblätter aufgrund von nicht bewilligungspflichtigen Änderungen im Vergleich zu den letzten Jahren im Durchschnitt ebenfalls deutlich zunehmen wird.
- Beratung: Infolge der vermehrten Neu- und Ausbauten von Mobilfunkanlagen ist ein signifikanter Anstieg von Anfragen aus der Bevölkerung zu erwarten. Die geplante Nutzung der neuen Mobilfunktechnologie 5G in höheren Frequenzbereichen führt bereits heute zu einer deutlichen Zunahme von Anfragen betroffener Anwohner und besorgter Bürger.

Der Betrieb eines Mobilfunknetzes ist bereits heute dynamisch und zeichnet sich durch häufige Anpassungen an den Anlagen aus, um verschiedenste Kundenbedürfnisse zu befriedigen. Die Einführung von 5G ermöglicht noch raschere und gezieltere Anpassungen und erfordert daher eine sehr flexible Netzsteuerung. Um die Einhaltung der Grenzwerte im Bewilligungsverfahren und den bewilligungskonformen späteren Betrieb der Anlagen weiterhin kontrollieren zu können, sind Anpassungen am bestehenden Vollzugssystem notwendig, das heute noch auf einen eher statischen Betrieb der Anlagen zugeschnitten ist.

Die BPUK hat anlässlich ihrer Hauptversammlung vom 19. September 2019 festgehalten, dass die Kantone die Befürchtungen der Bevölkerung ernst nehmen und eine wissenschaftliche Risikobeurteilung neuer Technologien fordern.[100] Bei der nächsten Konzessionsvergabe (z. B. Millimeterwellen-Bereich) müssten die Vollzugshilfen des Bundes zeitgleich vorliegen. Es brauche zudem wissenschaftliche Studien, die aufzeigen, ob und – falls ja – welche gesundheitlichen Risiken für die Bevölkerung bestehen (Risikobeurteilung). Zudem solle ein Teil der Konzessionseinnahmen der Mobilfunkanbieter für Risikoforschung im Gesundheitsbereich und für Innovation im Bereich der Netzentwicklungen eingesetzt werden.

7.3 Aktuelle Arbeiten betreffend NISV und Vollzugshilfsmittel

Infolge der stetigen technologischen Weiterentwicklung des Mobilfunks müssen periodisch auch die Vollzugsinstrumente ergänzt bzw. angepasst werden. Unabhängig von den Aktivitäten der Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung laufen derzeit die nachfolgend beschriebenen Arbeiten.

7.3.1 Vereinfachung der Bewilligungsverfahren

Die NISV äussert sich nicht zu den Bewilligungsverfahren, welche für den kommerziellen Mobilfunk in der Kompetenz der Kantone und Gemeinden liegt. Verschiedene Vorstösse auf der politischen Ebene haben bereits Erleichterungen im Vollzug verlangt. Insbesondere ist die Kommission für Verkehr und Fernmeldewesen des Nationalrates an den Bundesrat gelangt mit dem Anliegen, die langen Bewilligungsverfahren für Änderungen an bestehenden Sendeanlagen zu vereinfachen. Frau Bundesrätin Doris Leuthard begrüsste in ihrem Schreiben vom 3. August 2018 an die BPUK eine solche Vereinfachung, soweit die Einhaltung der Bestimmungen der NISV gewährleistet bleibt. Sie bat gleichzeitig die BPUK um Unterstützung, da wesentliche Bereiche des Vollzugs in der Zuständigkeit der Kantone liegen.

Die BPUK hat Ende 2018 die Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter der Schweiz (KVU) beauftragt, die Mitwirkung der Kantone und die Koordination mit der BPUK bei der Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung des Bundes sicherzustellen und auf eine Vereinfachung der Verfahren hinzuwirken. In der Folge müssen die Auswirkungen der vorliegenden Resultate der Bundesarbeitsgruppe auf die BPUK-Empfehlungen zur Bewilligung von Mobilfunkanlagen aus dem Jahr 2013 analysiert werden.

Die KVU hat den Cercl'Air mit der Evaluation der Möglichkeiten für einen effizienteren Vollzug und für eine Vereinfachung der Bewilligungsverfahren beauftragt. Das Projektteam, bestehend aus Vertretern von kantonalen NIS-Fachstellen, des BAFU und der Schweizerischen Bausekretären-Konferenz, hat die Arbeiten im Januar 2019 aufgenommen.

7.3.2 Revision der NISV 2019

Die NISV ist technologieneutral und gilt damit unabhängig davon, ob es sich bei der Mobilfunktechnologie um 3G (UMTS), 4G (LTE), 5G (New Radio) oder weitere zukünftige Technologien handelt. Im Hinblick auf diese zukünftige technische Weiterentwicklung des Mobilfunks war jedoch trotzdem eine Revision der NISV notwendig. Diese hat Regelungslücken geschlossen, die auch für den Aufbau der 5G-Netze hätten hinderlich sein können:

- Die Revision umfasste zum einen die Festlegung eines Anlagegrenzwertes für die Frequenzen zwischen 900 MHz und 1,8 GHz. Für diesen Frequenzbereich war in der NISV nur ein Immissionsgrenzwert, aber noch kein Anlagegrenzwert festgelegt. Im Rahmen der Vergabe der neuen Mobilfunkfrequenzen Anfang 2019 wurden neu jedoch auch Frequenzen um 1,4 GHz für den Mobilfunk freigegeben.
- Zum andern wurde in der NISV ein Grundsatz zur Beurteilung von sogenannten adaptiven Antennen (Beamforming) verankert. Bereits jetzt kommen solche Antennen vermehrt zum Einsatz.
- Schliesslich wurde mit der Revision dem BAFU der Auftrag zur Einführung eines NIS-Monitorings erteilt, welches Auskunft über die Belastung der Bevölkerung mit Mobilfunkstrahlung geben soll (vgl. *Kap. 10.2*).

Die revidierte Verordnung wurde am 17. April 2019 durch den Bundesrat verabschiedet und ist am 1. Juni 2019 in Kraft getreten.[101]

7.3.3 Vollzugshilfe zu adaptiven Antennen

Ende 2019 soll, als Folge der Inkraftsetzung der revidierten NISV, ein Nachtrag zur geltenden Vollzugshilfe für Mobilfunkanlagen publiziert werden, der aufzeigt, wie adaptive Antennen in der Bewilligung beurteilt werden können. Dabei sind folgende Prinzipien zu berücksichtigen:

- Adaptive Antennen sollen nicht verhindert werden.
- Der Grundsatz der vorsorglichen Emissionsbegrenzung soll gewahrt bleiben.
- Der Vollzug soll praxistauglich sein.

Die Erarbeitung dieses Nachtrags zur Vollzugshilfe Mobilfunk wird von einer Gruppe aus Fachleuten begleitet. In dieser «Begleitgruppe Vollzugshilfe Mobilfunk» sind betroffene Akteure wie die Vollzugsbehörden, die Mobilfunkbetreiber und die Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz vertreten.

7.3.4 Überprüfung der Messmethode

Bereits im Herbst 2017 hat eine Gruppe – bestehend aus Vertretern von BAFU, BAKOM, METAS und Swisscom – Arbeiten zur Überprüfung der bestehenden Messmethode für Mobilfunkstrahlung aufgenommen. Anlass war die Kritik der Mobilfunkbetreiber, die von BAFU und METAS empfohlene Messmethode (Schwenkmethode) sei schlecht reproduzierbar und deren Resultate überschätzten die massgebende Strahlung systematisch.

Aus Sicht des BAFU wären insbesondere systematische Abweichungen zwischen der Berechnungs- und der Messmethode störend und die Vollzugsempfehlungen diesbezüglich zu korrigieren.

METAS und BAFU haben ein Projekt spezifiziert, welches die erwähnte Schwenkmethode mit der Methode der Mittelwertbildung vergleichen soll. Die Untersuchungen haben bis im Sommer 2019 gedauert und werden nun ausgewertet.

Als Folge daraus könnte sich eine Überarbeitung der Messempfehlungen von METAS und BAFU oder eine Anpassung der Berechnungsmethode ergeben.

8 Optionen

Aufgrund der in den vorgängigen Kapiteln dargestellten Faktenlage ergeben sich im Hinblick auf die kommende Mobilfunkgeneration 5G verschiedene denkbare Massnahmen und Optionen. Die Arbeitsgruppe hat insgesamt 58 Massnahmen identifiziert und thematisch gruppiert (*vgl. Anhang 1: Geprüfte Massnahmen*). Sodann wurden die folgenden möglichen Optionen ausgearbeitet und hinsichtlich ihrer Auswirkungen in Bezug auf verschiedene Kriterien bewertet:

- Option 1 (*Kap. 8.1*): Status quo Anforderungen NISV
- Option 2 (*Kap. 8.2*): Keine Änderung Anlagegrenzwert, aber strengere Anforderungen in der NISV an Kleinzellenanlagen und adaptive Antennen (Vorschlag: Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz AefU)
- Option 3 (*Kap. 8.3*): Erhöhung Anlagegrenzwert auf einheitliche 6 V/m und Mittelwert-Beurteilung (Vorschlag: Schweizerischer Verband der Telekommunikation asut)
- Option 4 (*Kap. 8.4*): Erhöhung Anlagegrenzwert auf 11,5 V/m pro Betreiber (Vorschlag: Eidgenössische Kommunikationskommission ComCom)
- Option 5 (*Kap. 8.5*): Erhöhung Anlagegrenzwert auf einheitliche 20 V/m (Vorschlag: Schweizerischer Verband der Telekommunikation asut)

Die Arbeitsgruppe hat zuerst die Massnahmen und danach die Optionen nach einer ganzen Reihe von Kriterien beurteilt. Alle Optionen halten den Immissionsgrenzwert ein, der vor den wissenschaftlich nachgewiesenen Gesundheitsauswirkungen schützt. Dem Vorsorgeprinzip des USG wird in den verschiedenen Optionen unterschiedlich Rechnung getragen. Demzufolge sind die Vorsorgemargen gegenüber möglichen langfristigen Gesundheitsauswirkungen unterschiedlich gross.

In *Tabelle 18* findet sich eine Übersicht der Optionen mit Bewertungen zu folgenden Kriterien:

- Anzahl zusätzlicher Mobilfunkanlagen zur Einführung von 5G:
  Je nach Option sind unterschiedlich viele zusätzliche Mobilfunkanlagen sowie Nachrüstungen bestehender Anlagen nötig. Als Nachrüstung gelten die Planung, Installation und der Betrieb von 5G-Ausrüstung inkl. adaptiver Antennen an einem bestehenden Standort. Die Zahlen beruhen auf einer Abschätzung der Mobilfunkbranche (vgl. unten).
- Änderung der höchsten Exposition (gegenüber heute) an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) durch Mobilfunkanlagen:
  Diese ist von der Höhe des Anlagegrenzwertes (AGW) und vom Betriebszustand abhängig, in welchem der AGW eingehalten sein muss (maximale Sendeleistung oder zeitliche Mittelung).
- Änderung der Exposition (gegenüber heute) durch das Mobiltelefon:
  Die Änderungen der Exposition können aus *Kapitel 5* abgeleitet werden.
- Finanzielle Mittel:
  Zur Abschätzung der finanziellen Auswirkungen der einzelnen Optionen wurden, basierend auf den Kosten für den Ausbau einzelner Anlagen (vgl. *Tabelle 10*), jeweils die finanziellen Mittel für die gesamte Investition sowie für den Betrieb über fünf Jahre zusammengefasst.
- Zeitdauer Rechtsänderungen:
  Für eine Anpassung auf Verordnungsstufe (z. B. Änderung NISV) wird von einem Zeitbedarf von zwei Jahren und für eine Gesetzesanpassung von fünf Jahren ausgegangen.
- Dauer bis zur flächendeckenden Einführung von 5G:
  Die Einführung von 5G hat in der Schweiz bereits begonnen und geht weiter. Je nach Option erfolgt der Ausbau schneller oder langsamer als bisher. Die Dauer, bis 5G flächendeckend eingeführt ist, ergibt sich aus der Dauer der

Rechtsänderung und der Dauer, bis neue Antennenstandorte gebaut und bestehende ausgebaut sind. Für die Abschätzungen der Realisierungsdauer wurde von einem Neubau von 1000 Standorten pro Jahr ausgegangen. Heute werden pro Jahr rund 500 Standorte neu erstellt oder umgebaut.

Abschätzung der Anzahl zusätzlicher Mobilfunkanlagen für die Einführung von 5G

In der Schweiz gibt es 8542 Mobilfunkanlagen mit einer Sendeleistung von mehr als 6 W ERP (vgl. *Kap. 4.3.1*). Werden Anlagen verschiedener Betreiber, die sich am selben Standort befinden, separat gezählt, sind es laut BAKOM 10943 Mobilfunkanlagen (Stand Dezember 2018). Für die Einführung von 5G ist gemäss *Kapitel 4.3.6.1* gegenüber heute eine 12,4-fache Sendeleistung nötig (oder 10,9 dB). Für die Abschätzung der notwendigen Mobilfunkanlagen, um 5G in der Schweiz flächendeckend und in hoher Qualität einführen zu können, wurde wie folgt vorgegangen:

- Die Abschätzung geht von der Annahme aus, dass die Anzahl zusätzlicher Mobilfunkanlagen in erster Näherung proportional zur zusätzlich benötigten Sendeleistung ist.
- Je nach Ausgestaltung der Optionen ergeben sich gegenüber heute Möglichkeiten zu Leistungssteigerungen bei den Anlagen. So würde beispielsweise eine Erhöhung des Anlagegrenzwertes auf einheitliche 20 V/m in der Option 5 zu einer Leistungssteigerung bis zu einem Faktor 16 (oder 12 dB) führen.
- Eine weitere Leistungssteigerung ergibt sich durch die Anwendung eines Korrekturfaktors bei der Beurteilung adaptiver Antennen. Mit einem solchen Korrekturfaktor wird berücksichtigt, dass adaptive Antennen im zeitlichen Mittel eine tiefere Exposition verursachen als konventionelle Antennen. Bei den Optionen 1, 3 und 4 wurde jeweils ein Korrekturfaktor von 6 dB angenommen.[26] Bei der Option 2 ist ein solcher Korrekturfaktor nicht vorgesehen und bei Option 5 nicht nötig.
- Diese Faktoren multipliziert (oder in dB addiert) ergeben, wie viel Leistung für die Einführung von 5G auf den Standorten noch nötig wäre.
- Die Anzahl bestehender Anlagen wird mit dem Faktor der noch benötigten Leistung multipliziert. Daraus ergibt sich die totale Anzahl zusätzlich benötigter Anlagen.
- Je nach Option kann zum Teil eine gewisse Anzahl bestehender Anlagen ausgebaut werden und von der erhaltenen Anzahl abzogen werden (bei Option 1 beispielsweise 5149 Anlagen).
- Bei den nun noch benötigten zusätzlichen Anlagen wird noch der Leistungsanteil für 4G abgezogen (Faktor 0,92), da bei den zusätzlichen neuen Standorten nur 5G realisiert werden muss. Als Schlussresultat erhält man die für den 5G-Ausbau zusätzlich benötigten Antennen. Diese sind in *Tabelle 18* aufgeführt.

In *Abbildung 15* sind die Optionen mit einer Einordnung zu folgenden Kriterien dargestellt:

- Zeitbedarf für eine qualitativ gute Versorgung der Schweiz mit 5G (x-Achse)
- Grad und Qualität der Versorgung mit 5G (blaue y-Achse)
- Höchste Exposition an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) durch Mobilfunkanlagen (grüne y-Achse)

Der Zeitbedarf, bis eine qualitativ gute Versorgung mit 5G gemäss dem Standard ITU IMT-2020 in der Schweiz flächendeckend vorhanden ist, ist in groben Kategorien dargestellt (0 bis 10 Jahre, 10 bis 20 Jahre, 20 bis 30 Jahre, mehr als 30 Jahre).

Die blauen dreieckigen Flächen stellen qualitativ dar, in welchem Ausmass der Ausbau auf 5G, der 2019 bereits begonnen hat, voranschreitet, und welche Qualität mit der betreffenden Option am Schluss erreicht werden kann.

Die grüne y-Achse zeigt die je nach Option höchste zulässige Exposition an OMEN durch eine Mobilfunkanlage. Die Grafik gibt aber keine Hinweise auf die räumliche Verteilung der Exposition sowie auf die Anzahl Personen und deren zu erwartende Aufenthaltszeiten in exponierten Bereichen und damit auch nicht auf die durchschnittliche Exposition der

Bevölkerung. Ebenso ist die Exposition durch den Uplink von Endgeräten nicht enthalten. Diese macht bei Nutzern den Hauptteil der Gesamtexposition aus. Welchen Einfluss die Optionen auf die Exposition durch das Mobiltelefon haben, ist in *Tabelle 18* vermerkt.

Grundsätzliche Bemerkungen zu den Optionen

Aus der Arbeitsgruppe werden zu den Optionen die folgenden grundsätzlichen Bemerkungen angebracht:

- Der Städteverband (SSV) empfiehlt eine ökonomische Expertise der veranschlagten Kostenfolgen der fünf Optionen. Aus Sicht des SSV liegen die notwendigen Grundlagen für eine im Rahmen des umweltschutzrechtlichen Vorsorgegebots vorzunehmende Beurteilung der wirtschaftlichen Tragbarkeit nicht vor.
- Die Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU) weisen darauf hin, dass angesichts der derzeitigen exponentiellen Zunahme der übertragenen Daten bei allen Optionen früher oder später eine Verdichtung der Netze notwendig sein wird. Zudem stellt sich für die AefU die Frage nach der Nachhaltigkeit gewisser Optionen und damit insbesondere die Frage, wie lange es bei einer allfälligen Erhöhung der Grenzwerte gehen würde, bis diese wieder ausgeschöpft wären.
- Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) betont, dass eine zuverlässige Mobilfunkabdeckung in der Schweiz für die Behörden und Organisationen für Rettung und Sicherheit (BORS) von grösster Wichtigkeit ist. Die Bevölkerung sollte immer in der Lage sein, einen Notruf tätigen zu können. Die Einsatzkräfte sind bei der Bewältigung der Lage auf den Mobilfunk angewiesen. Eine Schwächung der Mobilfunkabdeckung würde deshalb ein wesentliches Risiko für die Rettung und Sicherheit bilden.
- Die Mobilfunkbetreiber beanspruchen zur Realisierung von 5G Rahmenbedingungen, welche einen raschen Start des Netzausbaus ermöglichen und eine landesweite und qualitativ hochstehende Versorgung mit 5G in rund fünf Jahren erlauben. Ansonsten würden die Mobilfunknetze in der Schweiz nicht mehr international wettbewerbsfähig sein, und die Einführung neuer Anwendungen und Dienstleistungen in anderen Branchen verzögerte sich.
- Sunrise merkt zudem an, dass die Konformität der Optionen mit den Zielsetzungen der Strategie «Digitale Schweiz» sowie mit der fehlenden Standortverfügbarkeit gemäss *Kapitel 7.1* nicht explizit evaluiert wurde und nur in den Optionen 4 und 5 implizit eingeschlossen sei.

Tabelle 18: Übersicht der fünf Optionen mit Informationen zu Anzahl zusätzlicher Mobilfunkanlagen, Änderung der Exposition, Kosten und Realisierungsdauer, bis eine qualitativ gute 5G-Versorgung in der Schweiz flächendeckend realisiert ist. Option 2 wird keine vergleichbare 5G-Versorgung sicherstellen können.

