

BERLINER HANDREICHUNG

Mobilfunk unter Berücksichtigung des Immissionsschutzes

BERLIN



Version : 2.0

Datum : 29.06.2022

Status : freigegeben / extern

Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe

Referat III B - Digitalisierung, Mobilität, Gesundheitswirtschaft

Fachgruppe - Digitalisierung, Digitalwirtschaft und Digitale Infrastruktur

Martin-Luther-Straße 105,
10825 Berlin

Kontakt: mobilfunk@senweb.berlin.de

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Tabellen- und Abbildungsverzeichnis | 3 |
| 1 Einleitung und Zusammenfassung | 4 |
| 1.1 Worum geht es? | 4 |
| 1.2 An wen richtet sich das Dokument? | 4 |
| 1.3 Was sind die Kernaussagen? | 4 |
| 2 Hochfrequente Elektromagnetische Felder (EMF) im Mobilfunk | 5 |
| 2.1 Grundlagen zu Elektromagnetischen Feldern | 5 |
| 2.2 Gepulste hochfrequente Elektromagnetische Felder | 6 |
| 2.3 EMF-Exposition durch Mobilfunkstandorte vs. Mobiltelefone | 6 |
| 2.4 Feldstärkeverlauf | 10 |
| 3 Grenzwerte | 12 |
| 3.1 Allgemein | 12 |
| 3.2 Grenzwerte für Mobilfunkstandorte (ortsfeste Sender) | 12 |
| 3.3 Grenzwerte für Mobiltelefone (ortsveränderliche Sender) | 12 |
| 3.4 Grenzwerte - Wer legt sie fest und wer überwacht sie? | 13 |
| 3.5 Sind niedrigere Grenzwerte (für Mobilfunkstandorte) notwendig? | 15 |
| 3.6 Sind abweichende Regelungen für spezielle Orte sinnvoll? | 16 |
| 4 Stand der Forschung zu nicht-thermischen Wirkungen | 17 |
| 4.1 Diskussion ausgewählter Studien zu nicht-thermischen Wirkungen | 19 |
| 4.2 Was bedeutet die 2B-Einstufung von „Handystrahlung“ durch die IARC? | 20 |
| 4.3 Elektrosensibilität | 21 |
| 4.4 Besteht weiterer Forschungsbedarf? | 21 |
| 5 Stellt 5G ein Risiko dar? | 22 |
| 5.1 Frequenzbereiche von 5G | 22 |
| 5.2 Stellen 5G-Mobilfunkstandorte ein Risiko dar? | 23 |
| 6 Berliner EMF-Messberichte | 24 |
| 6.1 LTE-Makrozellstandorte | 24 |
| 6.2 LTE-Kleinzellenstandorte | 26 |
| 6.3 5G-Makrozellstandorte | 27 |
| Abkürzungen | 31 |
| Referenzen | 32 |

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabellen

| | |
|--|----|
| Tabelle 1 Vergleich der Exposition durch Mobiltelefone und Basisstationen (Berlin, [33]) | 8 |
| Tabelle 2 Zusammenfassende Bewertung für alle evaluierten Endpunkte (SSK) [42] | 17 |
| Tabelle 3 Veränderung der in 2019/2020 und 2022 gemessenen Immissionswerte [33] | 28 |
| Tabelle 4 Vergleichsmessung der Maximal- und der Momentanmissionen [33] | 30 |

Abbildungen

| | |
|--|----|
| Abbildung 1 Einordnung Mobilfunkfrequenz im Frequenzspektrum (Quelle: BfS Grafik: SenWEB) | 5 |
| Abbildung 2 Mobiltelefon-Sendeleistung bzgl. Entfernung zur Basisstation [34] | 7 |
| Abbildung 3 Spannweitendiagramm gemäß der Tabelle 1; der Median ist rot markiert | 8 |
| Abbildung 4 Durchschnittliche 24-Stunden-Dosis nicht-ionisierender Strahlung [21] | 9 |
| Abbildung 5 Schematische Darstellung Abstrahlcharakteristik [Quelle: Gigabitbüro des Bundes] | 10 |
| Abbildung 6 Verlauf feldstärkebasierte Grenzwertausschöpfung (freistehender Mast) | 11 |
| Abbildung 7 Festlegung von Grenzwerten - Dokumente & Akteure | 13 |
| Abbildung 8 Überwachung der Einhaltung der Grenzwerte für Mobilfunkstandorte | 14 |
| Abbildung 9 Feldstärkebasierte Grenzwertausschöpfung leistungsstarker Makrozellstandort [33] | 24 |
| Abbildung 10 Feldstärkebasierte Grenzwertausschöpfung typischer Makrozellstandort [33] | 25 |
| Abbildung 11 Feldstärkebasierte Grenzwertausschöpfung LTE-Kleinzellenstandort [34] | 26 |
| Abbildung 12 Immissionswerte an einem 5G-DSS-Standort | 27 |
| Abbildung 13 Messwerte an einem 5G-Standort mit massive MIMO-Antennen | 29 |