Option Nr.	Name	Anzahl zusätzliche Mobilfunkanlagen	Änderung (gegenüber heute) der höchsten Exposition an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) durch Mobilfunkanlagen	Änderung (gegenüber heute) der Exposition durch das Mobiltelefon	Finanzielle Mittel Investition	Finanzielle Mittel Betrieb (über 5 Jahre)	Zeitdauer Rechtsänderungen	Zeitbedarf für eine qualitativ gute Versorgung mit 5G
1	Status quo Anforderungen NISV	26 500 + Nachrüstung 5000 bestehende Anlagen	Bleibt etwa gleich	Nimmt leicht ab	7,7 Mia.	2,1 Mia.	0 Jahre	20–30 Jahre
2	Keine Änderung AGW, aber strengere Anforderungen in der NISV an Kleinzellenanlagen und adaptive Antennen	46 500	Bleibt gleich	Nimmt leicht ab	13 Mia.	3,5 Mia.	5 Jahre	>30 Jahre
3	Erhöhung AGW auf einheitliche 6 V/m und Mittelwert-Beurteilung	7500 + Nachrüstung aller bestehender Anlagen	Nimmt zu	Nimmt leicht ab	3,2 Mia.	0,8 Mia.	2 Jahre	10–20 Jahre
4	Erhöhung AGW auf 11,5 V/m pro Betreiber	Nachrüstung 3000 bestehende Anlagen; Mitbenutzung 3500 bestehende Anlagen	Nimmt stark zu	Bleibt gleich	0,9 Mia.	0,3 Mia.	2 Jahre	0–10 Jahre
5	Erhöhung AGW auf einheitliche 20 V/m	0 zusätzliche Makrozellen, Nachrüstung 8500 bestehende Anlagen, 2000 Kleinzellen-Verdichtungen (bei 50 % der heutigen Mikrozellen)	Nimmt stark zu	Bleibt gleich	1,0 Mia.	0,3 Mia.	2 Jahre	0–10 Jahre

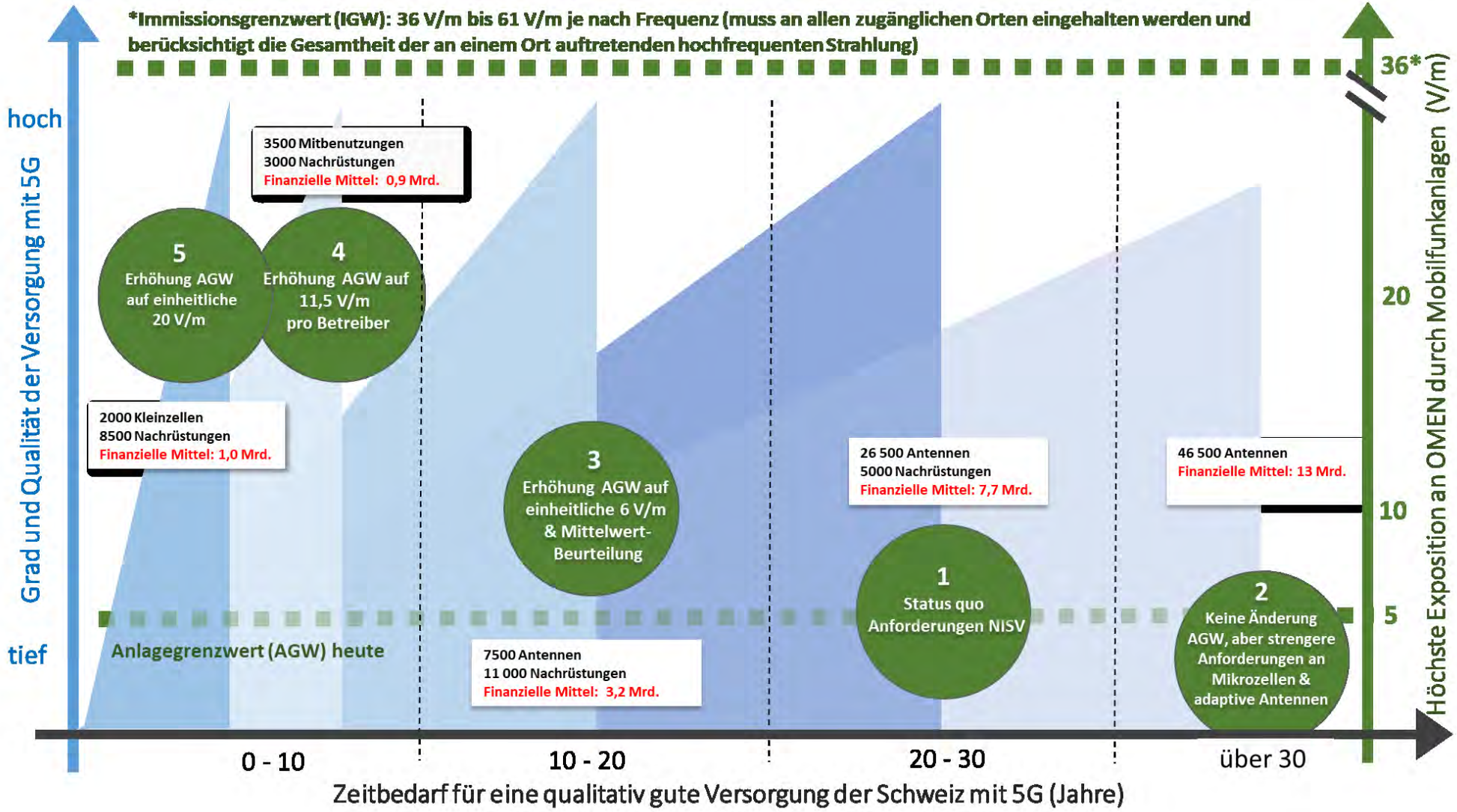

Abbildung 15: Bewertung der fünf Optionen mit den Kriterien Auswirkung auf die Exposition, Zeitbedarf zur Realisierung sowie Kosten mit Zahlen der Branche

8.1 Option 1: Status quo Anforderungen NISV

8.1.1 Beschreibung

Die NISV wird nicht angepasst, die bestehenden Grenzwerte (IGW und AGW) gelten unverändert weiter.

Allenfalls wird die Messmethode überprüft und nach Bedarf angepasst.

8.1.2 Bewertung

8.1.2.1 Leistungsfähigkeit und Kosten

Gemäss den Prognosen wird das über Mobilfunknetze ausgetauschte Datenvolumen weiter stark zunehmen. Sowohl der Ausbau grösserer Anlagen als auch der Bau zusätzlicher kleinzelliger Antennen in dicht besiedelten Gebieten ist weiterhin nötig. Weil die AGW nicht angehoben werden und 5G mehrheitlich nicht auf bestehenden Standorten installiert werden kann, sind für den Aufbau von 5G nach Schätzungen der Mobilfunkbetreiber rund 26 500 neue Standorte sowie 5G-Upgrades (Nachrüstungen) an 5000 bestehenden Anlagen erforderlich. Wenn die neuen und bestehenden Anlagen mit adaptiven Antennen ausgerüstet werden können, ist ein leistungsfähiges und flächendeckendes 5G-Netz gemäss ITU IMT-2020 möglich.

Die damit verbundenen finanziellen Mittel für die Investitionen belaufen sich nach Berechnungen der Branche auf rund 7,7 Milliarden Franken und für den Betrieb über fünf Jahre auf rund 2,1 Milliarden Franken.

8.1.2.2 Exposition

Diese Option hat praktisch eine Verdrei- bis Vervierfachung der Anzahl Antennenstandorte gegenüber heute zur Folge. Wenn das Netz verdichtet wird, werden die Distanzen zwischen dem Mobiltelefon und den nächstgelegenen Basisstationen abnehmen und sich damit tendenziell weniger Hindernisse auf der Funkstrecke befinden. Dies hat tiefere Sendeleistungen der Mobiltelefone und damit eine Abnahme der Uplink-Exposition zur Folge.

Die Exposition durch den Downlink der Basisstationen kann im Durchschnitt leicht zunehmen. Die Exposition wird homogener verteilt, Gebiete ohne nennenswerten Downlink werden seltener (ausgenommen bei adaptiven Antennen und Beamforming). Aufgrund der grösseren Anzahl Mobilfunkanlagen wird auch die Zahl der OMEN zunehmen, die nahe bei Mobilfunkanlagen liegen. Infolge des unveränderten AGW können bei konventionellen Antennen jedoch keine höheren Maximalexpositionen an OMEN auftreten als bisher, bei adaptiven Antennen können diese unter Umständen kurzzeitig höher sein.

Die Auswirkungen der Option hängen schliesslich von der Ausgestaltung der angepassten Messmethode ab. Die Rastermethode (räumlicher Mittelwert) könnte gegenüber der bisherigen Schwenkmethode in der Regel tiefere Feldstärken ergeben. Hierdurch könnten nachträglich, basierend auf der Messung, höhere Sendeleistungen (im Rahmen der rechtlichen Vorgaben) bewilligt werden, was eine Erhöhung der mittleren Exposition zur Folge hätte. Die Ausgestaltung der Messmethode wird sich jedoch nur in beschränktem Masse auf die nötige Anzahl zusätzlicher Antennen auswirken.

8.1.3 Umsetzung

8.1.3.1 Notwendige Anpassungen und Zuständigkeiten

Es sind keine rechtlichen Anpassungen notwendig. Der Aufwand beschränkt sich auf die Überprüfung der Vollzugshilfe und allenfalls auf die Anpassung der Messmethode, wofür BAFU und METAS zuständig sind. Für die Vollzugsbehörden ergibt sich im Vergleich zu heute ein deutlicher Mehraufwand, da eine Vielzahl neuer Anlagen und zahlreiche Umrüstungen bewilligt und kontrolliert werden müssen. Dieser Aufwand würde bei einer gegenüber heute erhöhten Neubauquote (1000 statt 500 Anlagen pro Jahr) nochmals viel grösser.

8.1.3.2 Zeitrahmen

Die notwendigen Arbeiten im Zusammenhang mit der Messmethode würden rund eineinhalb Jahre beanspruchen. Laut Betreiber wird ein Ausbau des Netzes mit rund 26 500 zusätzlichen Anlagen sowie Nachrüstungen an 5000 Standorten notwendig. Der Zeitbedarf für die Suche, Planung und Realisierung dieser Standorte wird auf 20 bis 30 Jahre geschätzt. Bei einer gegenüber heute unveränderten Neubauquote könnte der Aufbau eines flächendeckenden und leistungsfähigen 5G-Netzes aber deutlich länger dauern.

8.2 Option 2: Keine Änderung Anlagegrenzwert, aber strengere Anforderungen in der NISV an Kleinzellenanlagen und adaptive Antennen

8.2.1 Beschreibung

Die bestehenden Grenzwerte (AGW von 4 bis 6 V/m sowie IGW) gelten weiterhin. Mit einem Paket von Massnahmen soll sichergestellt werden, dass das Schutzniveau hinsichtlich NIS zukünftig mindestens erhalten bleibt. Insbesondere wird verhindert, dass bei adaptiven Antennen, wie zurzeit diskutiert wird, durch Anwendung eines Korrekturfaktors gemäss revidierter NISV kurzfristig höhere Expositionen auftreten könnten. Mit den einzelnen Massnahmen wird ein zusätzlicher Anreiz zum sukzessiven Ausbau eines leistungsstarken Glasfaser- bzw. Festnetzes geschaffen, das so weit wie möglich an die Stelle einer Mobilfunkversorgung mit aufrüstbaren Makroantennen treten soll:

- Neu sollen die bestehenden AGW auch für Kleinanlagen (<6 W ERP) gelten, weil diese eine immer grössere Verbreitung finden und zunehmend auch OMEN betreffen.
- Für adaptive Antennen ist der Betriebszustand massgebend, der für die Orte mit empfindlicher Nutzung die höchste technisch mögliche Exposition bedeutet und nicht wie im Status quo korrigiert wird.
- Die Verantwortung über die Einhaltung der Grenzwerte wird den Anlagebetreibern überlassen. Grenzwertüberschreitungen sind mit Bussen zu ahnden.
- Das Mobilfunknetz ist durch ein leistungsfähiges Festnetz zu entlasten, an dessen Anschlusspunkten in Haushalten, Verwaltung und Firmen bedarfsgerecht Kleinstfunkanlagen zur mobilen Versorgung betrieben werden.
- Die Sendeanlagen von 2G und 3G müssen spätestens in zwei Jahren abgeschaltet respektive auf 5G umgerüstet werden, damit weitere Leistungserhöhungen bei den Anlagen vermieden werden können.
- Die Behörden informieren regelmässig über Gesundheitsrisiken von Funkanwendungen und instruieren die Bevölkerung über eine strahlungsminimierte Nutzung von digitalen Informations- und Kommunikationstechnologien.

8.2.2 Bewertung

8.2.2.1 Leistungsfähigkeit und Kosten

Die Einführung eines AGW auch für Anlagen mit einer Sendeleistung unter 6 W ERP führt voraussichtlich dazu, dass jede Kleinzelle einem formellen Baubewilligungsverfahren (in kantonaler Kompetenz) mit einer detaillierten Emissionserklärung in Form eines Standortdatenblattes unterliegt. Dies ist aufwendig. Werden für Kleinstfunkanlagen standardisierte Produkte eingesetzt, wäre zu prüfen, ob mit Typenprüfungen das Bewilligungsverfahren vereinfacht werden könnte.

Die Anwendung der bisherigen Beurteilungsregelung (maximale Leistung bei maximalem Datenverkehr ohne Berücksichtigung der räumlichen Variabilität) auf adaptive Antennen führt dazu, dass deren Leistungsfähigkeit eingeschränkt wird. Die neue Technologie kann damit nicht ihr gesamtes Potenzial entfalten.

Der Trend zu kleineren Funkzellen wird durch 5G grundsätzlich gefördert.[102] Kleinere Funkzellen erfordern mehr Antennenstandorte. Die Einführung von 5G ist unter diesen Bedingungen nur mit der Realisierung von mehr als 46 500 zusätzlichen Standorten (Makrozellen ohne adaptive Antennen) möglich, wobei die Vorgaben gemäss ITU IMT-2020 im Innenraum nicht erfüllt werden können.

Die entsprechenden finanziellen Mittel belaufen sich gemäss Schätzungen des BAKOM auf rund 13 Milliarden Franken für die Investitionen und auf etwa 3,5 Milliarden Franken für den Betrieb über fünf Jahre. Die finanziellen Mittel für den Ausbau der Glasfasernetze wurden in dieser Abschätzung noch nicht berücksichtigt.

Die durch das Abschalten von 2G und 3G frei werdende Kapazität reicht nicht aus, um 5G mit der Zielsetzung von ITU IMT-2020 einzuführen. Zudem sind verschiedene Anwendungen weiterhin von älteren Mobilfunkgenerationen abhängig.

8.2.2.2 Exposition

Das Massnahmenpaket gewährleistet, dass das heutige Schutzniveau für Antennenanwohnende nicht verschlechtert wird. Auch kurzzeitig werden keine Expositionen über dem AGW auftreten. Abhängig von der Zunahme der Anzahl Antennen wird auch die Zahl der OMEN zunehmen, die nahe bei Mobilfunkanlagen liegen. Die durchschnittliche Exposition durch den Downlink der Basisstationen kann leicht zunehmen.

Bei der Benutzung des Mobiltelefons kann diese Option zu einer Abnahme der Uplink-Exposition führen, da aufgrund der grossen Anzahl zusätzlicher Antennenstandorte die Funkstrecke kürzer wird. Dadurch muss das Mobiltelefon eine geringere Sendeleistung aufbringen, weil sich weniger dämpfende Hindernisse zwischen Telefon und Basisstation befinden.

8.2.3 Umsetzung

8.2.3.1 Notwendige Anpassungen und Zuständigkeiten

Die Mobilfunkkonzessionen sind technologieneutral. Wenn die Abschaltung der Sendeanlagen 2G und 3G von den Netzbetreibern nicht freiwillig erfolgt und eine Abschaltung stattdessen vom Staat verlangt werden soll, müssen hierfür die Konzessionen angepasst und darin gewisse Technologien nicht mehr zugelassen werden.

Weil die Priorisierung der Festnetz-Infrastruktur gegenüber dem Mobilfunk im Rahmen der abgeschlossenen FMG-Revision vom Parlament abgelehnt wurde, ist davon auszugehen, dass die Umsetzung der Option Anpassungen auf der Gesetzesstufe notwendig macht.

Der Verzicht auf die Abnahmemessungen muss in einer Vollzugshilfe empfohlen werden.

Für die Vollzugsbehörden ergibt sich gegenüber heute ein drastischer Mehraufwand, da eine Vielzahl neuer Anlagen und zahlreiche Umrüstungen bewilligt und kontrolliert werden müssen.

8.2.3.2 Zeitrahmen

Die Umsetzung nimmt, sofern ein Gesetzgebungsprozess notwendig wird, mehrere Jahre in Anspruch. Die Einführung von 5G in der Schweiz wird infolge des Aufwands für die Suche nach neuen Standorten und den Bau zusätzlicher Antennen verzögert.

Die notwendigen Arbeiten im Zusammenhang mit der Anpassung der Gesetzgebung beanspruchen rund fünf Jahre und der Zeitbedarf für den Bau von 46 500 neuen Anlagen für einen vollständigen 5G-Ausbau wird auf über 30 Jahre geschätzt. Die Zeitdauer für den Ausbau der Glasfasernetze wurde noch nicht berücksichtigt.

8.3 Option 3: Erhöhung Anlagegrenzwert auf einheitliche 6 V/m und Mittelwert-Beurteilung

8.3.1 Beschreibung

Mit verschiedenen Massnahmen wird eine Erhöhung der Sendeleistungen im Hinblick auf 5G ohne wesentliche Anpassung des AGW angestrebt:

- Der vorsorgliche Anlagegrenzwert wird von heute 4, 5 oder 6 V/m auf einheitliche 6 V/m harmonisiert. Der bestehende IGW bleibt unverändert.
- Bei konventionellen Antennen gilt der Tagesmittelwert der Strahlung als Bewertungsgrundlage (im Gegensatz zur heutigen Maximalwert-Betrachtung). Für adaptive Antennen reicht die Umsetzung der mit der Revision der NISV von 2019 implementierten neuen Regelung.
- Bei der Berechnung der Exposition für den konventionellen Teil einer Anlage wird der Tagesmittelwert durch einen fixen, einheitlichen Reduktionsfaktor von 2,5 für die Sendeleistung berücksichtigt. Im Betrieb kann die Einhaltung des Tagesmittelwerts durch eine Softwarelösung sichergestellt werden.
- Realistischere Berechnung der Feldstärke, indem Dämpfungseffekte besser berücksichtigt werden.
- Hochrechnung auf die höhere Leistung nach einer Abnahmemessung (ohne erneute Bewilligung), wenn diese tiefere Werte ergibt als berechnet.
- Der Einspracheradius für Antennenanwohnende wird als fixer Perimeter auf 1 km festgesetzt.
- Mikrozellen bis 100 W ERP können ohne Nachweis der Einhaltung des AGW betrieben werden, aber einfache Distanzregelungen zur Einhaltung des IGW müssen berücksichtigt werden.
- Pro Standortdatenblatt werden höchstens fünf OMEN ausgewiesen. Gemäss geltender NISV ist pro Anlage die elektrische Feldstärke an den drei höchstbelsteten OMEN anzugeben. In der Praxis werden allerdings zum Teil weit mehr OMEN ausgewiesen.
- Unbebaute Parzellen müssen neu nur noch berücksichtigt werden, wenn bereits ein Bauvorhaben vorliegt.

8.3.2 Bewertung

8.3.2.1 Leistungsfähigkeit und Kosten

Mit den verschiedenen Massnahmen kann das Leistungspotenzial insgesamt um den Faktor 4,4 gesteigert werden. Mit dieser zusätzlichen Sendeleistung kann 5G auf den meisten bestehenden Anlagen installiert und in Betrieb genommen werden. Um die Leistungsfähigkeit von 5G gemäss ITU IMT-2020 zu erreichen, werden noch rund 7500 zusätzliche Standorte sowie Nachrüstungen an allen bestehenden Anlagen benötigt. Die notwendigen finanziellen Mittel betragen nach Schätzungen der Branche 3,2 Milliarden Franken für Investitionen und 0,8 Milliarden Franken für den Betrieb über fünf Jahre.

Die Harmonisierung des AGW (von 4 oder 5 V/m auf 6 V/m) führt nicht nur zu einer Leistungserhöhung um den Faktor 1,44, sondern auch zu einer Vereinfachung des Vollzugs der NISV. Durch die Einführung eines fixen Tagesmittel-Reduktionsfaktors für die Sendeleistung bei der Berechnung der Exposition entspricht die massgebliche Sendeleistung der heute im Durchschnitt abgestrahlten. Die Befreiung der Mikrozellen bis 100 W ERP vom AGW fördert und beschleunigt die Verdichtung des Mobilfunknetzes mit Kleinzellen. Mit der Beschränkung der OMEN im Standortdatenblatt wird der Aufwand bei der Berechnung und den Kontrollmessungen reduziert.

8.3.2.2 Exposition

Die Zunahme der Sendeleistung um den Faktor 4,4 bewirkt eine Zunahme der maximalen Downlink-Exposition um den Faktor 2,1 ($\sqrt{4{,}4}$). Auch im Durchschnitt wird der Downlink höher. Beispielsweise hat der fixe Tagesmittel-Reduktionsfaktor von 2,5 zur Folge, dass selbst eine Antenne, die gut ausgelastet ist, 2,5-mal stärker senden darf als heute, was die

Exposition um 58 Prozent ($\sqrt{2,5}$) erhöht. Damit kann der Tagesmittelwert deutlich über 6 V/m liegen, was durch eine Softwarelösung verhindert werden soll.

Die Uplink-Exposition ändert sich im Vergleich zu heute nicht wesentlich, weil das Netz wenig verdichtet wird.

8.3.3 Umsetzung

8.3.3.1 Notwendige Anpassungen und Zuständigkeiten

Die zur Umsetzung der Option notwendigen Anpassungen liegen in der Kompetenz des Bundesrates bzw. im Aufgabenbereich des BAFU. Die Bewilligungsverfahren liegen in der Zuständigkeit der Kantone. Es ergibt sich Anpassungsbedarf bei der NISV und den einschlägigen Vollzugsempfehlungen von Bund und Kantonen.

Änderungen der zahlreichen bestehenden Anlagen haben ein ordentliches Baubewilligungsverfahren zu durchlaufen, da die Änderungen nicht geringfügig sind sowie nicht den Bagatellkriterien der BPUK-Empfehlung entsprechen. Für die Vollzugsbehörden ergibt sich daher gegenüber heute ein deutlicher Mehraufwand.

Auch wenn für die Leistungssteigerungen nach Abnahmemessungen kein Baubewilligungsverfahren mehr durchlaufen werden muss, muss anhand der aktualisierten Standortdatenblätter dennoch die Einhaltung der Grenzwerte geprüft werden. Diese Prüfung ist genauso aufwendig wie für den Neubau einer Anlage und bedingt unter Umständen eine erneute Standortbegehung und Modellierung. Während sich der Aufwand für die Betreiberinnen reduziert, erhöht er sich aufseiten der Vollzugsbehörde. Dasselbe gilt, wenn nur noch fünf OMEN pro Standort ausgewiesen werden, da die Einhaltung des AGW für alle OMEN in der Umgebung der Anlage sichergestellt werden muss. Aufgrund fehlender Transparenz des Verfahrens ist mit vielen Anfragen aus der Bevölkerung zu rechnen.

Auch für die Betreiber erhöht sich der Aufwand pro Standort (Prüfung aktualisierter Standortdatenblätter, Messungen, neue Software-Funktionen etc.), was aber durch die reduzierte Anzahl neuer Anlagen teilweise kompensiert wird.

8.3.3.2 Zeitrahmen

Für die Revision der NISV und die Anpassung der Vollzugshilfen ist mit einem Zeithorizont von zwei bis drei Jahren zu rechnen. Anschliessend kann die Option rasch umgesetzt werden. Bei der Ausgestaltung der Übergangslösungen ist darauf zu achten, dass ein übermässiger administrativer Aufwand für die Behörden und Betreiber vermieden wird. Die notwendigen Arbeiten im Zusammenhang mit der Anpassung der NISV beanspruchen rund zwei Jahre. Der Zeitbedarf für den Bau von 7500 neuen Anlagen und Nachrüstungen auf allen bestehenden Anlagen für den vollständigen 5G-Ausbau wird auf 10 bis 20 Jahre geschätzt. Bei einer gegenüber heute unveränderten Neubauquote könnte der Aufbau eines flächendeckenden und leistungsfähigen 5G-Netzes aber deutlich länger dauern.

Die Option eröffnet die Möglichkeit, 5G mit einer beschränkten Qualität zu realisieren. Indem die Beurteilung aufgrund der zeitlichen Mittelung anstelle des maximalen Betriebszustands einer Grenzwerterhöhung gleichkommt, findet eine gewisse Aufweichung der Vorsorge statt, resultierend in einer Erhöhung der Exposition der Anwohnenden von Antennen.

8.4 Option 4: Erhöhung Anlagegrenzwert auf 11,5 V/m pro Betreiber

8.4.1 Beschreibung

Der AGW wird auf 11,5 V/m angehoben.

Der AGW gilt neu nur für die Antennen eines einzelnen Betreibers und nicht wie bisher für die gesamte Anlage.

8.4.2 Bewertung

8.4.2.1 Leistungsfähigkeit und Kosten

Die Leistungsfähigkeit der bestehenden Sendeanlagen wird um einen Faktor 4 pro Betreiber erhöht. Damit wird die erstmalige Erweiterung bestehender Standorte mit 5G und gleichzeitig der Weiterbetrieb von 3G und 4G ermöglicht. Die Option erlaubt insbesondere in Agglomerationen und Städten die Einführung von 5G auf den bestehenden Standorten, die heute weitgehend keine Ausbaureserven mehr aufweisen.

Anlagen, die heute nur durch einen einzelnen Betreiber genutzt werden, stehen neu auch den anderen Betreibern zur Verfügung, soweit dies realisierbar ist. Dadurch wird der Wettbewerb zwischen den drei Anbietern gestärkt, womit eines der Ziele des FMG erfüllt wird.

Es entstehen an verschiedenen OMEN an unterschiedlichen Standorten unterschiedliche Expositionen, je nachdem, wie viele Betreiber sich die Anlagen teilen.

Rund 22 Prozent der Standorte werden bereits heute gemeinsam betrieben. Für die Abschätzung der zusätzlichen Anlagen wird davon ausgegangen, dass sowohl in urbanen und suburbanen als auch in ruralen Gebieten 50 Prozent der verbleibenden Anlagen zusätzlich gemeinsam genutzt werden können. Neben diesen 3500 Mitbenutzungen erfolgen an 3000 Standorten Nachrüstungen. Demzufolge werden die finanziellen Mittel auf rund 900 Millionen Franken für Investitionen und auf 300 Millionen Franken für den Betrieb über fünf Jahre geschätzt. Wenn die 5G-Anlagen mit adaptiven Antennen ausgerüstet werden können, ist der Aufbau eines leistungsfähigen und flächendeckenden 5G-Netzes gemäss ITU IMT-2020 innert eines raschen Zeitrahmens möglich.

8.4.2.2 Exposition

Die Leistungserhöhung hat an bestimmten Orten eine Erhöhung der Exposition um den Faktor 4 zur Folge. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Leistungen auf den AGW von 11,5 V/m optimiert werden, entstehen an den höchstbelasteten OMEN maximale Feldstärken zwischen 11,5 und 16,3 V/m. Die maximale theoretische Exposition beim höchstbelasteten OMEN liegt bei rund 20 V/m, was nur vorkommt, wenn der höchstbelastete OMEN für alle drei Betreiber identisch ist. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen Expositionen unter diesen Werten liegen, da es selten auftritt, dass alle drei Anlagen der drei Betreiber beim höchstbelasteten OMEN gleichzeitig mit maximaler Leistung senden.

Die Exposition durch den Downlink ist etwas weniger ausgeprägt als bei der Option 5 (vgl. *Kap. 8.5.2.2*).

Die Option begünstigt zudem den Ausbau der bestehenden Netze mit Makrostandorten. Die Exposition durch Endgeräte bleibt damit ungefähr gleich, weil sich das Antennennetz nur geringfügig verdichtet.

8.4.3 Umsetzung

8.4.3.1 Notwendige Anpassungen und Zuständigkeiten

Falls die Anlagedefinition mit den Bestimmungen des USG vereinbar ist (was noch zu prüfen ist), kann die Regelung in der NISV erfolgen (AGW und Anlagedefinition, Aufhebung des engen räumlichen Zusammenhangs). Sie liegt damit im Verantwortungsbereich des Bundesrates.

Der Koordinationsaufwand zwischen den Betreibern wird geringfügig kleiner, da es zu den Anlagen ein Dossier pro Betreiber gibt.

Die NIS-Datenbank des BAKOM muss, als Kontrollinstrument, angepasst werden.

Für die Vollzugsbehörden ergibt sich gegenüber heute ein deutlicher Mehraufwand, da eine Vielzahl neuer Anlagen und zahlreiche Umrüstungen bewilligt und kontrolliert werden müssen.

8.4.3.2 Zeitrahmen

Die notwendigen Arbeiten im Zusammenhang mit der Anpassung der NISV beanspruchen rund zwei Jahre. Der Zeitbedarf für die Nachrüstung von 3000 und die Mitbenutzung von 3500 bestehenden Anlagen für den vollständigen 5G-Ausbau wird auf 0 bis 10 Jahre geschätzt.

Die Option ermöglicht den Ausbau auf bestehenden Standorten und benötigt vorerst keine neuen Standorte. Um die volle Leistungsfähigkeit von 5G nach der Definition der ITU mit IMT-2020 zu erschliessen, werden 3500 bestehende Mobilfunkanlagen durch Mitbenutzung ausgebaut sowie die bestehenden Anlagen mit 5G erweitert. Eine spätere Ausserbetriebnahme von 3G oder 4G ermöglicht die Migration von deren Leistung in das 5G-Netz.

8.5 Option 5: Erhöhung Anlagegrenzwert auf einheitliche 20 V/m

8.5.1 Beschreibung

Der AGW wird auf 20 V/m angehoben.

Der Einspracheperimeter wird mit dem Ziel erweitert, dass bei nachträglichen Änderungen an Anlagen keine erneuten Baubewilligungen notwendig sind, weil der Kreis der Einspracheberechtigten nicht vergrössert wird.

8.5.2 Bewertung

8.5.2.1 Leistungsfähigkeit und Kosten

Mit der Erhöhung des Anlagegrenzwertes auf einheitlich 20 V/m wird an allen bestehenden Mobilfunkanlagen genügend Leistungsreserve geschaffen, um 5G flächendeckend gemäss den Qualitätsvorgaben der ITU (IMT-2020) einzuführen. Damit kann eine Zielsetzung des FMG erreicht werden, und die drei Anbieter können ihre Absicht, ihren Kunden 5G flächendeckend (d. h. draussen, in Gebäuden und mobil) und in hoher Qualität anzubieten, zügig in die Tat umsetzen.

Die Leistungsfähigkeit der bestehenden und der neu zu erstellenden Mobilfunkstandorte erhöht sich um einen Faktor 16 (verglichen mit einem AGW von 5 V/m). Die bestehenden Anlagen können somit für einen zeitnahen flächendeckenden Ausbau eines leistungsfähigen 5G-Netzes genutzt werden. Akquisition und Bau neuer Standorte begrenzen sich auf ein Minimum, beispielsweise beim Ersatz von wegfallenden Standorten oder beim Schliessen von schon heute bestehenden Abdeckungslücken.

Für die Abschätzung der Kosten wird davon ausgegangen, dass alle Standorte mit 5G und adaptiven Antennen ausgerüstet werden und zusätzlich bei rund der Hälfte der Hotspot-Gebiete (heutige Mikrozellen) eine Kleinzelle zur Anwendung kommt (rund 2000 Kleinzellen-Verdichtungen). Die entsprechenden finanziellen Mittel betragen nach Schätzungen der Branche 1,0 Milliarden Franken für Investitionen und 300 Millionen Franken für den Betrieb über fünf Jahre.

8.5.2.2 Exposition

Im ungünstigsten Fall nimmt die maximale Downlink-Exposition (als Feldstärke) an höchstbelasteten OMEN um einen Faktor 4 bis 5 zu. Dank moderner Technologien dürfte der Unterschied von berechneter maximaler und an einem OMEN gemessener mittlerer Feldstärke grösser ausfallen als dies heute der Fall ist.

Da sich das Netz kaum verdichtet, verringert sich die Leistung der Mobiltelefone nicht.

8.5.3 Umsetzung

8.5.3.1 Notwendige Anpassungen und Zuständigkeiten

Falls die Anhebung des Grenzwerts mit dem Vorsorgeprinzip des USG vereinbar ist (was rechtlich noch zu prüfen ist), kann sie in der NISV erfolgen und liegt damit im Verantwortlichkeitsbereich des Bundesrates.

Da nur die AGW angepasst werden, ist der Initialaufwand für die Behörden überschaubar. Eine revidierte NISV könnte im Verlauf des Jahres 2021 in Kraft treten. Anschliessend ist eine rasche Umsetzung möglich, da der Vollzug der NISV sowie alle etablierten Abläufe unverändert bleiben.

Der Bewilligungs- und Kontrollaufwand für die Vollzugsbehörden steigt stark an, da davon auszugehen ist, dass alle bestehenden und neu zu errichtenden Anlagen rasch mit 5G ausgerüstet werden sollen und deshalb für alle Anlagen in kurzer Zeit ein Baubewilligungsverfahren durchgeführt werden muss. Ebenfalls dürfte der Aufwand für die Bearbeitung von Einsprachen und Rekursen sowie Informations- und Beratungstätigkeit aufgrund des zunehmenden Widerstands der Anwohnenden ansteigen.

8.5.3.2 Zeitrahmen

Mit der Umsetzung der Option kann das gegenwärtige und zu erwartende Datenwachstum für die nächsten Jahre weitestgehend mit den bestehenden Mobilfunkanlagen bewältigt werden. Demzufolge können der Bau Tausender neuer Anlagen und die damit verbundenen zeitlichen Verzögerungen bei der Realisierung von 5G vermieden werden. Damit wird die Basis für die weitere Entwicklung des Mobilfunks gemäss den von der ITU definierten Empfehlungen (IMT-2020) gelegt und der Strategie «Digitale Schweiz» vollumfänglich Rechnung getragen.

Die notwendigen Arbeiten im Zusammenhang mit der Anpassung der NISV beanspruchen rund zwei Jahre. Es werden mit dieser Option nur wenige neue Anlagen benötigt (Verdichtung bei 50 % der heutigen Mikrozellen), und es erfolgt eine Nachrüstung fast aller bestehender Anlagen (inkl. Leistungserhöhungen). Damit wird der Zeitbedarf für einen vollständigen 5G-Ausbau auf 0 bis 10 Jahre geschätzt.

9 Mögliche Konzepte mit Blick auf zukünftige Entwicklungen

Die in *Kapitel 8* beschriebenen Optionen zeigen auf, wie der Ausbau der Mobilfunknetze unter den geltenden Rahmenbedingungen oder durch Anpassungen der NISV in den nächsten Jahren vonstattengehen könnte, um in der Schweiz rasch eine flächendeckende 5G-Versorgung bereitzustellen. Die Entwicklung im Mobilfunk geht jedoch permanent weiter, das übertragene Datenvolumen wird weiter zunehmen und auch die Technologien werden sich weiterentwickeln. In der Forschung stellen sich Institute bereits heute die Frage, wie die Mobilfunktechnologie der sechsten Generation aussehen könnte. Allerdings sind die ersten Publikationen noch sehr generisch und zeichnen erst die Möglichkeiten der zu entwickelnden Technologiebausteine auf.

Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung stellt sich auch die Frage, wie rasch es geht, bis nach Umsetzung der in den Optionen enthaltenen Massnahmen ein erneutes Handeln erforderlich ist. Wie in *Kapitel 4.1* dargestellt, wird auch in Zukunft eine Verdoppelung der mobil übertragenen Datenmenge alle 12 bis 18 Monate erwartet. Es ist daher zu erwarten, dass der Gewinn an Kapazität, der durch den Zubau von Makrozellen oder einer allfälligen Erhöhung der Anlagegrenzwerte erreicht wird, innert weniger Jahre wieder aufgebraucht ist.

Damit die Betreiber und auch der Regulator in einigen Jahren nicht wieder vor den gleichen Fragen stehen wie heute, haben der Schweizerische Städteverband (SSV) und die Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz (AefU) Vorschläge in die Arbeitsgruppe eingebracht, die auf die mittelfristige Entwicklung des Mobilfunks zielen. Dabei soll nicht impliziert werden, dass mit einer Umsetzung dieser Möglichkeiten zugewartet werden muss, vielmehr sollen die nötigen Weichenstellungen zeitnah erfolgen. Die Hauptstossrichtungen sind eine Förderung von Kleinzellen sowie die Trennung von Indoor- und Outdoor-Versorgung, basierend auf einer ausreichenden Verfügbarkeit von Glasfasernetzen.

Ob und wie diese Netzstrukturen mit der internationalen Entwicklung der Mobilfunkstandards vereinbar sind, lässt sich heute schwer abschätzen.

9.1 Förderung von Kleinzellen in Hybridnetzen durch verstärkte Zusammenarbeit zwischen Städten/Gemeinden und Mobilfunkbetreibern

9.1.1 Beschreibung

In Gebieten mit hohem Datenverkehr erfolgt bereits heute eine Verdichtung der Netze durch zusätzliche Antennen an neuen Standorten, um so neue Kapazitäten zu schaffen. In den *Kapiteln 5.7 und 5.8* wurde gezeigt, dass sich damit auch die Gesamtexposition der Nutzerinnen und Nutzer reduzieren lässt. Hauptziel des vom SSV eingebrachten Konzeptes ist es, diese Entwicklung zu unterstützen, ohne die bestehenden Bestimmungen der NISV und der Vollzugsinstrumente anpassen zu müssen.

Der weitere Ausbau der Mobilfunknetze und die Einführung von 5G sollen durch eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen den kommunalen Behörden und den Mobilfunkbetreibern vorangebracht werden, die als Public-Private-Partnership (PPP) konzipiert wird. Mit einem gemeinsamen Vorgehen sollen die Voraussetzungen für den Ausbau von 5G geschaffen werden, wobei – im Unterschied zum heute gebräuchlichen hybriden Netz – Kleinzellen als tragende Säule der Mobilfunkversorgung gefördert werden sollen. Zudem übernehmen leistungsschwache und zum Beispiel in der Nacht abschaltbare Indoor-Mobilfunkanlagen die Versorgung innerhalb der Gebäude für quasistationäre Breitbandanwendungen (Video-Streaming, industrielle Anwendungen, IoT etc.). Im Ergebnis soll das Mobilfunkkonzept eine qualitativ und quantitativ der Nachfrage entsprechende Mobilfunkversorgung der Gemeinden, der Wirtschaft und der Konsumenten unter Beibehaltung der heutigen Grenzwerte ermöglichen.

Eine auf urbane Verhältnisse zugeschnittene Netzarchitektur und -topologie kann dabei wie folgt ausgebaut werden:

- Die bestehenden Makrozellen werden prioritär zur Grundversorgung, insbesondere für Sicherheitsdienste, sich schnell bewegende Endgeräte und als Rückfallebene bei Störungen eingesetzt. Soweit es die Versorgungsqualität

verlangt und eine Versorgung durch Kleinzellen aus technischen Gründen nicht möglich oder unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten unverhältnismässig ist, sollen neue Makroanlagen im Rahmen des Konzepts realisierbar bleiben.

- Kleinzellen werden als tragender Teil des Mobilfunkkonzepts eingebunden – dort, wo Makrozellen überlastet sind oder die Versorgung aus anderen Gründen ungenügend ist, und auch dort, wo hohe Datenmengen im öffentlichen Raum anfallen.
- Ein stärkerer Fokus wird auf die Trennung von Outdoor- und Indoor-Versorgung gelegt. Letztere kommt mit geringen Sendeleistungen aus und kann im Sinne der Eigenvorsorge zur Senkung der persönlichen Exposition abgeschaltet werden.
- Die Mitbenutzung der Kleinzellen durch alle Betreiber wird insbesondere für die feinmaschigen Kleinzellen aus Kostengründen und Gründen der Gleichbehandlung aller Anbieter bei einer PPP-Lösung angestrebt.

Städte und Gemeinden, die bereit sind, zusammen mit der Branche im Sinne einer PPP ein Mobilfunkkonzept zu entwickeln und dessen Umsetzung zu unterstützen, erhalten mit dieser Option ein Planungs- und Umsetzungsinstrument.

9.1.2 Bewertung

Die Leistungsfähigkeit hybrider Netze mit verstärktem Fokus auf Kleinzellen ist theoretisch gut ausbaubar: Gelangt eine Kleinzelle an ihre Leistungsgrenze, wird sie weiter unterteilt. Die Einhaltung der unveränderten Anlagegrenzwerte (AGW) bedingt allerdings den Ausbau der Anzahl Standorte mit Kleinzellen.

Im internationalen Kontext wird 5G auf der bestehenden 4G-Infrastruktur realisiert. Diese ist in der Schweiz besonders in urbanen und suburbanen Gebieten bereits weitgehend ausgeschöpft. Mit einem reinen Kleinzellennetz ohne zusätzlich ausgebaute Makrostandorte können punktuell qualitative Einbussen in der (Grund-)Versorgung nicht ausgeschlossen und damit die Anforderungen gemäss dem 5G-Standard ITU IMT-2020 nicht überall erfüllt werden. Es ist deshalb nicht auszuschliessen, dass für dieses Mobilfunkkonzept zusätzliche Makrozellen benötigt werden, zu welchen die kommunale Behörde im Rahmen der PPP (eigene Gebäude) ebenfalls Hand bieten müsste.

Die Innenraumversorgung in Regie der Bewohnenden wird voraussichtlich dazu führen, dass die Versorgung der Innenräume in Wohngebieten nicht vollumfänglich den Anforderungen an 5G nach der Zielsetzung von ITU IMT-2020 entsprechen wird. Auch zukünftige IoT-Anwendungen und weitere spezielle Dienstleistungen können betroffen sein. Letztlich muss die Politik die Frage beantworten, wieweit diese Dienste innerhalb von Gebäuden durch die Betreiber und mittels Anlagen im Freien zwingend angeboten werden müssen oder ob nicht vielmehr bedarfsgerechte Lösungen zum Zug kommen sollten.

Die Anzahl zusätzlich benötigter Mobilfunkstandorte ist abhängig vom konkret gewählten Konzept und den vorherrschenden Rahmenbedingungen der jeweiligen Stadt oder Gemeinde. Kommunen mit bereits ausgebautem Breitbandnetz, intelligenter Versorgung des öffentlichen Raums sowie eigenen Gebäuden sind dazu privilegiert. Dadurch können Mikrozellen, die grundsätzlich von einem vereinfachten Bewilligungsverfahren profitieren, einfach und kostengünstig realisiert und betrieben werden, wobei die Stadt oder Gemeinde dazu einen Beitrag leisten muss (z. B. Mithilfe bei Standortsuche, günstige Mietkonditionen, Strompreise oder günstiger Zugang zu Glasfasernetz). In urbanen Gebieten ist mit einer hohen Anzahl neu zu erstellender Mikrozellen zu rechnen. Dadurch entsteht durch Skaleneffekte eine Kostensenkung für die einzelne Anlage.