1 Einleitung und Zusammenfassung

1.1 Worum geht es?

Die Diskussion zu möglichen Risiken des Mobilfunks wird seit Jahrzehnten geführt. Neben den bekannten thermischen Wirkungen werden auch mögliche nicht-thermische Wirkungen vermutet bzw. es werden Forschungsanstrengungen unternommen, um diese zu belegen. Nachdem die Diskussion um Mobilfunkrisiken bei der Einführung von LTE-Mobilfunk in Berlin weitgehend kein Thema war, hat die Einführung des 5G-Mobilfunk die Kritiker wieder aktiver werden lassen.

Dieses Dokument informiert zu Gesetzen und Verordnungen des Immissionsschutzes, zum Stand der Forschung und deren Bewertung. Anhand der Ergebnisse der Berliner EMF-Messungen wird die Grenzwertausschöpfung an relevanten Orten aufgezeigt und Betrachtungen zu Regeln für sensible Orte und Höhen von Grenzwerten angestellt. Weiterhin wird die Frage adressiert, ob der 5G-Mobilfunk ein Risiko darstellt.

1.2 An wen richtet sich das Dokument?

Diese Handreichung richtet sich vordergründig an Mitarbeitende der Berliner Verwaltung, welche z.B. an Entscheidungen beteiligt sind, welche den Mobilfunk betreffen (z.B. kommunale Beteiligung nach §7a der Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 26. BImSchV) oder die sich mit Fragen von Bürgerinnen und Bürgern und Medien befassen.

Das Dokument kann aber auch interessierten Berlinerinnen und Berlinern helfen die Diskussionen in den Medien einzuordnen und zu bewerten.

1.3 Was sind die Kernaussagen?

Die **Grenzwerte** für hochfrequente Elektromagnetische Felder, wie sie im Mobilfunk genutzt werden, werden nach **wissenschaftlichen Erkenntnissen festgelegt** (siehe Kapitel 2.4). Bei Einhaltung der Grenzwerte sind **keine gesundheitlichen Auswirkungen** zu erwarten.

In den letzten Jahrzehnten wurden in zahlreichen Studien mögliche Wirkungen, einschließlich möglicher nicht-thermischer Wirkungen, untersucht. **Für Mobilfunkstandorte** (Basisstationen) gibt es **keine Evidenz** für **nicht-thermische Wirkungen**, wenn die vorgegebenen Grenzwerte eingehalten werden (Kapitel 4). **Begrenzte Evidenz** für eine nicht-thermische Wirkung liegt für die **intensive Nutzung von Mobiltelefonen** vor (Kapitel 2.3 und Kapitel 4).

Von der Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) **abweichende Regelungen** für spezielle Orte (mit sensitiver Nutzung) sind **nicht notwendig** und **können sogar kontraproduktiv** sein (siehe Kapitel 3.6).

5G-Mobilfunkstandorte sind unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen **wie LTE-Mobilfunkstandorte** zu beurteilen. Dies bedeutet, dass bei Einhaltung der Grenzwerte **keine gesundheitlichen Auswirkungen** zu erwarten sind (siehe Kapitel 5 sowie Kapitel 6.3).

2 Hochfrequente Elektromagnetische Felder (EMF) im Mobilfunk

2.1 Grundlagen zu Elektromagnetischen Feldern

Im Mobilfunk werden hochfrequente **elektromagnetische Felder (EMF)** zur Übertragung von Sprache und Daten verwendet. Bei hohen Frequenzen sind das elektrische Feld und das magnetische Feld einer Quelle eng miteinander gekoppelt, so dass man vom elektromagnetischen Feld (EMF) spricht [1]. Die **Frequenz** ist eine physikalische Einheit, welche angibt, wie viele Schwingungen pro Sekunde aufeinander folgen (siehe Abbildung 1) und wird in **Hertz (Hz)** angegeben. Bei hohen Frequenzen verwendet man die sogenannten SI-Präfixe (k=Kilo $\triangleq 10^3$, M = Mega $\triangleq 10^6$, G = Giga $\triangleq 10^9$, T = Tera $\triangleq 10^{12}$, P = Peta $\triangleq 10^{15}$, E = Exa $\triangleq 10^{18}$) um die Anzahl der darzustellenden Stellen zu reduzieren. Der Weg, der während eines vollständigen Schwingungsdurchlaufs zurückgelegt wird, ist die physikalische Einheit Wellenlänge. Wellenlänge und Frequenz stehen über die Konstante „Lichtgeschwindigkeit“ in einem festen Verhältnis.

Die Begriffe „Feld“ und „Strahlung“ können im Mobilfunk synonym verwendet werden. Dabei bezieht sich der Begriff „Strahlung“ auf den Energietransport und der Begriff „**Feld**“ beschreibt die räumliche Verteilung der Kraftwirkung auf elektrische Ladungen und Ströme [1].