Im Rahmen einer PPP kann die Planung sofort gestartet werden, wofür ein gemeinsam entwickeltes Konzept die Basis bildet. Die Voraussetzung für eine PPP ist, dass sowohl die Stadt (oder die Gemeinde) und die Anbieter das Ziel einer qualitativ guten Versorgung mit 5G verfolgen. Die Definition «qualitativ gute Versorgung» wird von den Städten und Gemeinden in Zusammenarbeit mit den Anbietern erarbeitet und kann vom Anspruch einer Innenraumversorgung durch Basisstationen im Aussenraum abweichen.

Mit dem durch den Städteverband eigebrachten Konzept lässt sich die Netzstruktur im Sinne einer Langzeitentwicklung laufend dem Bedarf anpassen.

9.1.3 Exposition

Kleinzellennetze führen einerseits zu einer gleichmässigen Verteilung der Strahlenbelastung und damit in der Fläche zu einer geringen Zunahme der mittleren Immissionen durch den Downlink. Aufgrund der starken Zunahme der Anzahl Antennen würde die Zahl der OMEN, die nahe bei Mobilfunkanlagen liegen, zunehmen. Im Gegenzug würden im Aussenraum hohe Expositionsspitzen, wie sie in der weiteren Umgebung von stark ausgelasteten Makrozellen auftreten können, vermieden oder vermindert.

Durch die angestrebte Trennung von Indoor- und Outdoor-Versorgung können die höchsten Downlink-Expositionen leicht zu-, die Uplink-Expositionen stark abnehmen, falls eine optimale Innenraumversorgung gewährleistet werden kann. Zudem erhält die Bevölkerung dank Abschaltmöglichkeiten der eigenen Indoor-Anlagen mehr Einfluss auf die selbst verursachten Immissionen. Solche Abschaltungen können aber zu einer schlechteren 5G-Versorung führen, und beispielsweise Rettungsdienste oder Haushaltgerätehersteller können sich im Innenraum nicht mehr auf eine vorhandene Mobilfunkversorgung verlassen.

Wie in *Kapitel 5.8* gezeigt, resultiert aus einem Mobilfunknetz, das den Ausbreitungsverlust durch kleinere Zellen und zusätzliche Indoor-Abdeckung verringert, eine kleinere Gesamtexposition der Nutzer als aus einem grosszelligen Netz. Dank der kurzen Distanz zur nächsten Antenne wird die Exposition der Endgeräte-Nutzenden im Aussenraum um das 2- bis 10-fache reduziert, bei einer zusätzlichen Innenraumversorgung um das 10- bis 600-fache. Für Nichtnutzer können die Immissionen um einen Faktor 1,6 (im Aussenraum) bis 10 (in versorgten Innenräumen) zunehmen. In nicht versorgten Innenräumen wird die Exposition für Nichtnutzer nicht zunehmen, hingegen werden die Mobiltelefone der Nutzer mit maximaler Leistung senden.

9.1.4 Umsetzung

Allenfalls muss über das FMG eine Rechtsgrundlage geschaffen werden, um die Mobilfunkbetreiber zur Kooperation zu verpflichten, falls sie sich nicht freiwillig an einer PPP beteiligen. Dabei müsste auch die Kooperation im Rahmen des vorgeschlagenen Mobilfunkkonzepts und für den Bau und Betrieb eines gemeinsamen Kleinzellennetzes geregelt werden. Eine Alternative wäre eine auf Freiwilligkeit basierende Branchenlösung, wobei auch hier die Konformität mit dem FMG und den Konzessionen geprüft werden muss (Infrastrukturwettbewerb).

In den Kantonen ist eine Anpassung der Baugesetzgebung erforderlich, in den beteiligten Städten und Gemeinden ein Legislativauftrag zur Umsetzung der Option im Sinne einer PPP. Für die Städte und Gemeinden ergibt sich ein Mehraufwand, wenn sie aktiv in die Netzplanung und Standortsuche für Kleinzellen eingebunden werden. Ein Mehraufwand ergäbe sich wahrscheinlich auch durch die vermehrte Informations- und Beratungstätigkeit, die Gemeinden und Städte selbst leisten müssten.

Der Initialaufwand im Zusammenhang mit der Erstellung des Konzepts ist bei allen Beteiligten beträchtlich (Absichtserklärung, Einigung, Ausarbeitung, politische Arbeit). Ein standardisierter Netzausbau wäre schwieriger, da die Betreiber sich von Fall zu Fall mit den Städten bzw. Gemeinden einigen müssten. Dieser Aufwand kann sich als Verzögerung im Netzausbau niederschlagen. Später sinkt der Aufwand, weil weniger Akquisitionsaufwand betrieben werden muss, weniger Bewilligungs- und Rechtsmittelverfahren durchlaufen werden müssen und die Planungssicherheit steigt – dies allerdings nur, soweit die Städte und Gemeinden zu einem solchen Konzept Hand bieten.

Auf der Grundlage eines zwischen öffentlicher Hand und Betreiberseite gemeinsam entwickelten und getragenen Mobilfunkkonzepts kann der Ausbau des kleinzelligen Netzes sukzessive aufgrund der Nachfrage erfolgen, und die Netzstruktur lässt sich im Sinne einer Langzeitentwicklung laufend dem Bedarf anpassen.

9.2 Trennung von Innen- und Aussenversorgung

9.2.1 Beschreibung

In den *Kapiteln 5.7 und 5.8* wurde gezeigt, dass die Exposition durch Mobilfunk am stärksten minimiert werden kann, wenn die Signale über Glasfasernetze möglichst nahe an den Endkunden geführt werden und die Reststrecke durch die Luft möglichst kurz und hindernisfrei ist. Das von den Ärztinnen und Ärzten für Umweltschutz (AefU) eingebrachte Konzept sieht daher eine konsequente Trennung der Versorgung von Aussen- und von Innenräumen vor, um die Exposition der Bevölkerung gegenüber heute sogar zu verringern. Ein regulatorisches Mittel, um diese Entwicklung zu fördern, könnte eine Senkung des AGW für Mobilfunk auf 0,6 V/m sein. Dabei soll die Anwendung des AGW auch auf Kleinzellen (<6 W ERP) und Anlagen, die nur temporär senden, erweitert werden.

Mit Basisstationen im Freien darf gemäss diesem Konzept keine Innenversorgung von Gebäuden und Fahrzeugen beabsichtigt sein. Gebäude sind grundsätzlich mittels Festnetzanschlüssen und optional mit ergänzenden Kleinstfunkanlagen zu erschliessen. Funkanlagen in Gebäuden dürfen nicht für eine Versorgung des Aussenraums ausgelegt sein. Die Innenraumversorgung muss strahlungsarm erfolgen. Die Eigentümer und Mieter von Liegenschaften entscheiden eigenverantwortlich, ob in ihren Innenräumen die mobile Versorgung erforderlich respektive erwünscht ist und verwenden gegebenenfalls eine strahlungsarme Infrastruktur mit möglichst geringer Sendeleistung, die Nachbarräume nicht signifikant belastet.

9.2.2 Bewertung

Die vorgeschlagene Trennung der Aussen- und Innenversorgung bedingt einen grundlegenden Umbau der heutigen Mobilfunkversorgungskonzepte. Denn bei allen Sendern, die heute an Orten mit empfindlicher Nutzung (OMEN) eine Feldstärke nahe beim Grenzwert erzeugen, muss die Leistung um einen Faktor 100 reduziert werden, die Antenne erhöht oder deren Abstrahlwinkel verändert werden. Die Empfangsqualität des heutigen Mobilfunknetzes wird dadurch stark abnehmen, und eine Steigerung der Versorgungsqualität gemäss ITU IMT-2020 ist nicht möglich.

9.2.3 Exposition

Bei einer nur auf Aussenversorgung ausgelegten Funkzelle kann die Sendeleistung reduziert werden, weil weniger Distanzen und dämpfende Hindernisse überwunden werden müssen. Damit wird die Exposition durch den Downlink im Freien reduziert und auch die Belastung der Antennenanwohnenden gesenkt.

In Gebäuden kann die Downlink-Exposition höher sein als heute, weil sich zahlreiche kleine Antennen nahe bei den Menschen befinden. Durch eine bedarfsgerechte Steuerung (wie bei Schnurlostelefon-Basisstationen) und optimierte Platzierung der Basisstationen lässt sich die Downlink-Exposition auch im Innenraum tief halten.

Bei der Benützung des Mobiltelefons im Freien nimmt die Exposition durch den Uplink ab, wenn die Funkstrecke zwischen Telefon und Basisstation kürzer wird und weniger dämpfende Hindernisse überwunden bzw. durchdrungen werden müssen. Auch im versorgten Innenraum ist der durchschnittliche Uplink geringer als heute, und Situationen mit maximaler Leistung durch schlechten Empfang sind seltener. In einem nicht versorgten Innenraum wird es praktisch nicht möglich sein, mobil zu telefonieren. Bei schlechtem Signal im Innenraum wie auch draussen wird das Mobiltelefon mit maximaler Leistung senden, was eine höhere Exposition der Nutzer zur Folge hat.

Die Mobilfunkbranche geht davon aus, dass eine stark verminderte Versorgungsqualität zu einem Rückgang der mobilen Kommunikation führt und neue Anwendungen und Dienstleistungen in der Schweiz gar nicht angeboten werden. Dies führt zu einer weiteren Reduktion der Exposition.

9.2.4 Umsetzung

Dieser Vorschlag ist infolge verschiedener Auswirkungen, insbesondere auf den Zweckartikel des FMG, nicht ohne Änderungen auf Gesetzesstufe umsetzbar. Zudem müssen voraussichtlich bilaterale Verträge betreffend Produktekonformität und Handelshemmnisse (zusätzliche Anforderungen an WLAN-Sender, Mobilfunksender und Fahrzeuge) sowie die Mobilfunk-Konzessionen angepasst werden. Die Umsetzung wird mehrere Jahre in Anspruch nehmen, weil voraussichtlich die Beteiligung des Parlaments notwendig ist.

Die Senkung des Anlagegrenzwertes auf 0,6 V/m und die Erweiterung seines Anwendungsbereichs auf Kleinanlagen sowie auf nur temporär sendende Anlagen erfordert eine Anpassung der NISV, was in den Verantwortlichkeitsbereich des Bundesrates fällt.

Im Vollzug wird der Aufwand der Behörden aufgrund der grossen Anzahl der neuen zu kontrollierenden Aussenanlagen drastisch ansteigen. Bei den Anlagen im Inneren von Gebäuden, beispielsweise in Mietwohnungen, bestehen offene Fragen (z. B. Installationen gegen den Willen der Mieter, Kostentragung, Prüfung und Kontrolle, Aufwand der Messfirmen und Eignung der heutigen Messmittel).

10 Begleitende Massnahmen

Neben den Optionen mit direkten Auswirkungen auf die Netze und die Exposition der Bevölkerung mit NIS hat die Arbeitsgruppe begleitende Massnahmen entwickelt, die ohne direkte Auswirkungen auf Netze oder Exposition bleiben. Diese Massnahmen können grundsätzlich mit allen Optionen verbunden werden. Ihre Bewertung folgt deshalb anderen Kriterien als jene der Optionen. Die Arbeitsgruppe hat folgende Stossrichtungen und Massnahmen entwickelt:

- Vereinfachungen und Harmonisierungen im Vollzug (*Kap. 10.1*)
- Monitoring der Exposition und der Gesundheitsauswirkungen (*Kap. 10.2*)
- Information und Sensibilisierung der Bevölkerung (*Kap. 10.3*)
- Förderung der Forschung im Bereich Mobilfunk und Gesundheit (*Kap. 10.4*)
- Umweltmedizinische NIS-Beratungsstelle (*Kap. 10.5*)
- Austauschplattform «Mobilfunk der Zukunft» (*Kap. 10.6*)

10.1 Vereinfachungen und Harmonisierungen im Vollzug

10.1.1 Beschreibung

Der Vollzug basiert heute auf Vollzugsempfehlungen, Messempfehlungen und Dokumentationen, die vor einigen Jahren entwickelt worden sind. Diese Grundlagen sollen aktualisiert werden, mit dem Ziel, Vereinfachungen zu ermöglichen, Prozesse zu beschleunigen und die Harmonisierungen im Vollzug zu stärken. Die Vollzugsmittel sollen dabei die Möglichkeiten der Digitalisierung nutzen. Zudem soll der Aufwand, der von Mobilfunkanbietern und Behörden in den Bewilligungsverfahren geleistet werden muss, reduziert werden, ohne dass dadurch die inhaltliche Qualität der Bewilligungsverfahren und die Rechtssicherheit geschmälert werden. Und letztlich sollen Ungereimtheiten, die sich im Vollzug gezeigt haben, beseitigt werden.

Eine durch die BPUK im Januar 2019 eingesetzte Arbeitsgruppe evaluierte Möglichkeiten eines effizienteren Vollzugs und Vereinfachungen im Rahmen des Bewilligungsverfahrens. Verbesserungen werden insbesondere im Hinblick auf die Reduktion des Aufwands in verschiedenen Bereichen (Erstellung und Prüfung Standortdatenblatt, Abnahmemessungen, Bearbeitungen von Einsprachen, Betriebskontrollen) sowie in Bezug auf technische Vereinfachungen angestrebt.

Die Evaluation zeigte, dass die folgenden Massnahmen umgesetzt werden sollten:

- Verbesserung der Reproduzierbarkeit und der Vergleichbarkeit von Berechnung und Messung der Strahlung sowie eine realistischere Berechnung/Prognosemöglichkeit der Strahlenbelastung
- Digitalisierung der Dokumentation und des Datenaustausches im Rahmen der Bewilligungsverfahren für Mobilfunkantennen (u. a. elektronische Files, Fotodokumentationen, Koordinaten, 3D-Gebäudemodelle, gültige Antennendiagramme)
- Automatisierter Abgleich und Erweiterung der NIS-Datenbank. Die Datenbank soll besser auf die Bedürfnisse der Vollzugsbehörden in Bezug auf einfachere respektive automatisierte Kontrollen von Mobilfunkanlagen angepasst werden. Auch sollte sie um die Möglichkeit zur Implementierung der 5G-Technologie erweitert und in Bezug auf Performance und Stabilität verbessert werden.
- Nicht-Berücksichtigung von leeren Parzellen bei Bewilligungen
- Überprüfung der Bagatellkriterien der BPUK-Empfehlung Mobilfunk
- Reduktion des Aufwands für die Erstellung und Prüfung der Standortdatenblätter unter Vermeidung von Abstrichen hinsichtlich der Transparenz
- Prüfung, wieweit der Aufwand bei Abnahmemessungen und Betriebskontrollen reduziert werden kann

Im Weiteren wird vom BAFU bis Ende 2019 ein Nachtrag zur geltenden Vollzugshilfe für Mobilfunkanlagen erarbeitet, der aufzeigt, wie adaptive Antennen in der Bewilligung beurteilt werden können. Das METAS aktualisiert die Messempfehlung auf 5G und publiziert diese bis Ende 2019. Bis zu diesem Zeitpunkt werden adaptive Antennen wie bisherige statische Antennen beurteilt. Das BAKOM hat die notwendigen Neuentwicklungen der NIS-Datenbank aufgrund einer Neudefinition der Informatik-Prioritäten im BAKOM um mehrere Jahre verschoben.

10.1.2 Kosten und Finanzierung

Die Kosten der Massnahmen können nicht im Voraus quantifiziert werden. Sie sind als Investitionen in eine Verbesserung und Vereinfachung des Vollzugs zu werten. Die Kosten werden teilweise durch den Bund und teilweise durch die Kantone als Vollzugsbehörden getragen werden müssen. Den Kosten zur Ausarbeitung von Lösungen werden Einsparungen beim Vollzug folgen.

10.1.3 Erwarteter Nutzen

Die Nutzung der Möglichkeiten, die sich durch Vereinfachungen beim elektronischen Datenaustausch ergeben, wird den Aufwand bei den Mobilfunkbetreibern und auch bei den Behörden senken. Die Verbesserungen bei den Vollzugshilfsmitteln sollen Klarheit schaffen und damit ebenfalls aufwand- und kostensenkend wirken. Die Massnahmen sollen zudem die Flexibilität und Geschwindigkeit erhöhen, damit technische Entwicklungen rascher in den Mobilfunknetzen implementiert werden können. Soweit der Datenschutz dies erlaubt, können die im Vollzug verwendeten Daten auch für Informationszwecke genutzt werden und müssen nicht erneut erhoben werden.

10.1.4 Umsetzung

10.1.4.1 Zuständigkeit

Die Umsetzung der Massnahmen bezüglich Standortdatenblatt, Abnahmemessungen und Bearbeitungen von Einsprachen muss in der NISV, der Vollzugshilfe und der NIS-Datenbank erfolgen (BAFU und BAKOM). Die Vollzugshilfsmittel müssen vom Bund aktualisiert werden.

Die baurechtlichen Vereinfachungen im Vollzug (BPUK-Empfehlung Mobilfunk) sind Sache der Kantone. Die BPUK hat dazu bereits eine Arbeitsgruppe eingesetzt.

10.1.4.2 Aufwand der Behörden

Die Änderung der bestehenden Grundlagen und Verfahren wird initialen Mehraufwand auslösen. Danach sollte der Aufwand insbesondere im Vollzug der Kantone sinken.

10.1.4.3 Zeitrahmen

Die Vollzugshilfe zur NISV und die Messempfehlung werden Ende 2019 vorliegen. Die weiteren Arbeiten der oben genannten Massnahmen sollen 2020 aufgenommen werden.

Die BPUK prüft derzeit in einer Arbeitsgruppe Vereinfachungen im Vollzug.

10.1.4.4 Rechtliche Anpassungen

Es besteht noch keine abschliessende Übersicht, welche Anpassungen an den Rechtsgrundlagen sich allenfalls auf kantonaler Stufe oder beim Bund aufgrund der Überprüfungen als nötig erweisen sollten. Grundsätzlich können wichtige Klärungen, Vereinfachungen und Harmonisierungen innerhalb des geltenden Bundesrechts realisiert werden.

10.1.5 Fazit

Vereinfachungen und Harmonisierungen im Vollzug sind nötig und werden teilweise auch bereits umgesetzt und können grundsätzlich innerhalb des geltenden Bundesrechts realisiert werden.

10.2 Monitoring der Exposition

10.2.1 Beschreibung

Das Postulat Gilli (09.3488) «Elektromagnetische Felder. Monitoring»[103] beauftragte den Bundesrat, die Planung und Umsetzung eines Monitorings der Expositionssituation der Schweizer Bevölkerung betreffend NIS zu prüfen und einen Vorschlag für notwendige Massnahmen zu unterbreiten. 2011 wurde das Postulat vom Nationalrat überwiesen.

Das Bundesamt für Umwelt hat daraufhin mehrere Studien in Auftrag gegeben, um die Machbarkeit eines NIS-Monitorings abzuklären und ein Konzept erarbeiten zu lassen. Diese Grundlagenarbeiten zeigten, dass ein gesamtschweizerisches NIS-Monitoring, das repräsentative Aussagen über die Exposition der Bevölkerung liefert, zwar anspruchsvoll, aber grundsätzlich machbar ist.

Im Dezember 2015 hat der Bundesrat ein Konzept für ein Monitoring elektromagnetischer Felder beschlossen.[104] Dieses Konzept[105] sieht vier Module vor:

- Repräsentative Messungen der Immissionen durch niederfrequente Magnetfelder (von Stromanlagen) und hochfrequente Strahlung (von Mobilfunk- und anderen Funkanwendungen) in definierten Kontexten (inkl. Wohnbereich) mit portablen Messgeräten (Exposimetern). Die Messgeräte sind weitgehend erhältlich und die Methodik ist reif für den operativen Betrieb. Hochfrequente Strahlung und niederfrequente Magnetfelder können im selben Durchgang erfasst werden. In einem ersten Schritt sind die zu erfassenden Kontexte festzulegen. Mindestens eingeschlossen werden sollten:
  - Aussenbereich im Siedlungsgebiet. Dabei sollen die Gemeindetypen gemäss der Gemeindetypologie des Bundesamts für Raumentwicklung berücksichtigt und Wohnlagen unterschiedlicher Zentrumsnähe sowie Industriegebiete unterschieden werden.
  - Innenbereich von Wohnungen, differenziert nach denselben Typen von Wohnlagen.
  - Fahrgastbereich in öffentlichen Verkehrsmitteln.
- Berechnung der Immissionen, die durch Infrastrukturanlagen im Aussenraum verursacht werden (Hochspannungsleitungen, Mobilfunk-, Rundfunksendeanlagen etc.): Immissionsberechnungen können für die Strahlung der Mobilfunk- und Rundfunkanlagen vergleichsweise rasch gemacht werden, da bereits ein vollständiger und aktueller Anlagekataster vorhanden ist. Es ist eine flächendeckende Modellierung mindestens für das Siedlungsgebiet anzustreben. Zu modellieren sind die zeitlich gemittelten Immissionen im Aussenraum, insbesondere an den Fassaden von Gebäuden, in denen sich Menschen während längerer Zeit aufhalten.
- Zusammenführen von kantonalen und kommunalen ortsfesten Immissionsmessungen in eine zentrale Plattform: Ortsfeste Messungen werden bereits von einigen Kantonen und Gemeinden durchgeführt. Diese reichen zwar für die angestrebte repräsentative Aussage über die Exposition der ganzen Bevölkerung nicht aus, liefern jedoch wertvolle Zusatzinformationen über die Schwankungen der Immissionen im Tages- und Wochenverlauf und können für die Validierung der Immissionsberechnungen herangezogen werden.
- Fallstudien zur Exposition der Nutzer durch körpernah betriebene Geräte: Eine repräsentative Erfassung der Exposition der Nutzer durch körpernah betriebene, emittierende Geräte ist angesichts der Vielfalt von Geräten und

Nutzungsbedingungen nicht zu leisten. Für eine ganzheitliche Aussage sollte der Anteil körpernah betriebener Geräte an der Gesamtexposition jedoch nicht gänzlich ausgeklammert werden. An die Stelle von repräsentativen Erhebungen und Modellierungen können Fallstudien treten, um die im Körper wirksame Strahlung bei definierten, typischen Nutzungen zu bestimmen. Im Vordergrund des Interesses stehen dabei vorerst die Endgeräte der Mobilkommunikation.

Mit der Revision der NISV vom 17. April 2019 wurde dem BAFU als Umweltfachstelle des Bundes ausdrücklich die Aufgabe zugewiesen, ein solches NIS-Monitoring aufzubauen, wobei nach den Vorgaben des USG auch die Ergebnisse der wissenschaftlichen Forschung und das Erfahrungswissen zu gesundheitlichen Auswirkungen laufend erfasst und bewertet werden sollen.

10.2.2 Kosten und Finanzierung

Die Kosten des Monitorings insgesamt belaufen sich auf rund 1 Million Franken, verteilt über die ersten drei Jahre, und zusätzlich ist mit wiederkehrenden Kosten von rund 500 000 Franken pro Jahr zu rechnen. Die Kosten sind bereits finanziert.

10.2.3 Erwarteter Nutzen

Mithilfe der zu gewinnenden Daten und Erkenntnisse soll ein wesentlicher Beitrag zur Versachlichung der Diskussion geleistet werden. Zudem wird es möglich werden, allfällige Veränderungen der Situation bei der Einführung neuer Technologien aufzuzeigen. Solide Daten zur Exposition sind eine wichtige Voraussetzung für das Risikomanagement und die weitere Erforschung von allfällig resultierenden Gesundheitseffekten.

10.2.4 Umsetzung

Die Umsetzung dieser Massnahme ist bereits im Gang. Je nach Ausgestaltung werden grössere Ausschreibungsverfahren nötig, welche eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen.

10.2.4.1 Zuständigkeit

Die Aufgabe obliegt gemäss Artikel 19b NISV dem BAFU.

10.2.4.2 Aufwand der Behörden

Für den finanziellen Aufwand siehe *Kapitel 10.2.2*.

10.2.4.3 Zeitrahmen

Erste belastbare Resultate werden frühestens im Jahr 2022 vorliegen.

10.2.4.4 Rechtliche Anpassungen

Die Rechtsgrundlagen liegen vor.

10.2.5 Fazit

Das Monitoring der Exposition und der allfälligen gesundheitlichen Auswirkungen von nichtionisierender Strahlung ist wichtig, um die Diskussion zu versachlichen. Die Aufgabe ist bereits dem BAFU zugewiesen und wird dort zurzeit angegangen. Das Monitoring ist finanziert und wird frühestens 2022 erste Resultate liefern.

10.3 Information und Sensibilisierung der Bevölkerung

10.3.1 Beschreibung

Unter «Information und Sensibilisierung» werden verschiedene Massnahmen zusammengefasst, welche der besseren Information der Bevölkerung dienen sollen. Ziel ist es, mit einer aktuellen, transparenteren Information über die Mobilfunkantennen und deren Betriebsparameter die Bevölkerung sachlich zu informieren und damit unter anderem die Vollzugsbehörden und Mobilfunkbetreiber von einzelfallweisen Auskünften zu entlasten. Heikel ist dabei die Wahrung des Geschäftsgeheimnisses der Mobilfunkbetreiber. Darauf ist bei der Zugänglichmachung der Information zu achten. Insbesondere soll Folgendes geprüft werden:

- Anpassungen an der BAKOM-NIS-Datenbank: Die Massnahme zielt darauf ab, die NIS-Datenbank «auszumisten» und die BAKOM-Übersichtskarte einfacher und relevanter darzustellen. Zu prüfen ist die Einführung eines eigentlichen Online-Katasters mit den Standorten und ausgewählten Sendeparametern aller Antennen, in dem alle in Betrieb stehenden oder in einem Bewilligungsverfahren stehenden Mobilfunkanlagen dargestellt sind (unter Berücksichtigung der Geschäftsgeheimnisse der Betreiber sowie des Datenschutzes der Grundeigentümer und Vermieter der Anlagestandorte). Als Modell kann der Kataster der Stadt Brüssel dienen.[106] Resultate von Abnahmemessungen – allenfalls gar im Betrieb eingestellte Parameter wie Senderichtung, Sendeleistung, Frequenzen – könnten ebenfalls in den Kataster eingetragen werden.
- Darstellung von modellierten Immissionen des elektrischen Feldes von Sendeanlagen in einem der Bevölkerung zugänglichen Online-Kataster (nicht so detailliert, dass eine unrealistische Berechnungsgenauigkeit suggeriert wird).
- Aktualisierung des Leitfadens Mobilfunk für Gemeinden und Städte. Der Leitfaden ist das Produkt einer hervorragenden Zusammenarbeit von Bund, BPUK, Städte- und Gemeindeverband. Der bisherige Leitfaden hat viel zum Verständnis der Thematik und damit zur Unterstützung der Gemeinden beigetragen. Er unterstützt die Gemeinden auch in der Kommunikation gegenüber Dritten.
- Entwicklung von zielgruppenspezifischen Informations- und Sensibilisierungsmassnahmen, zum Beispiel einer Informationskampagne des Bundes zum Thema «Verantwortungsvoller Umgang mit Mobilfunk» oder zur Bedeutung des Mobilfunks für Wirtschaft und Gesellschaft. Das Thema sollte auch in die Schulen getragen werden. Diese Kampagne sollte die Themen «Medienkompetenz» und «Datensicherheit» miteinschliessen.
- Broschüre

10.3.2 Kosten und Finanzierung

Die Kosten der BAKOM-NIS-Datenbank oder eines neuen Online-Katasters müssten noch abgeschätzt werden. Da es mindestens teilweise um Arbeiten an einer Datenbank ginge, ist mit grösseren Kosten zu rechnen. Die Finanzierung wäre in erster Linie Sache des Bundes, wobei das BAKOM derzeit über keinen entsprechenden gesetzlichen Auftrag verfügt.

Die Aktualisierung des Leitfadens Mobilfunk für Gemeinden und Städte müsste von allen bisherigen Trägern mitfinanziert werden. Für den Bund ergäben sich damit tragbare Kosten.

Die Kosten für effektive und zielgruppenspezifische Informations- und Sensibilisierungsmassnahmen bzw. für eine Informationskampagne müssten noch abgeschätzt werden. Je nach Ausgestaltung (Durchdringung der Bevölkerung,

Dauer) sind die Kosten erfahrungsgemäss relativ hoch, wobei sie aber aus den Erträgen der Vergabe von Mobilfunklizenzen finanziert werden sollten.

10.3.3 Erwarteter Nutzen

Bei der Bevölkerung könnte die transparente Information über Mobilfunkanlagen die Akzeptanz der Anlagen (und die Glaubwürdigkeit der Behörden) erhöhen. Die Behörden und Betreiber würden ausserdem entlastet von der Zusammenstellung von Unterlagen für die Beantwortung von Anfragen. Der Nutzen einer erhöhten Transparenz hängt allerdings davon ab, ob der Öffentlichkeit verständlich dargelegt werden kann, welche Informationen aus den gezeigten Daten erkennbar sind (wie z. B. die Zusammenhänge zwischen Distanz, Sendeleistung und Immissionen) und welche nicht.

Der Austausch von Daten zwischen einem Online-Kataster und den kantonalen Bewilligungsverfahren würde die Information und Sensibilisierung erleichtern, da alle Daten schon elektronisch vorhanden sind. Zu bedenken ist auch, dass Mitbewerber (Mobilfunkbetreiber) den Kataster nutzen könnten, um Einsichten zu Netzplanung, Versorgungsqualität oder zu Strategien zu erhalten.

Mit der Aktualisierung des Leitfadens Mobilfunk für Gemeinden und Städte werden den Kommunen die Instrumente mitgegeben, mit denen sie Gesuche speditiv behandeln können.

Informations- und Sensibilisierungsmassnahmen zum Thema Mobilfunk und Gesundheit tragen dazu bei, Wissenslücken zu schliessen, erlauben faktenbasierte Entscheide und ermöglichen der Bevölkerung eigenverantwortliches Verhalten.

10.3.4 Umsetzung

Die Machbarkeit eines Online-Katasters ist ebenso zu prüfen wie die Möglichkeiten, Informationen zur Verfügung zu stellen (z. B. im Rahmen einer Informationskampagne).

Die Aktualisierung des Leitfadens Mobilfunk für Gemeinden und Städte ist von der BPUK bereits angeregt worden. Sofern die Finanzierung zustande kommt, wird das Projekt nach Abschluss der Arbeiten der Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung und allfälliger Folgearbeiten frühestens ab 2020 an die Hand genommen.

10.3.4.1 Zuständigkeit

Die Aktualisierung der BAKOM-NIS-Datenbank, der Aufbau eines Online-Katasters oder die Finanzierung einer Informationskampagne sind grundsätzlich Sache des Bundes, allenfalls unter Mitwirkung der Kantone. Zusätzlich zu den Bestimmungen im FMG und im USG gibt das neue Bundesgesetz über den Schutz vor Gefährdungen durch nichtionisierende Strahlung und Schall (NISSG) dem Bundesamt für Gesundheit die rechtliche Grundlage, um über die Auswirkungen der Strahlung zu informieren, die von mobilen Geräten wie Smartphones, Tablets oder Bluetooth-Geräten ausgeht. Der Leitfaden Mobilfunk für Gemeinden und Städte wird unter der Federführung der BPUK von Gemeinden, Kantonen und Bund gemeinsam aktualisiert.

10.3.4.2 Aufwand der Behörden

Die Aufwendungen an Zeit oder Geld für die Aktualisierung der BAKOM-NIS-Datenbank, den Aufbau eines Online-Katasters oder die Finanzierung einer Informationskampagne können zurzeit nicht abgeschätzt werden.

Die Aktualisierung des Leitfadens Mobilfunk für Gemeinden und Städte wird mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich sein.

10.3.4.3 Zeitrahmen

Für eine Aktualisierung der BAKOM-NIS-Datenbank oder den Aufbau eines Online-Katasters ist mit mehreren Jahren zu rechnen. Die Projekte müssten insbesondere nach den Regeln des Beschaffungsrechts behandelt werden. Eine Informationskampagne könnte innert eines Jahres vorbereitet werden. Die Umsetzung hängt aber davon ab, ob in dieser Zeit eine Finanzierung dafür gesichert werden kann.

10.3.4.4 Rechtliche Anpassungen

Allenfalls ist für den Austausch von Daten und für eine Informationskampagne eine Rechtsanpassung notwendig. Dies wäre noch zu prüfen. Ansonsten bestehen die Rechtsgrundlagen für die Aufgaben.

10.3.5 Fazit

Information ist wichtig zur Versachlichung der Diskussion. Es ist dabei aber essenziell, diese Information für die Bevölkerung verständlich zu kommunizieren. Damit würden die Informationen aus dem Monitoring sinnvoll ergänzt. Eine Informationskampagne müsste sorgfältig geplant werden, um einen positiven Effekt zu erzielen, und sie sollte nur angegangen werden, wenn die Finanzierung auch langfristig sichergestellt ist. Die Überarbeitung des Leitfadens Mobilfunk für Gemeinden und Städte ist 2020 anzustreben.

10.4 Förderung der Forschung im Bereich Mobilfunk und Gesundheit

10.4.1 Beschreibung

In der momentanen Diskussion um die gesundheitlichen Bedenken bei der Einführung von 5G steht immer wieder die Frage im Zentrum, ob die im Alltag vorhandene Strahlung tatsächlich negative Folgen für die Gesundheit der Bevölkerung hat. Angesichts der wissenschaftlichen Unsicherheiten empfiehlt die Arbeitsgruppe, dass weitere Forschung betrieben wird. Ein grosser Teil der Unsicherheiten bei epidemiologischen Studien ist darauf zurückzuführen, dass viele Arbeiten nicht prospektiv durchgeführt worden sind (z. B. Fall-Kontrollstudien zu Hirntumoren). Es ist deshalb wichtig, neben experimentellen Ansätzen auch prospektive Untersuchungen und ein Monitoring durchzuführen. Dieses Monitoring sollte sowohl die Expositionserfassung als auch ein Gesundheitsmonitoring umfassen. Die folgenden Ansätze werden aus Sicht der Arbeitsgruppe als erfolgversprechend gewertet (Reihenfolge ohne Priorisierung):

- Es gibt bereits viele Studien zu den biologischen Wirkungen von HF-NIS unterhalb von 6 GHz, aber noch deutlich weniger zu den Millimeterwellen. Studien sollten also klären, ob diese Frequenzen andere biologische Effekte haben.
- Noch nicht restlos geklärt ist die Frage, wie relevant die Signalcharakteristik (z. B. Modulation) in allen vom Mobilfunk genutzten Frequenzbereichen ist. Anhand von experimentellen Ansätzen kann diese Fragestellung systematisch angegangen werden. Auch bei Expositions- und beobachtenden Studien sollten nicht nur die Mittelwerte (z. B. SAR-Werte), sondern auch andere Metriken, welche die Wellenform charakterisieren, evaluiert werden.
- Mit höherer Frequenz und damit sinkender Wellenlänge werden neue Ansprüche an die Dosimetrie gestellt. Grundsätzlich ist gute Dosimetrie wichtig für die Interpretation der Resultate. Zentrale Fragen betreffen die anatomischen Modelle und den Modellierungsansatz. Eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Haut mit ihren Schichten ist unabdingbar, denn gut aufgelöste Hautmodelle zeigen andere induzierte elektrische Feldstärken als homogene Einschicht- und Mehrschichtmodelle, wie sie häufig verwendet werden. Sodann stellt sich die Frage, welcher Modellierungsansatz zur Simulation der Felder im Gewebe am besten geeignet ist. Gegenwärtig gibt es wenige empirisch validierte Modellierungen im Millimeterwellen-Bereich. Entsprechende empirische Studien wären zu begrüssen. Diese dosimetrischen Arbeiten würden es sodann erlauben, Studien zur metabolischen Leistung der Haut und anderer Organe unter HF-NIS-Exposition durchzuführen. Die Haut ist ein komplexes Organ, und mögliche Effekte hätten potenziell weitreichende Konsequenzen für den Organismus.

- Eine nationale Gesundheitsstudie ist hilfreich, um prospektiv Veränderungen in der Gesundheit der Bevölkerung zu erfassen. Um die Machbarkeit einer solchen Studie zu klären, läuft zurzeit eine Pilotstudie im Rahmen des Biomonitorings (nicht EMF-spezifisch) mit dem Bundesamt für Gesundheit. Eine gross angelegte und prospektive Studie könnte langfristig eine Vielzahl von möglichen Gesundheitsauswirkungen und Expositionen untersuchen. Besonders geeignet ist sie, um Veränderungen bei Symptomen und der Lebensqualität zu untersuchen, da die longitudinale Erfassung von Biomarkern ein besseres Verständnis des Krankheitsgeschehens erlaubt. Je mehr Daten erfasst werden, desto besser können andere Einflussfaktoren in der Analyse mitberücksichtigt und Assoziationen im Hinblick auf Kausalität interpretiert werden. Wichtig bei einer solchen Studie wäre die kontinuierliche Erfassung der NIS-Exposition mit grösstmöglicher Genauigkeit. Für die Entwicklung entsprechender Erfassungsmethoden braucht es ebenfalls Forschungsanreize. Solche prospektiven Ansätze sind methodisch am aussagekräftigsten, allerdings ist bis zum Vorliegen von Resultaten entsprechend Zeit erforderlich.
- Neben Bevölkerungsstudien ist auch eine vertiefte Abklärung von Personen denkbar, welche Gesundheitsprobleme auf NIS zurückführen. Im Rahmen einer interdisziplinären umweltmedizinischen NIS-Fachstelle könnten EHS-Einzelfälle vertieft abgeklärt und systematisch dokumentiert werden. Damit liessen sich allenfalls Phänomene entdecken und beschreiben, die in Bevölkerungsstudien im statistischen Rauschen untergehen und die neue Hypothesen für zukünftige Forschung liefern könnten. Neben dem möglichen Wissensgewinn wäre eine solche Beratungsstelle auch ein wichtiges Hilfsangebot für Betroffene. Es könnten dabei auch neue Behandlungsmethoden erprobt werden.
- Da praktisch die ganze Bevölkerung ein Mobiltelefon benutzt, kann erwartet werden, dass sich ein allfälliges Tumorrisiko mit einer gewissen Latenzzeit in einer Zunahme von Neuerkrankungen niederschlagen müsste. Es wird daher vorgeschlagen, ein Monitoring von Hirntumoren (z. B. Gliome, Meningeome, Hypophyse) zu etablieren. Der Kopf war bisher der durch NIS am stärksten exponierte Körperteil, und Hirntumoren haben wenige andere Risikofaktoren, welche einen Einfluss auf die Zeittrends haben könnten. Als Datenquelle für ein Tumormonitoring kann das nationale Krebsregister NICER genutzt werden. Damit die Tumorerkrankungen im Hinblick auf die Mobiltelefonnutzung interpretiert werden können, ist es auch wichtig, statistische Kennzahlen zum durchschnittlichen Mobil- und allenfalls Schnurlostelefongebrauch, der mittleren Sendeleistung der Endgeräte sowie den Veränderungen des Nutzerverhaltens in der Bevölkerung zu erheben, idealerweise ergänzt mit Kenndaten zur durchschnittlichen Sendeleistung und zu Umweltexpositionen.
- Ein zukünftiger Forschungsbedarf kann sich auch bezüglich der optischen Strahlung von Displays heutiger und künftiger Endgeräte ergeben, und zwar zu den Auswirkungen auf die Gesundheit der Augen insgesamt, die Gesundheit der Retina im Speziellen und auf die zirkadianen Rhythmen der Nutzerinnen und Nutzer.
- Grundsätzlich kann mit Forschungsprojekten flexibel und rasch auf neue Erkenntnisse reagiert werden, sodass hier keine detaillierten Empfehlungen zu weiteren Fragestellungen gegeben werden. Im Vordergrund stehen Wirkungen auf die Entstehung von Krebs, Neurodegeneration, unspezifischen Symptomen und die Fortpflanzung sowie ein besseres Verständnis zu Einflüssen auf die Hirnphysiologie, kognitive Funktionen und weitere Körperfunktionen. Forschung zu NIS kann im Rahmen eines Forschungsprogramms koordiniert und gesteuert werden, wie dies in der Schweiz schon gemacht wurde (NFP 57) und zurzeit in Deutschland und Frankreich gemacht wird, oder über gezielt definierte Forschungsaufträge. Dabei lohnt es sich, Synergiepotenziale zum Beispiel mit der an der ETHZ domizilierten Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation (FSM), mit einem umweltepidemiologischen Kompetenzzentrum wie dem Schweizerischen Tropen- und Public Health-Institut (Swiss TPH) sowie mit universitären Instituten für Hausarztmedizin zu prüfen, da hier auf bestehende Organisationen und ihr Netzwerk zurückgegriffen werden kann.
- Als Beispiel für ein gezieltes Forschungsprojekt kann eine vertiefte Abklärung der möglichen Sensitivität von Schwannzellen auf starke HF-NIS-Exposition genannt werden. In einzelnen epidemiologischen Studien und auch in wenigen Tierstudien finden sich ein erhöhtes Risiko für Gliome und Schwannome. Eine der Tierstudien zeigt auch ein erhöhtes Risiko für Phäochromocytome, einem Tumor der chromaffinen Zellen des Nebennierenmarks. Man weiss, dass Schwann- und Gliazellen und die chromaffinen Zellen des Nebennierenmarks von der gleichen Vorstufenzelle abstammen. Es stellt sich somit die Frage, ob diese Zelltypen spezifisch auf HF-NIS reagieren. Auch

stellt sich die Frage, ob eventuell andere Zelltypen mit ähnlicher Herkunft und Eigenschaften wie zum Beispiel die Melanozyten sensitiv auf HF-NIS reagieren können. Melanozyten, welche zum Melanom entarten können, stammen ebenfalls von der gleichen Vorstufenzelle ab und könnten im Hinblick auf die Exposition durch höhere Frequenzen relevant sein.

10.4.2 Kosten und Finanzierung

Die Kosten für ein sinnvolles Forschungsvorhaben belaufen sich auf mehrere Hunderttausend Franken. Damit die Forschungsförderung eine signifikante Wirkung erzielt, müssten entsprechend hohe Mittel vorgesehen werden.

Gemäss Artikel 39a FMG können Mittel aus dem Erlös der Konzessionsgebühren für die Forschung im Bereich nichtionisierende Strahlung eingesetzt werden. Diese Forschungsförderung ist zu intensivieren.

10.4.3 Erwarteter Nutzen

Solche Forschungsförderung wirkt sich mehrfach positiv aus: Sie schliesst wissenschaftliche Erkenntnislücken in einem politisch sensiblen Feld, sie dient als Frühwarnsystem für gesundheitliche Risiken, sie unterstützt als breit akzeptierte Begleit- und Vorsorgemassnahme den Netzaufbau und die Kommunikation von Bund und Kantonen, und sie sichert die schweizerischen Forschungskompetenzen in einem sich enorm schnell entwickelnden Technologiebereich.

10.4.4 Umsetzung

10.4.4.1 Zuständigkeit

Die Entwicklung des Rahmens für die Forschungsförderung ist Sache der Bundesbehörden. Mit der Entwicklung und Koordination von Forschung im Bereich Mobilfunk und Gesundheit wäre eine forschungsnahe Institution zu beauftragen. Die Bundesbehörden sind für diese Aufgabe nicht optimal geeignet.

10.4.4.2 Aufwand der Behörden

Der Aufwand für die Schaffung des Rahmens ist personalintensiv. Danach würde der Aufwand bei den Behörden wieder sinken.

10.4.4.3 Zeitrahmen

Es ist mit einer Zeitspanne von mindestens einem Jahr zu rechnen, bis ein rechtlicher und finanzieller Rahmen sichergestellt wäre.

10.4.4.4 Rechtliche Anpassungen

Mit Artikel 39a FMG besteht eine Rechtsgrundlage für die Förderung von Forschung im Bereich Gesundheit und Mobilfunk. Wieweit diese Bestimmung in einer Verordnung zu konkretisieren wäre, müsste noch geprüft werden.

10.4.5 Fazit

Um den Wissenslücken im Bereich Mobilfunk und Strahlung entgegenzutreten, soll sich der Bund neben dem NIS- und dem Gesundheitsmonitoring auch nachhaltig an der wissenschaftlichen Abklärung von möglichen Strahlungsrisiken beteiligen. Das neue FMG hat für die Finanzierung die gesetzliche Grundlage geschaffen.

10.5 Umweltmedizinische NIS-Beratungsstelle

10.5.1 Beschreibung

Die Massnahme entspricht einer Weiterentwicklung der Umweltmedizinischen Beratungsstelle der Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz. Es soll ein dauerhaftes Angebot geschaffen werden für eine medizinisch geleitete interdisziplinäre Fachstelle zur systematischen Erfassung von Einzelfällen. Sie soll umweltbezogene und umweltmedizinische Untersuchungen durchführen für Personen, die Beschwerden bei sich selber oder ihren Tieren auf Immissionen von Funksendeanlagen (oder auch anderen Quellen von HF-NIS und niederfrequenter NIS) zurückführen. In einem weiteren Schritt soll die Tätigkeit der Beratungsstelle auch auf andere Umwelteinflüsse ausgedehnt werden.

Dabei soll der Hausarzt oder die Hausärztin erste Abklärungen vornehmen, und die Fachstelle führt auf Zuweisung des Hausarztes weitere vertiefte umweltmedizinische Abklärungen in alle Richtungen durch (z. B. Veranlassung spezialärztlicher Untersuchungen, Provokationsuntersuchungen, Abklärungen zu Hause oder am Arbeitsplatz). Das Angebot soll insbesondere auch eine interdisziplinäre Fallbesprechung umfassen.

Die Fachstelle soll bei einer geeigneten Institution, beispielsweise einem Universitätsspital, angesiedelt sein. Sie soll dem BAFU und dem BAG regelmässig Bericht erstatten über die Einzelfallbeobachtungen und über mögliche systematische Zusammenhänge. Dies soll Erkenntnisse erzeugen im Hinblick auf die Ableitung fallbezogener Forschung und/oder für die Prüfung von Massnahmen.

Das Angebot soll in die Grundversorgung (Hausarzt/Tierarzt/Umweltfachstellen) einbezogen werden. Ein Vorschlag für die konkrete Umsetzung der Massnahme wurde im Bericht «Machbarkeitsstudie Gesundheitsmonitoring»[107] vorgestellt.

10.5.2 Kosten und Finanzierung

10.5.2.1 Investition und Betrieb

Die Kosten für die Konsultationen der Patientinnen und Patienten gehen zulasten der Krankenversicherung. Es ist mit rund 2000 Franken pro Einzelfall für allfällige zusätzliche Abklärungen zu rechnen. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen ist mit rund 20 Fällen pro Jahr zu rechnen, bei denen eine vertiefte Abklärung Sinn ergibt. Hinzu kommen Kosten für die systematische Erfassung und Auswertung der Beobachtungen und die Berichterstattung. Die Höhe dieser Kosten ist abhängig von der konkreten Ausgestaltung und Umsetzung der Beratungsstelle und lässt sich derzeit daher nicht näher beziffern.

10.5.2.2 Finanzierung

Die Kosten der umweltmedizinischen NIS-Beratungsstelle müssten vom Bund finanziert werden. Er hat dafür eine ausdrückliche Rechtsgrundlage in Artikel 39a FMG: Der Bundesrat kann einen Teil des Erlöses aus den Konzessionsgebühren für begleitende Massnahmen wie Forschung und Erhebungen im Zusammenhang mit funkbasierten Technologien verwenden.

10.5.3 Erwarteter Nutzen

Personen, die sich durch NIS von Sendeanlagen in ihrem Wohnumfeld gestört oder gesundheitlich beeinträchtigt fühlen bzw. negative Auswirkungen auf die Gesundheit ihrer Tiere beobachten, haben im heutigen Rechtsrahmen keine Unterstützung. Zwar bieten Kantone individuelle Belastungsmessungen an. Erfüllen diese den Rechtsrahmen, dann hat die betroffene Person keine weitere Unterstützung zu erwarten, denn die NIS-Verordnung regelt den Gesundheitsschutz abschliessend. Dies ist für die Betroffenen und ihr Umfeld äusserst belastend und kann zu Ohnmacht, Unmut, Vermeidungsverhalten, wirtschaftlicher Einbusse und zu einer Chronifizierung der Beschwerden führen, auch zu Nocebo-Effekten.[108]

10.5.4 Umsetzung

Für die Realisierung einer umweltmedizinischen NIS-Beratungsstelle ist die Zusammenarbeit des Bundes mit einer geeigneten Institution, beispielsweise einem Universitätsspital, notwendig. Mit dieser Institution ist ein Leistungsauftrag zu formulieren, der das Angebot und die Berichterstattung über mehrere Jahre sichert.

10.5.4.1 Zuständigkeit

Die Leistungsbeschreibung, die Auswahl sowie die Finanzierung einer umweltmedizinischen NIS-Beratungsstelle ist federführend eine Aufgabe des BAFU. Beim Aufbau des Angebots ist eine Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Gesundheit BAG zu prüfen.

10.5.4.2 Aufwand der Behörden

Die Höhe der Kosten lässt sich derzeit nicht näher beziffern. Die entsprechenden Mittel können vom Bund im Rahmen der bestehenden Budgets geleistet werden. Der personelle Aufwand beim Bund dürfte bis zum Abschluss eines Leistungsauftrags erheblich sein, danach wird sich der Aufwand reduzieren. Er kann im Rahmen der bestehenden Ressourcen geleistet werden.

10.5.4.3 Zeitrahmen

Der Aufbau einer umweltmedizinischen NIS-Beratungsstelle dürfte ein bis zwei Jahre in Anspruch nehmen.

10.5.4.4 Rechtliche Anpassungen

Die Rechtsgrundlagen für den Aufbau einer umweltmedizinischen NIS-Beratungsstelle bestehen.

10.5.5 Fazit

Die Massnahme knüpft an ein seit einigen Jahren bestehendes Angebot und die entsprechende Erfahrung an. Das Angebot soll breiter abgestützt werden und die Ergebnisse sollen systematischer ausgewertet werden. Personen, die sich durch NIS von Sendeanlagen in ihrem Wohnumfeld gestört oder gesundheitlich beeinträchtigt fühlen, hätten dadurch ein Angebot, das ihnen neben der hausärztlichen Grundversorgung Unterstützung bietet. Gesamthaft wird eine umweltmedizinische NIS-Beratungsstelle zur Versachlichung der öffentlichen Diskussion beitragen und wertvolle Erkenntnisse für konkrete Forschungsprojekte ergeben.

10.6 Austauschplattform «Mobilfunk der Zukunft»

10.6.1 Beschreibung

Es wird eine Austauschplattform mit Bundes-, Kantons- und Gemeindebehörden, Telekomindustrie, Organisationen aus der Medizin, Schutzverbänden und Nutzerverbänden eingeführt. Ziel ist der gegenseitige Austausch und die Information über bevorstehende Technologien oder Entwicklungen bei allen Beteiligten.

10.6.2 Kosten und Finanzierung

Die Kosten einer Austauschplattform sind gering. Es handelt sich vor allem um Personalkosten.

10.6.3 Erwarteter Nutzen

Der direkte, persönliche Austausch am selben Tisch fördert das gegenseitige Verständnis und damit im Idealfall auch das gegenseitige Vertrauen. Im Hinblick auf kommende Entwicklungen wäre es möglich, so die Bevölkerung sachgerechter und frühzeitig über Risiken und Chancen zu informieren.

10.6.4 Umsetzung

10.6.4.1 Zuständigkeit

Die Verantwortung für eine Austauschplattform liegt beim Bund, insbesondere beim BAFU und beim BAKOM.

10.6.4.2 Aufwand der Behörden

Der personelle Initialaufwand kann mit den bestehenden Ressourcen geleistet werden.

10.6.4.3 Zeitrahmen

Mit der Plattform könnte nach den Arbeiten der Arbeitsgruppe begonnen werden.

10.6.4.4 Rechtliche Anpassungen

Die Rechtsgrundlagen für die Austauschplattform bestehen.

10.6.5 Fazit

Die Schaffung einer Austauschplattform «Mobilfunk der Zukunft» ist wichtig für das gegenseitige Verständnis und könnte eine der Funktionen der Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung weiterführen.

11 Empfehlungen

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe haben ihre Kenntnisse und unterschiedlichen Interessen eingebracht und davon ausgehend Fakten zusammengetragen sowie nach Lösungen und Gemeinsamkeiten gesucht.

Die Arbeitsgruppe gelangt zu den folgenden Empfehlungen an das UVEK:

- Die Entscheide im Hinblick auf die Weiterentwicklung des Mobilfunks in der Schweiz können auf die in den Kapiteln 1 bis 7 dargelegten Fakten und Prognosen abgestützt werden.
- Die unter *Kapitel 8* (Optionen) eingebrachten Vorschläge sind zur Kenntnis zu nehmen.
- Die unter *Kapitel 9* (Mögliche Konzepte mit Blick auf zukünftige Entwicklungen) eingebrachten Vorschläge sind zur Kenntnis zu nehmen.
- Die begleitenden Massnahmen (*Kap. 10*) sollen umgesetzt werden.
- Der Dialog mit den Stakeholdern, wie er in der Arbeitsgruppe begonnen wurde, soll mit Blick auf kommende Weiterentwicklungen im Bereich Mobilfunk zeitnah weitergeführt werden (vgl. *Kap. 10.6*).
- Der am 28. September 2018 erteilte Auftrag ist abzuschliessen und die Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung aufzulösen.

Im Weiteren erscheint es der Arbeitsgruppe angezeigt, die Prozesse beim Bund im Hinblick auf die nächste Konzessionierung von Frequenzen für Fernmeldedienste proaktiv zu überprüfen. Hierbei sollte frühzeitig berücksichtigt werden, welche Auswirkungen die neuen Frequenzen insbesondere auf die Exposition der Bevölkerung mit nichtionisierender Strahlung und auf die Aufgabenerfüllung der Kantone und Gemeinden mit sich bringen können. Zur Unterstützung der Bewilligungsbehörden bei ihrer Arbeit sind die zur Bewilligung von Anlagen notwendigen Instrumente, Prozesse und Methoden zeitnah zur Verfügung zu stellen.

Anhang 1: Geprüfte Massnahmen

Die Arbeitsgruppe hat die folgenden 57 Einzelmassnahmen und ein Massnahmenpaket (Nr. 58) geprüft und thematisch gruppiert. Die Massnahmen bildeten sodann die Grundlage für die Ausarbeitung der Optionen (vgl. *Kapitel 8*).

Thema	Nr.	Massnahme
Netzstruktur	01	Reduktion alter Netze (GSM-Einheitsnetz / UMTS abschalten)
	02	Netzmonopol
	03	Trennung zwischen Industrie- und Consumer-Nutzung von 5G
	04	Hybridnetz auf der Basis eines zwischen Branche und Stadt/Gemeinde entwickelten Mobilfunkkonzepts
	05	Immissionsoptimierter Netzausbau in Zusammenarbeit Betreiber–lokale Behörden (kantonal/kommunal)
	06	Versorgung von kleinen Siedlungen, Siedlungsteilen, Siedlungsrändern mit Basisstationen ausserhalb Baugebiet (Zonenkonformität Anlagen)
	07	Trennung von Indoor- und Outdoor-Versorgung
	08	Trennung der Innen- und Aussenversorgung, strahlungsarme Kommunikationsinfrastruktur in Innenräumen und AGW von 0,6 V/m
Bagatellschwelle vorsorgliche Emissionsbegrenzung (Anh. 1 Ziff. 61 NISV)	09	Kleinsendeanlagen <6 W ERP sind auch dem AGW zu unterstellen
	10	Änderung der Limite für Mikrozellen (Bagatellschwelle auf 50 W erhöhen)
	11	Kleinzellen mit einer Leistung ≤100 W ERP ohne NIS-Berechnung und mit vereinfachter Bewilligung
	12	Erhöhung Bagatellschwelle situationsabhängig oder für Baubewilligungsverfahren (differenziert nach W ERP)
Anlagedefinition (Anh. 1 Ziff. 62 NISV)	13	Neue Definition der Anlage (1 Anlage pro Betreiber)
	14	Anlagedefinition anpassen (nur noch gleiches Dach / <6 W nicht berücksichtigen)
	15	Anpassung der Definition von Anlage- und Einspracheperimeter
Massgebender Betriebszustand (Anh. 1 Ziff. 63 NISV)	16	Neue Definition des massgebenden Betriebszustandes (Tagesmittel)
	17	Anpassung des massgebenden Betriebszustandes für eine Mittelwertmethodik im Betrieb und bei Messungen
	18	Zeitliche Mittelwertbildung der Sendeleistung als Bewertungsgrundlage
	19	Keine Minderung des Schutzniveaus (Beibehaltung massgebender Betriebszustand und Anlagegrenzwert)
	24	Bewertungsmethode für adaptive Antennen (massgebender Betriebszustand für adaptive Antennen)
Anlagegrenzwert (Anh. 1 Ziff. 64 NISV)	20	Anlagegrenzwert (AGW) vereinheitlichen (Basis: bestehende AGW)
	21	Erhöhung des AGW auf 20 V/m
	22	Erhöhung des Anlagegrenzwertes AGW auf 11,5 V/m, kombiniert mit Neudefinition der Anlage
	23	Anlagegrenzwert aufheben

	19	Keine Minderung des Schutzniveaus (Beibehaltung massgebender Betriebszustand und Anlagegrenzwert)
	08	Trennung der Innen- und Aussenversorgung, strahlungsarme Kommunikationsinfrastruktur in Innenräumen und AGW von 0,6 V/m
Vollzug NISV	25	Etablierung einer Messempfehlung für 5G-Mobilfunk-Basisstationen
	26	Harmonisierung des Vollzugs der NISV und der Vollzugsempfehlungen
	27	Überarbeitung der Vollzugsempfehlung zur NISV
	28	Verzicht auf mehrfach kumulierte Worst-Case-Betrachtungen in den Ausführungsbestimmungen
	29	Verbesserung der Reproduzierbarkeit und der Vergleichbarkeit von Berechnung und Messung durch räumliche Mittelwertmessungen mit Messrobotern (realitätsnahe Expositionsbestimmung)
	30	Periodische Überprüfung von Ergebnissen aus dem NIS-Monitoring und Korrektur von Berechnungs- und Messmethoden
	31	Anpassung Leitfaden Mobilfunk für Gemeinden und Städte
	32	3D-Gebäudemodell verwenden
	33	Leere Parzellen nicht berücksichtigen
	34	Unschärfe bei der Berechnung der Strahlenbelastung erlauben
	35	Zulässige Betriebsparameter nach Abnahmemessung festlegen
	36	Mehr Freiheit bei der Anordnung von Messungen
	37	Kleinere Vereinfachungen Unterlagen Bewilligungsprozess
	38	Umweltrechtliche Prüfung von Baubewilligung entkoppeln
	39	Definition des Einspracheperimeters
	15	Anpassung der Definition von Anlage- und Einspracheperimeter
	40	Definition von Bagatellfällen erweitern (für Änderungen)
	41	Strahlenbelastung an OMEN genauer berechnen
	42	Keine Verpflichtung der Anwohner zur Duldung einer Abnahmemessung
	43	Abgleich in BAKOM-Datenbank automatisieren
	44	BAKOM-Datenbank erweitern (Antennenhistorie und -diagramme hinterlegen)
	45	Bewilligung durch zentrale Stelle (z. B. beim Bund)
	46	Anpassungen an der BAKOM-NIS-Datenbank
	47	Chancen der Digitalisierung nutzen
	48	Online-Kataster
	09	Kleinsendeanlagen <6 W ERP sind auch dem AGW zu unterstellen (Keine Bewilligungspflicht, abschreckende Bussen)

Bewilligung und Standortsuche	49	Vereinfachung Bewilligungsverfahren
	50	Mitbenutzung von Basisstationen und Infrastrukturelementen
	51	Förderung der Verfügbarkeit von öffentlichen Liegenschaften für den Mobilfunkausbau
	52	Unterstellung von Mobilfunkanlagen unter das Mietrecht
Begleitende Massnahmen Gesundheit und Monitoring	53	Mengenabhängige Preise für Mobilfunkdienstleistungen
	54	Forschungsförderung und Forschungsbedarf im Millimeterwellenbereich
	55	Medizinische NIS-Fachstelle / NIS-Ombudsstelle
	56	Periodische Evaluation der Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Strahlung (inkl. Publikation)
	57	Rettung und Sicherheit
	58	Massnahmenpaket

Anhang 2: Parlamentarische Vorstösse

Der Bundesrat hat am 25. Februar 2015 einen Bericht in Erfüllung der Postulate Noser (12.3580; «Zukunftstaugliche Mobilfunknetze») und FDP-Liberale Fraktion (14.3149; «Weniger Mobilfunkantennen dank Verbesserung der Rahmenbedingungen») verabschiedet:

- Zukunftstaugliche Mobilfunknetze (PDF, 471 kB, 24.02.2015)
- Situationsanalyse/Auslegeordnung (PDF, 901 kB, 24.02.2015)

Der Bericht umreisst mögliche Lösungen, damit die Schweizer Netze die zu erwartende Zunahme des Verkehrs, insbesondere des Datenverkehrs, bewältigen können: durch die Nutzung zusätzlicher Funkfrequenzen, die Einführung neuer Technologien oder die Verdichtung der Netze durch den Bau neuer Antennen. Aufgrund der Grenzwerte, die in der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) vorgesehen sind, ist es oft nicht möglich, die Leistung der bestehenden Anlagen zu erhöhen. Bei der Ausarbeitung des Berichts wurden verschiedene Änderungen des rechtlichen Rahmens in Betracht gezogen.

Der Bericht diente in der Folge als Grundlage für die Beratungen im Parlament. Im Januar 2017 erstellten die Bundesämter für Kommunikation (BAKOM) und für Umwelt (BAFU) zuhanden der Kommission für Verkehr und Fernmeldewesen des Ständerates (KVF-S) zusätzlich noch den Bericht «Entwicklungen im Bereich Mobilfunk», welcher die Entwicklungen seit der Publikation des Berichts «Zukunftstaugliche Mobilfunknetze» darstellte.

Die Motionen 16.3007 der Kommission für Verkehr und Fernmeldewesen (KFV) des Nationalrates *«Modernisierung der Mobilfunknetze raschestmöglich sicherstellen»* und 18.3006 der KFV des Ständerates *«Den Kollaps der Mobilfunknetze verhindern und den Anschluss an die Digitalisierung sicherstellen»*, welche im Hinblick auf eine rasche Einführung der 5G-Technologie eine Lockerung der NISV-Anlagegrenzwerte verlangten, wurden vom Ständerat jeweils knapp abgelehnt.

Aufgrund dieser Ausgangslage hat Frau Bundesrätin Doris Leuthard im September 2018 die Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung eingesetzt. Während die Arbeitsgruppe tätig war, sind verschiedene Vorstösse zur Arbeitsgruppe, zu 5G und zu den Auswirkungen von nichtionisierender Strahlung auf den Menschen und die Umwelt eingereicht worden:

- 18.4147 Ip. Hardegger: Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung. Auftrag und Zusammensetzung der Arbeitsgruppe
- 19.3089 Ip. Hardegger: Mobilfunk: 5G und gesundheitliche Risiken
- 19.3113 Ip. Munz: Wer trägt das Risiko der Gesundheitsschäden durch die 5G-Technologie?
- 19.3120 Ip Glauser: Nichtionisierende Strahlung: Gesundheit und Verantwortung
- 19.3169 Ip. Häberli-Koller: Mobilfunk: Arbeitsgruppe UVEK
- 19.3180 Ip. Semadeni: Phonegate: Handy-Nutzer korrekt informieren
- 19.3211 Ip. Borloz: Öffentlicher Raum. Schaffung von geschützten Zonen für Personen mit Elektrohypersensibilität
- 19.3321 Ip. Ammann: Einführung der neuen 5G-Mobilfunktechnologie in der Schweiz erfordert eine gute Aufklärungsarbeit der Bevölkerung durch den Bund
- 19.3345 Ip. Friedl: Forschungsbedarf zu Auswirkungen von elektromagnetischen Feldern auf Tiere und Pflanzen
- 19.3431 Ip. Fiala: Wirtschaftliche Vorteile und gesundheitliche Folgen von 5G?
- 19.3505 Ip. Töngi: Vergabe von Mobilfunkkonzessionen für 5G ohne entsprechende Grundlagen für die Bewilligungsbehörden
- 19.3534 Ip. Borloz 5G: Wenn eine Arbeitsgruppe die Auswirkungen der Strahlung in der Schweiz untersucht, ist die Unabhängigkeit der Gruppenmitglieder mindestens ebenso wichtig wie deren Kompetenzen

- 19.3535 Ip. Gschwind: Einführung der 5G-Technologie in der Schweiz: Welche Kompensation vom Bund angesichts des Mehraufwands für die Kantone?
- 19.3609 Ip. Hardegger: Planungskompetenzen im Mobilfunkbereich und Risikotragung
- 19.3696 Ip. Munz: Informationspflicht des BAG bezüglich nichtionisierender Strahlung NIS
- 19.3698 Ip. Munz: Selbstbestimmtes Handeln, Forschung und Monitoring bezüglich NIS
- 19.4043 Po. Häberli-Koller: Nachhaltiges Mobilfunknetz
- 19.4073 Mo. Graf-Litscher: Forschungsförderung Mobilfunk und Strahlung
- 19.4246 Ip. Hardegger: Weiterhin offene Fragen zu adaptiven Antennen und Expositionsspitzen
- 19.1025 Anfrage Reimann: Ursachen für die Abnahme der globalen Biodiversität: Warum kein Hinweis auf die zunehmende Strahlenbelastung?
- 19.5033 FR Estermann: Mobilfunkstandard 5G als «Bagatelländerung»?
- 19.5274 FR Regazzi: 5G-Technologie. Informieren und erklären, um einige verbreitete Vorurteile zu entkräften / Tecnologia 5G. Informare e spiegare per superare alcuni pregiudizi presenti nella popolazione
- 19.5286 FR Schneider Schüttel: 5G-Antennen – welche Grenzwerte gelten?
- 19.5349 FR Bigler: 5G – wie weiter?
- 19.5355 FR Brunner: 5G: Verspätung und Kosten für die Wirtschaft?

Anhang 3: Mandate und Mitglieder Untergruppen und Kerngruppe

Untergruppe 1: Datenverkehr und Standortwahl

Mandat

1. Themenkreis: Datenvolumen

- Datenverkehr, insbesondere gegenwärtige Entwicklungen seit Bericht 2015:
  - Situation heute: Ausschöpfungsgrad des Anlagegrenzwertes, Reserven und Potenzial der bestehenden Netze und Anlagen
  - Situation morgen: Bedürfnisse und Notwendigkeiten im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen, insbesondere 5G

2. Themenkreis: Netzstruktur

- Zukünftige Bedürfnisse und Strategien bezüglich der Weiterentwicklung der Netzstrukturen zur Bewältigung der Nachfrage und zur Sicherstellung des Vorsorgeprinzips
- Definition von zwei bis drei typischen Netztopologien

3. Themenkreis: Standortsuche für Antennen

- Darlegung der Herausforderungen der Netzbetreiber bei der Sicherung von Standorten für Antennen
- Rolle der Behörden in diesem Prozess

4. Themenkreis: Verhältnis Datenvolumen und Exposition

- Technische und betriebliche Möglichkeiten, um zunehmende Datenvolumen möglichst ohne zunehmende Exposition der Bevölkerung zu übertragen.

Mitglieder

- Robert Badertscher, Projektleiter Connectivity, Schweizerische Bundesbahnen SBB
  (Stv. Robert Gisler, Techniker TS Telekommunikation, Projektmanager Rollout GSM-R, SBB)
- Valentin Delb, Abteilungsleiter, AWEL Kanton Zürich, Delegierter KVU
- Markus N. Durrer, Elektro- und VDI Hygiene A Ingenieur, Freiberuflicher Experte IBH, Technischer Berater der AefU
- Christian Grasser, Geschäftsführer, Schweizerischer Verband der Telekommunikation asut
- Philippe Horisberger, Stv. Direktor, Bundesamt für Kommunikation (Vorsitz)
- Pascal Krähenbühl, Dipl. El. Ing. FH, Sektionschef, Bundesamt für Kommunikation
- Sven Kühn, Dr. sc. ETHZ, Project Leader, IT'IS Foundation
- Harry Künzle, dipl. El. Ing. FH, Leiter Dienststelle Umwelt und Energie, Stadt St. Gallen, Delegierter SSV
  (Stv. Andreas Küng)
- Hugo Lehmann, Dr. rer. nat., Leiter Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder, Swisscom (Schweiz) AG
- Guillaume Moukouri, Salt Mobile SA
- Andreas Müller, Dipl. El.-Ing. FH, Head of Network Environment, Swisscom (Schweiz) AG
- Manfred Portmann, AfU, Kanton Freiburg, Delegierter KVU

- Roger Schaller, Head of Resources & Administration, Cellnex Switzerland AG
- Andreas Siegenthaler, Dr. phil. nat., Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Bundesamt für Umwelt
- André Trabold, Dipl. El. Ing. HTL, Leiter Gruppe NIS, Bundesamt für Kommunikation
- Rolf Ziebold, MAS CCM, Senior Expert Corp. Com., Sunrise Communications AG (Stv. Roland Hinn)

Untergruppe 2: Datenvolumen und Exposition

Mandat

Zusammenhang zwischen Datenvolumen, Strahlung und Exposition:

- Für verschiedene Netzstrukturen/Netztopologien soll jeweils aufgezeigt werden:
  - die Exposition der Bevölkerung durch NIS von Basisstationen und
  - die Exposition der Nutzenden durch ihre Endgeräte
- NIS-Monitoring

Mitglieder

- Joseph Al Ahmar, Dipl.-Ing. der Mechatronik, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Bundesamt für Umwelt
- Peter Fritschi, El. Ing. HTL/MBA, Engineer II, Swisscom (Schweiz) AG
- Jürg Fröhlich, Dr. sc. techn., Head of Business and Project Management, Fields at Work GmbH
- Roland Hinn, Dipl.-Ing. Mag. rer. soc. oec., Senior Engineer Infrastructure Quality, Sunrise Communications AG
- Sven Kühn, Dr. sc. (ETHZ), Project Leader, IT'IS Foundation
- Niels Kuster, Prof. Dr., Geschäftsführer, IT'IS Foundation
- Hugo Lehmann, Dr. rer. nat., Leiter Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder, Swisscom (Schweiz) AG
- Erwin Mülhauser, dipl. El.-Ing. HTL, Experte EMV/EMVU/NIS, Bundesamt für Kommunikation BAKOM (Stv. André Trabold)
- Andreas Müller, Dipl. El.-Ing. FH, Head of Network Environment, Swisscom (Schweiz) AG
- Alexander Reichenbach, Dipl. Umwelt-Natw. ETH, Sektionschef, Bundesamt für Umwelt (Vorsitz)
- Andreas Siegenthaler, Dr. phil. nat., Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Bundesamt für Umwelt
- Evelyn Stempfel, Dr. phil. nat., Sektionschefin, Bundesamt für Gesundheit
- Nadia Vogel, Dr. sc. nat. ETH, AWEL Kanton Zürich

Untergruppe 3: Gesundheitliche Auswirkungen

Mandat

Aktueller Stand der wissenschaftlichen Forschung, insbesondere neue Erkenntnisse seit Bericht 2015:

- Reale Exposition und Belastung der Bevölkerung durch Basisstationen und Endgeräte
  - Momentan
  - Wenn möglich Prognose, insbesondere für 5G
- Stand der Forschung zu den Wirkungen von hochfrequenter Strahlung auf Menschen
  - Zusammenfassung des für den «Bericht Noser» etablierten Stands der Wissenschaft
  - Ergänzung durch die seit 2015 neu publizierten Studien

Mitglieder

- Stefan Dongus, Dr. phil. nat., Environmental Exposures & Health Unit, Swiss TPH
- Gregor Dürrenberger, Dr. sc. nat., Geschäftsführer, Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation FSM
- Markus N. Durrer, Elektro- und VDI Hygiene A Ingenieur, Freiberuflicher Experte IBH, Technischer Berater der AefU
- Jürg Fröhlich, Dr. sc. techn., Head of Business and Project Management, Fields at Work GmbH
- Yvonne Gilli, Dr. med., Verbindung der Schweizer Ärztinnen und Ärzte FMH
- Michael Hässig, Prof. Dr. med. vet., Universität Zürich (im Mandat der AefU)
- Hugo Lehmann, Dr. rer. nat., Leiter Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder, Swisscom (Schweiz) AG
- Manuel Murbach, Dr. sc. ETHZ, Projektleiter, IT'IS Foundation
- Carlos Quinto, Dr. med., Verbindung der Schweizer Ärztinnen und Ärzte FMH
- Alexander Reichenbach, Dipl. Umwelt-Natw. ETH, Sektionschef, Bundesamt für Umwelt
- Martin Röösli, Prof. Dr. phil. nat., Professor für Umweltepidemiologie Swiss TPH, Leiter Beratende Expertengruppe NIS (Vorsitz)
- Edith Steiner, Dr. med., Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz AefU
- Evelyn Stempfel, Dr. phil. nat., Sektionschefin, Bundesamt für Gesundheit
- André Trabold, Dipl. El. Ing. HTL, Leiter Gruppe NIS, Bundesamt für Kommunikation

Kerngruppe

Mandat

Die Kerngruppe hat die Aufgabe, die Inhalte der Berichterstattung an das UVEK für die Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung vorzubereiten. Die Arbeitsgruppe soll an den bereits festgelegten Sitzungen über diese vorbereiteten Berichtsteile diskutieren können. Der Zeitplan der Kerngruppe richtet sich danach. Die Arbeit der Kerngruppe umfasst insbesondere folgende Aufgaben:

a) Auflisten und Bewerten von möglichen Massnahmen

- Zusammentragen und Auflisten aller denkbaren und möglichen Massnahmen, mit denen die Kapazitäten für die Übertragung von 5G-Daten in der Schweiz beeinflusst werden können.

- Die Kerngruppe stellt sicher, dass insbesondere diejenigen Massnahmen aufgelistet und geprüft werden, zu denen sich in den Berichten der drei Untergruppen Informationen finden und/oder zu denen in den parlamentarischen Vorstössen Auskünfte verlangt werden.
- Bewertung der einzelnen Massnahmen in Bezug auf verschiedene Aspekte. Namentlich müssen Kosten und Zeitbedarf bei den Betreibern, Veränderung der Exposition der Bevölkerung, administrativer Aufwand für Behörden und Netzbetreiber und die Wirkung für die Steigerung der Kapazität eines Mobilfunknetzes untersucht werden.

b) Optionen aus den bewerteten Massnahmen

Aus den bewerteten Massnahmen entwickelt die Kerngruppe Optionen, mit denen die Herausforderungen in Bezug auf 5G aus ihrer Sicht angegangen werden könnten. Die Optionen sind einzelne Massnahmen oder Massnahmenpakete.

c) Empfehlungen aus den Optionen

Die Kerngruppe entwickelt aus den Optionen eine oder mehrere Empfehlungen zuhanden der Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung.

Mitglieder

- Valentin Delb, Abteilungsleiter, AWEL Kanton Zürich, Delegierter KVU
- Yvonne Gilli, Dr. med., Verbindung der Schweizer Ärztinnen und Ärzte FMH
- Christian Grasser, Geschäftsführer, Schweizerischer Verband der Telekommunikation asut
- Philippe Horisberger, Stv. Direktor, Bundesamt für Kommunikation
- Harry Künzle, dipl. El. Ing. FH, Leiter Dienststelle Umwelt und Energie, Stadt St. Gallen, Delegierter SSV
- Alexander Reichenbach, Dipl. Umwelt-Natw. ETH, Sektionschef, Bundesamt für Umwelt
- Martin Röösli, Prof. Dr., Professor für Umweltepidemiologie Swiss TPH, Leiter Beratende Expertengruppe NIS
- Paul Steffen, Dr. sc. nat., Vizedirektor, Bundesamt für Umwelt (Vorsitz)
- Urs Walker, Fürsprecher, Abteilungschef, Bundesamt für Umwelt

Anhang 4: Abkürzungsverzeichnis

3GPP	Third Generation Partnership Project
5G	New Radio (5. Mobilfunkgeneration)
AGW	Anlagegrenzwert (Anhang 1 NISV)
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Nationale Agentur für Lebensmittelsicherheit, Umweltschutz und Arbeitsschutz, Frankreich)
ARPANSA	Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, die australische Behörde für Strahlenschutz und nukleare Sicherheit
ASUT	Association Suisse des Télécommunications, Schweizerischer Verband der Telekommunikation
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BAG	Bundesamt für Gesundheit
BAKOM	Bundesamt für Kommunikation
BAV	Bundesamt für Verkehr
BLN	Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler
BORS	Behörden und Organisationen für Rettung und Sicherheit
BPUK	Schweizerische Bau-, Planungs- und Umweltdirektorenkonferenz
BERENIS	Beratende Expertengruppe Nichtionisierende Strahlung
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, heute BAFU
Capex	capital expenditure, Investitionen
Cercl'Air	Vereinigung der schweizerischen Behörden- und Hochschulvertreter im Bereich der Luftreinhaltung und der nichtionisierenden Strahlung
ComCom	Eidgenössische Kommunikationskommission
D2D	Device-to-Device-Kommunikation, direkte Kommunikation zwischen zwei Geräten
DAB	Digital Audio Broadcasting, digitaler Rundfunk
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial, Digitale Übertragung von TV-Signalen. Das T steht für die Ausstrahlung über terrestrische Sendeanlagen.
EFHRAN	European Health Risk Assessment Network on EMF
EHS	Elektrohypersensibilität
EMF	Elektromagnetische Felder
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System, das zukünftige Bahnmobilkommunikationssystem
ERP	Effective radiated power oder equivalent radiated power, effektive oder äquivalente Strahlungsleistung (in Watt)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute, Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
FTTH	Fiber to the home, Fernmeldenetz, das bis in jedes Geschäfts-, Mehr- oder Einfamilienhaus über Glasfaser (Lichtwellenleiter) geführt wird
FMG	Fernmeldegesetz vom 30.04.1997 (SR 784.10)
FSM	Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation
ETHZ	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
GSM	Global System for Mobile Communications (2. Mobilfunkgeneration, 2G)
GSM-Rail	auch GSM-R, von der SBB betriebenes Mobilfunknetz, welches für den Bahnbetrieb eingesetzt wird (z. B. Führerstand-Signalisation)
HF-NIS	Hochfrequente nichtionisierende Strahlung
IARC	International Agency for Research on Cancer, Internationale Agentur für Krebsforschung
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Internationale Kommission für Strahlenschutz
IGW	Immissionsgrenzwert (Anhang 2 NISV)

IMT-2020	International Mobile Telecommunications-2020, von der ITU definierte Anforderungen für den 5G-Standard
IoT	Internet of Things, Internet der Dinge
ISOS	Bundesinventar der schützenswerten Ortsbilder der Schweiz von nationaler Bedeutung
ITU	International Telecommunication Union, Internationale Fernmeldeunion
KFV	Kommission für Verkehr und Fernmeldewesen
KVU	Konferenz der Vorsteher der Umweltschutzämter der Schweiz
LTE	Long Term Evolution (4. Mobilfunkgeneration, 4G)
M2M	Machine-to-Machine-Anwendungen, automatischer Informationsaustausch zwischen Geräten
METAS	Eidgenössisches Institut für Metrologie
MIMO	Multiple Input Multiple Output, Übertragungs-System für die Nutzung mehrerer Sende- und Empfangsantennen zur drahtlosen Kommunikation
MMW	Millimeterwellen
MORAN	Multi Operator Radio Access Network, Netzwerk-Sharing mehrerer Betreiber
mW	Milliwatt (Masseinheit für Leistung)
NaFZ	Nationaler Frequenzzuweisungsplan
NFP	Nationales Forschungsprogramm
NICER	Nationales Krebsregister
NIS	Nichtionisierende Strahlung
NISSG	Bundesgesetz vom 16.06.2017 über den Schutz vor Gefährdungen durch nichtionisierende Strahlung und Schall (SR 814.71)
NISV	Verordnung vom 23.12.1999 über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (SR 814.710)
OFDM	Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren
OMEN	Orte mit empfindlicher Nutzung (Art. 3 Abs. 3 NISV)
Opex	operational expenditure, Betriebskosten
PPP	Public-Private-Partnership, partnerschaftliche Zusammenarbeit zwischen der öffentlichen Hand und Privaten
PWLAN	Public WLAN, öffentliches drahtloses lokales Netzwerk
ROS	Reactive Oxygen Species, reaktive Sauerstoffspezies
SAR	Spezifische Absorptionsrate
SCENIHR	Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks
SSM	Strålsäkerhetsmyndigheten, die schwedische Strahlensicherheitsbehörde
SSV	Schweizerischer Städteverband
TAB	Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (3. Mobilfunkgeneration, 3G)
USG	Umweltschutzgesetz vom 07.10.1983 (SR 814.01)
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
V/m	Volt pro Meter, Mass für die elektrische Feldstärke
WHO	World Health Organization, Weltgesundheitsorganisation
WLAN	Wireless Local Area Network, drahtloses lokales Netzwerk
WLL	Wireless Local Loop, drahtloser Teilnehmeranschluss

Anhang 5: Quellennachweise und Erläuterungen

[1] Hug K., Achermann P., Dürrenberger G. et al. (2014): Beurteilung der Evidenz für biologische Effekte schwacher Hochfrequenzstrahlung, Bern, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU): https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektrosmog/externe-studien-berichte/beurteilung_der_evidenzfuerbiologischeeffekteschwacherhochfreque.pdf

[2] Zukunftstaugliche Mobilfunknetze – Bericht des Bundesrates in Erfüllung der Postulate Noser (12.3580) und FDP-Liberale Fraktion (14.3149), Februar 2015: https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesratsgeschaefte/zukunftstaugliche-mobilfunknetze.html

[3] https://www.digitaldialog.swiss/de

[4] https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-61417.html

[5] https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/digital-und-internet/strategie-digitale-schweiz.html

[6] https://www.digitaleschweiz.ch/wp-content/uploads/2016/05/Bericht-Strategie-IG.pdf

[7] https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/dossiers/5g-netze.html

[8] Fernmeldegesetz vom 30.04.1997 (FMG), SR 784.10

[9] https://www.admin.ch/opc/de/federal-gazette/2017/6559.pdf.

[10] https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20170058

[11] Strategie «Digitale Schweiz», September 2018 (BAKOM)

[12] Umweltschutzgesetz vom 07.10.1983 (USG), SR 814.01

[13] Verordnung vom 23. Dezember 1999 über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV), SR 814.710

[14] ICNIRP Guidelines, 1998

[15] Missling A., Riel A., Wuschek M., Reidenbach H.-D., Weiskopf D. (2016): Internationaler Vergleich der rechtlichen Regelungen im nichtionisierenden Bereich, Band 1: Ländervergleich der Regelungen für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (0 Hz - 300 GHz), Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.), BfS-RESFOR-109/16-Bd 1 urn:nbn:de:0221-2016021914007: https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016021914007/3/BfS_2016_3614S80010_Bd1.pdf

[16] Leitfaden Mobilfunk für Gemeinden und Städte, BAFU / BAKOM / ARE 2010, Kapitel 3.3–3.5

[17] Mobilfunk-Empfehlungen der BPUK vom 7. März 2013

[18] http://www.3gpp.org/release-15

[19] Anforderungen an 5G können nicht als Ganzes einer Applikation zur Verfügung gestellt werden, sondern eine Optimierung in die eine Richtung geht immer zu Lasten der Performance in die andere Richtung.

[20] Kann mit den heute zur Verfügung stehenden Frequenzen unter 6 GHz nicht erreicht werden.

[21] https://asut.ch/asut/de/page/publications.xhtml#studien

[22] Es wird unterschieden zwischen Low-Bands (<1 GHz) und Mid-Bands (1–6 GHz) einerseits sowie High-Bands (mm-Wellen, >24 GHz) andererseits.

[23] https://5gobservatory.eu

[24] MIMO: Multiple Input Multiple Output (Quelle: EMF-Portal)

[25] Quelle: EMF-Portal

[26] Thors B., Furuskär A., Colombi D. and Törnevik C.: Time-averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations using Massive MIMO, http://ieeexplore.ieee.org/document/8039290; Baracca P., Weber A., Wild T. and Grangeat C.: A Statistical Approach for RF Exposure 2898 Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems, WSA 2018, 2899 https://arxiv.org/abs/1801.08351

[27] Vergleiche Table 15, Case studies supporting IEC 62232 – Determination of RF field strength and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure, IEC TR 62669 ED2 2018.

[28] Bundesamt für Kommunikation BAKOM, Dienste auf Mobilfunknetzen (vom 4. Februar 2019)

[29] Ericsson Mobility Report, November 2018

[30] Siehe dazu auch: https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2016/06/GSMA-5G-Spectrum-PPP.pdf oder http://www.microwavejournal.com/articles/29428-telecoms-industry-obsesses-with-mmwave-but-35-ghz-will-be-the-killer-5g-band

[31] Die Zuteilung der Frequenzspektrum-Anteile für FRMCS befindet sich zurzeit auf europäischer Ebene in der Harmonisierungsphase.

[32] https://map.geo.admin.ch und http://www.geostat.admin.ch; Datei für die Einwohner: STATPOP2017G.csv; Datei für die Arbeitsstätten: STATENT2016_N08_V180828G.csv; Datei für die Gebäude: GWS2017G.csv

[33] Der Wert von 80 MHz wurde deshalb gewählt, weil einer der drei Betreiber bei der Auktion nur 80 MHz erworben hat.

[34] Wan L., Guo Z., Wu Y., Bi W., Yuan J., Elkashlan M., and Hanzo L.: 4G/5G Spectrum Sharing Efficient 5G Deployment to Serve Enhanced Mobile Broadband and Internet of Things Applications; IEEE vehicular technology magazine, Dezember 2018.

[35] Schumacher A., Merz R. und Burg A.: 3.5 GHz Coverage Assessment with a 5G Testbed, accepted for pubication in VTC 2019-Spring in Kuala Lumpur, Malaysia.

[36] «Konzept für ein nationales Monitoring elektromagnetischer Felder», Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats Gilli 09.3488 «Elektromagnetische Felder. Monitoring» vom 18. Dezember 2015.

[37] Aus Kapitel 2.3, «Konzept für ein nationales Monitoring elektromagnetischer Felder», Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats Gilli 09.3488 «Elektromagnetische Felder. Monitoring» vom 18. Dezember 2015.

[38] Röösli M., Struchen B., Eeftens M. et al. (2016): Persönliche Messungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern bei einer Bevölkerungsstichprobe im Kanton Zürich 2016. http://www.awel.zh.ch/content/dam/baudirektion/awel/luft_asbest_elektrosmog/elektrosmog/dokumente/PersMeas_AWEL_2016.pdf; Röösli M., Lagorio S., Schoemaker M.J. et al. (2019): Brain and salivary gland tumours and mobile phone use: evaluating the evidence from various epidemiological study designs. *Annual Review of Public Health* 40: in press.

[39] Gajsek P., Ravazzani P., Wiart J. et al. (2015): Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz). *J Expo Sci Environ Epidemiol* 25(1): 37–44; Roser K., Schoeni A., Foerster M. et al. (2018): Wie wirkt die Nutzung und die Strahlung von Mobiltelefonen auf Jugendliche? *Primary and Hospital Care – Allgemeine Innere Medizin* 18(21): 386–388; Betzalel N., Ben Ishai P., Feldmann Y. (2018): The human skin as a sub-THz receiver – Does 5G pose a danger to it or not? *Environmental Research* 163: 208–216; Eeftens M., Struchen B., Birks L.E. et al. (2018): Personal exposure to radio-frequency electromagnetic fields in Europe: Is there a generation gap? *Environ Int* 121(Pt 1): 216–226; Sagar S., Dongus S., Schoeni A. et al. (2018b): Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: A systematic literature review. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 28(2): 147–160; Zeleke B.M., Brzozek C., Bhatt C.R. et al. (2018): Personal Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields among Australian Adults. *Int J Environ Res Public Health* 15(10).

[40] Blas J., Lago F.A., Fernandez P. et al. (2007): Potential exposure assessment errors associated with body-worn RF dosimeters. *Bioelectromagnetics* 28(7): 573–576; Knafl U., Lehmann H., Riederer M. (2008): Electromagnetic field measurements using personal exposimeters. *Bioelectromagnetics* 29(2): 160–162; Neubauer G., Cecil S., Giczi W. et al. (2010): The association between exposure determined by radiofrequency personal exposimeters and human exposure: a simulation study. *Bioelectromagnetics* 31(7): 535–545; Bolte J.F., van der Zande G., Kamer J. (2011): Calibration and uncertainties in personal exposure measurements of radiofrequency electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 32(8): 652–663; Choi J., Hwang J.H., Lim H. et al. (2018): Assessment of radiofrequency electromagnetic field exposure from personal measurements considering the body shadowing effect in Korean children and parents. *Science of the Total Environment* 627: 1544–1551.

[41] Urbinello D., Röösli M. (2013): Impact of one's own mobile phone in stand-by mode on personal radiofrequency electromagnetic field exposure. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 23(5): 545–548.

[42] Aus Röösli M., Struchen B., Eeftens M. et al. (2016): Persönliche Messungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern bei einer Bevölkerungsstichprobe im Kanton Zürich 2016. http://www.awel.zh.ch/content/dam/baudirektion/awel/luft_asbest_elektrosmog/elektrosmog/dokumente/PersMeas_AWEL_2016.pdf

[43] Röösli M., Struchen B., Eeftens M. et al. (2016): Persönliche Messungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern bei einer Bevölkerungsstichprobe im Kanton Zürich 2016. http://www.awel.zh.ch/content/dam/baudirektion/awel/luft_asbest_elektrosmog/elektrosmog/dokumente/PersMeas_AWEL_2016.pdf

[44] Röösli M., Struchen B., Eeftens M. et al. (2016): Persönliche Messungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern bei einer Bevölkerungsstichprobe im Kanton Zürich 2016. http://www.awel.zh.ch/content/dam/baudirektion/awel/luft_asbest_elektrosmog/elektrosmog/dokumente/PersMeas_AWEL_2016.pdf

[45] Röösli M., Foerster M., Roser K. et al. (2015): Stichprobenkonzept für Messungen der nicht-ionisierenden Strahlung mit Exposimetern, Bern, https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektrosmog/externe-studien-berichte/stichprobenkonzeptfuermessungendernichtionisierendenstrahlungmit.pdf; Röösli et al. (2015), Sagar S., Struchen B., Finta V. et al. (2016): Use of portable exposimeters to monitor radiofrequency electromagnetic field exposure in the everyday environment. *Environ Res* 150: 289–298.

[46] Urbinello D., Joseph W., Huss A. et al. (2014): Radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels in different European outdoor urban environments in comparison with regulatory limits. *Environ Int* 68C: 49–54; Gajsek P., Ravazzani P., Wiart J. et al. (2015): Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz). *J Expo Sci Environ Epidemiol* 25(1): 37–44; Thielens A., Agneessens S., De Clercq H. et al. (2015): On-body calibration and measurements using a personal, distributed exposimeter for wireless fidelity. *Health Phys* 108(4): 407–418; Gonzalez-Rubio J., Najera A., Arribas E. (2016): Comprehensive personal RF-EMF exposure map and its potential use in epidemiological studies. *Environ Res* 149: 105–112; Sagar S., Dongus S., Schoeni A. et al. (2018b): Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: A systematic literature review. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 28(2): 147–160.

[47] Sagar S., Adem S.M., Struchen B. et al. (2018a): Comparison of radiofrequency electromagnetic field exposure levels in different everyday microenvironments in an international context. *Environ Int* 114: 297–306.

[48] Röösli M., Struchen B., Eeftens M. et al. (2016): Persönliche Messungen von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern bei einer Bevölkerungsstichprobe im Kanton Zürich 2016. http://www.awel.zh.ch/content/dam/baudirektion/awel/luft_asbest_elektrosmog/elektrosmog/dokumente/PersMeas_AWEL_2016.pdf

[49] Frei P., Mohler E., Neubauer G. et al. (2009): Temporal and spatial variability of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields. *Environ Res* 109(6): 779–785.

[50] Röösli M., Lagorio S., Schoemaker M.J. et al. (2019): Brain and salivary gland tumours and mobile phone use: evaluating the evidence from various epidemiological study designs. *Annual Review of Public Health* 40: in press.

[51] Röösli M., Lagorio S., Schoemaker M.J. et al. (2019): Brain and salivary gland tumours and mobile phone use: evaluating the evidence from various epidemiological study designs. *Annual Review of Public Health* 40: in press.

[52] Liu D., Li C.S., Kang Y.Y., et al. (2017): Numerical analysis for infant's unintentional exposure to 3.5 GHz plane wave radiofrequency electromagnetic fields by field test of fifth generation wireless technologies. Radio Science 52(9): 1140-1148.

[53] Thors B., Furuskar A., Colombi D. et al. (2017): Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO. *Ieee Access* 5: 19711–19719.

[54] Baracca P., Weber A., T. Wild T. et al. (2018): A Statistical Approach for RF Exposure 2898 Compliance Boundary Assessment in Massive MIMO Systems. *WSA* 2899.

[55] Neben der hochfrequenten Mobilfunkstrahlung verursachen die elektrischen Ströme der Elektronik und der Batterie des Mobiltelefons zudem niederfrequente elektrische und magnetische Felder, die ebenfalls in den Kopf beziehungsweise die Hand eindringen (vgl. Faktenblatt – Mobiltelefon & Smartphone, Bundesamt für Gesundheit BAG, 2016). Im Hinblick auf die hier vorliegende Fragestellung – Ausgestaltung der Netzstruktur zur Minimierung der Immissionen – wird das Augenmerk nachfolgend auf den hochfrequenten Anteil der Exposition gelegt.

[56] Faktenblatt – Mobiltelefon & Smartphone, Bundesamt für Gesundheit BAG, 2016.

[57] Gajsek P., Ravazzani P., Wiart J. et al. (2015): Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz). *J Expo Sci Environ Epidemiol* 25(1): 37–44; Vrijheid M., Mann S., Vecchia P. et al. (2009): Determinants of mobile phone output power in a multinational study: implications for exposure assessment. *Occup Environ Med* 66(10): 664–671; Persson T., Tornevik C., Larsson L.E. et al. (2012): Output power distributions of terminals in a 3G mobile communication network. *Bioelectromagnetics* 33(4): 320–325.

[58] Persson T., Tornevik C., Larsson L.E. et al. (2012): Output power distributions of terminals in a 3G mobile communication network. *Bioelectromagnetics* 33(4): 320–325.

[59] Kühn S., Kuster N. (2013): Field Evaluation of the Human Exposure From Multiband, Multisystem Mobile Phones. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 55(2): 275–287.

[60] Paramananda J., Colombi D., Thors B. et al. (2017): Output Power Levels of 4G User Equipment and Implications on Realistic RF EMF Exposure Assessments. *ISEE Access* 5: 4545–4550.

[61] Popovic M., Koprivica M., Milinkovic J. et al. (2019): Experimental analysis of individual EMF exposure for GSM/UMTS/WLAN user devices. *Annals of Telecommunications* 74(1-2): 79–91.

[62] Huang Y., Wiart J. (2017): Simplified Assessment Method for Population RF Exposure Induced by a 4G Network. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology* 1(1): 34–40.

[63] Siehe etwa:
IEC TC106 (2016): IEC 62209-1:2016: Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication de-vices – Part 1: Devices used next to the ear (Frequency range of 300 MHz to 6 GHz). *International Electrotechnical Commission, Tech. Rep.*
IEC TC106 (2010): IEC 62209-1:2010: Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices – Human models, instrumentation, and procedures – Part 2: Procedure to determine the specific absorption rate (SAR) for wireless communication devices used in close proximity to the human body (frequency range of 30 MHz to 6 GHz). *International Electrotechnical Commission, Tech. Rep.*

[64] IEC (2018): Measurement Procedure for the Evaluation of Power Density Related to Human Exposure to Radio Frequency Fields From Wireless Communication Devices Operating Between 6 GHz and 100 GHz. International Electrotechnical Commission (IEC). TR63170/ED1.

[65] He Q., Zong L., Sun Y. et al. (2017): Adaptive response in mouse bone marrow stromal cells exposed to 900MHz radiofrequency fields: Impact of poly (ADP-ribose) polymerase (PARP). *Mutat Res* 820: 19–25.

[66] Neufeld E., Carrasco E., Murbach M. et al. (2018): Theoretical and numerical assessment of maximally allowable power-density averaging area for conservative electromagnetic exposure assessment above 6 GHz. *Bioelectromagnetics* 39(8): 617–630.

[67] Betzalel N., Ben Ishai P., Feldmann Y. (2018): The human skin as a sub-THz receiver – Does 5G pose a danger to it or not? *Environmental Research* 163: 208–216.

[68] Lauer O., Frei P., Gosselin M.C. et al. (2013): Combining near- and far-field exposure for an organ-specific and whole-body RF-EMF proxy for epidemiological research: A reference case. *Bioelectromagnetics* 34(5): 366–374.

[69] Frei P., Mohler E., Neubauer G. et al. (2009): Temporal and spatial variability of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields. *Environ Res* 109(6): 779–785.

[70] aus Lauer O., Frei P., Gosselin M.C. et al. (2013): Combining near- and far-field exposure for an organ-specific and whole-body RF-EMF proxy for epidemiological research: A reference case. *Bioelectromagnetics* 34(5): 366–374.

[71] Roser K., Schoeni A., Bürgi A. et al. (2015): Development of an RF-EMF Exposure Surrogate for Epidemiologic Research. *Int J Environ Res Public Health* 12(5): 5634–5656.

[72] GERoNiMO (Generalised EMF Research using Novel Methods): https://www.isglobal.org/en/-/geronimo-generalized-emf-research-using-novel-methods-an-integrated-approach-from-research-to-risk-assessment-and-support-to-risk-management

[73] Immissionen von kleinzelligen und grosszelligen Basisstationsnetzen, FSM – Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation, Mai 2018 / update

[74] Rapport techniques sur les déploiements pilotes de petites antennes en France (pour favoriser l'accès au très haut débit mobile, ANFR, 2018

[75] Informationsblatt 5G «Zukunft des Mobilfunks: Auswirkung auf Behörden» des Cercl'Air, Stand Juni 2018

[76] ETSI TS 136 213 V15.6.0 (2019-07): LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 15.6.0 Release 15)

[77] Cisco Internet Business Systems Group (2012), Stuart Taylor and Andy Young, The New World of SP Wi-Fi: Cisco IBSG Research Uncovers What U.S. Consumers Want from Wi-Fi and Mobile.

[78] Vgl. hierzu z. B. Referat Prof. J. Leuthold, ETH Zürich, am Science Brunch vom 6.12.2018

[79] Kuehn S., Pfeifer S., Kochal B., Kuster N. (2019): Modelling of Total Exposure in 5G Networks for Varied Topologies and User Scenarios.

[80] BUWAL (1998): Nichtionisierende Strahlung – Begrenzung der Immissionen von nichtionisierender Strahlung. Schriftenreihe Umwelt Nr. 302, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.

[81] Hug K., Achermann P., Dürrenberger G. et al. (2014): Beurteilung der Evidenz für biologische Effekte schwacher Hochfrequenzstrahlung, Bern, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektrosmog/externe-studien-berichte/beurteilung_der_evidenzfuerbiologischeeffekteschwacherhochfreque.pdf

[82] Zukunftstaugliche Mobilfunknetze – Bericht des Bundesrates in Erfüllung der Postulate Noser (12.3580) und FDP-Liberale Fraktion (14.3149), Februar 2015: https://www.bakom.admin.ch/bakom/de/home/das-bakom/organisation/rechtliche-grundlagen/bundesratsgeschaefte/zukunftstaugliche-mobilfunknetze.html

[83] Cochrane Reviews sind systematische Übersichtsarbeiten, in denen die Forschungsergebnisse zu Fragen der Gesundheitsversorgung und -politik zusammengefasst werden. Cochrane ist ein 1993 gegründetes, globales, unabhängiges Netzwerk von klinischen Forschern, Ärzten, Angehörigen der Gesundheitsfachberufe und Patienten.

[84] SCENIHR (2015): Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks.

[85] Independent Expert Group on Electromagnetic Fields (Danker-Hopfe H., Dasenbrock C., Huss A., Klaeboe L., Mjönes L, Moberg, L, Röösli M., Scarfi, M.R., van Deventer E., van Rongen E.) (2018): Recent Research on EMF and Health Risk - Twelfth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, ISSN: 2000-0456. Swedish Radiation Safety Authority, https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/radiation-protection/2018/201809/

Independent Expert Group on Electromagnetic Fields (Danker-Hopfe H., Dasenbrock C., Huss A., Klaeboe L., Mjönes L, Moberg, L, Röösli M., Scarfi, M.R., van Deventer E., van Rongen E.) 2016. Recent Research on EMF and Health Risk - Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, ISSN: 2000-0456. Swedish Radiation Safety Authority. http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/

Independent Expert Group on Electromagnetic Fields (Danker-Hopfe H., Dasenbrock C., Huss A., Klaeboe L., Mjönes L, Moberg, L, Röösli M., Scarfi, M.R., van Deventer E., van Rongen E.) 2015. Recent Research on EMF and Health Risk - Tenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, ISSN: 2000-0456. Swedish Radiation Safety Authority. http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/

[86] ARPANSA (2014): Review of Radiofrequency Health Effects Research – Scientific Literature 2000-2012. Report by the ARPANSA Radiofrequency Expert Panel. Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency. Technical Report 164.

[87] Anses (2016): Exposition aux radiofréquences et santé des enfants. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail; Anses (2018): Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

[88] ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) (2018): Draft – ICNIRP Guidelines: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz): Appendix B: Health Risk Assessment Literature, https://www.icnirp.org/en/publications/index.html

[89] Der Bericht ist noch nicht veröffentlicht.

[90] Anses (2016): Exposition aux radiofréquences et santé des enfants. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

[91] Anses (2018): Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

[92] Anses (2018): Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques. Avis de l'Anses. Rapport d'expertise collective. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

[93] Unter Nocebo-Effekt versteht man die krankmachende Wirkung einer Exposition aufgrund der Erwartungshaltung des Betroffenen, also das Gegenstück zum Placebo-Effekt.

[94] Sudan M., Birks L.E., Aurrekoetxea J.J. et al. (2018): Maternal cell phone use during pregnancy and child cognition at age 5 years in 3 birth cohorts. Environ Int 120: 155–162.

[95] Eidgenössische Kommission für Denkmalpflege EKD, Grundsatzdokument vom 22. Juni 2018

[96] Die entsprechenden Gebiete sind unter https://www.geo.admin.ch ersichtlich.

[97] Mobilfunkempfehlungen der BPUK vom 7. März 2013

[98] «Stärkung des Vollzugs im Umweltbereich», Interface Politikstudien Forschung Beratung, 2013: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/recht/externe-studien-berichte/staerkung_des_vollzugsimum-weltbereich.pdf

[99] https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/recht/externe-studien-berichte/erfolgsfaktoren-vollzug.pdf

[100] Medienmitteilung der BPUK vom 23. September 2019

[101] Medienmitteilung vom 20. September 2018

[102] ITU (2018). Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges. International Telecommunication Union: https://www.itu.int/en/ITU-D/Documents/ITU_5G_REPORT-2018.pdf

[103] https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaeft?AffairId=20093488

[104] https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/mitteilungen.msg-id-60064.html

[105] «Konzept für ein nationales Monitoring elektromagnetischer Felder», Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats Gilli 09.3488 «Elektromagnetische Felder. Monitoring» vom 18. Dezember 2015

[106] http://geoportal.ibgebim.be/webgis/antenne_emettrice_gsm.phtml?langtype=2060

[107] Dongus S., Röösli M. (2019): Machbarkeitsstudie: Monitoring von möglichen Gesundheitsauswirkungen von nichtionisierender Strahlung, Juni 2019, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt; mit Unterstützung der Ärztinnen und Ärzte für Umweltschutz, Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut, Basel.

[108] Dr. med. E. Steiner in Oekoskop 3/18, S. 7 ff.