Die Frequenz von **hochfrequenten EMF** beginnt bei 100 kHz und endet bei 300 GHz, wobei für den Mobilfunk bisher Lizenzen bis 3,8 GHz vergeben wurden. Hochfrequente EMF, und das ist wichtig für die Bewertung, gehören zum Bereich der **nicht-ionisierenden** Strahlung.

Die Bezeichnung „**nicht-ionisierend**“ beschreibt den Umstand, dass die Strahlung **nicht genügend Energie** hat, um Elektronen aus Atomen oder Molekülen zu lösen. Damit hat hochfrequente EMF, also auch Mobilfunk(-strahlung), nicht genügend Energie, um das Erbgut zu schädigen oder unmittelbar an der Entstehung von Krebs beteiligt zu sein [1].

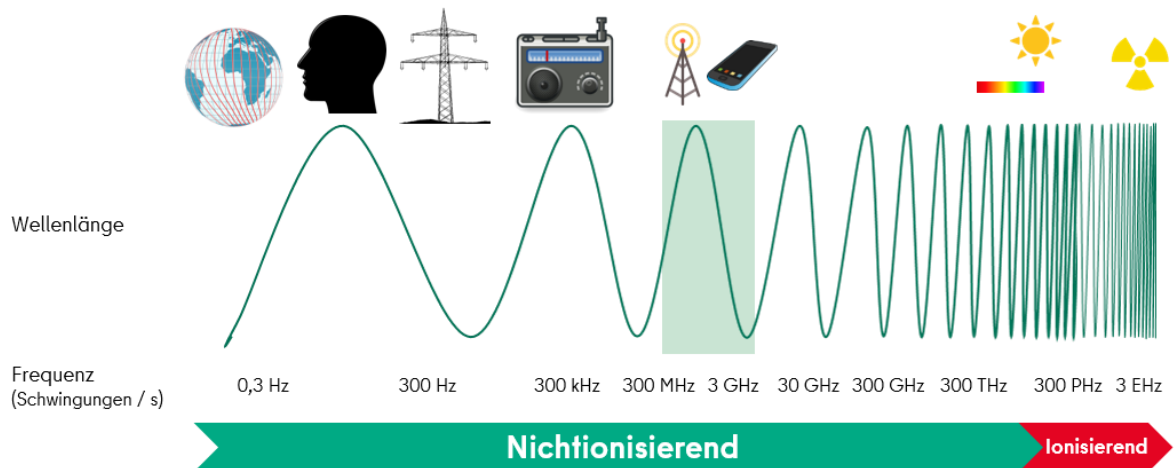


Abbildung 1 Einordnung Mobilfunkfrequenz im Frequenzspektrum (Quelle: BfS | Grafik: SenWEB)

Für den Mobilfunk in Deutschland können gegenwärtig Frequenzbänder im Frequenzbereich von 390 MHz bis 3,8 GHz genutzt werden. Dieser Bereich wird auch als **Sub-6-GHz-Bereich (< 6 GHz)** bezeichnet. Der Frequenzbereich 24,25 GHz - 27,5 GHz kann für lokale Anwendungen sowie zur Überbrückung der s.g. letzten Meile genutzt werden. Dieser Frequenzbereich wird vereinfacht auch als **26-GHz-Bereich** bezeichnet und gehört zum **Millimeterwellen-Bereich**; z.B. beträgt die Wellenlänge bei 26 GHz etwa 11,5 mm. Der Frequenzbereich des Lichts beginnt bei einer Frequenz von 380 THz (d.h. 380.000 GHz) und ist das rote Licht.

Die Frequenz des roten Lichts ist somit mehr als 1200fach höher als die obere Frequenz der hochfrequenten EMF, welche bei 300 GHz liegt.

Der Bereich **ionisierender** Strahlung beginnt bei 750 THz, welches violetterem Licht bzw. Ultra-Violett (UV) entspricht [2]. Darüber ist im Frequenzbereich die Röntgenstrahlung (30 PHz bis 30 EHz) und die Gammastrahlung (> 30 EHz) eingeordnet.

Hochfrequente EMF, also auch Mobilfunk(-strahlung), **können** durch **Erwärmung des Gewebes gesundheitliche Schäden verursachen**. Das Verursachen von Schäden wird durch die **Festlegung** von **Grenzwerten** (siehe Kapitel 2.4) und der Sicherstellung ihrer Einhaltung (siehe Kapitel 3.4) wirksam verhindert.

2.2 Gepulste hochfrequente Elektromagnetische Felder

Für die Kommunikation von der Mobilfunkstation zum mobilen Endgerät („Downlink“) sowie vom mobilen Endgerät zur Mobilfunkstation („Uplink“) werden unterschiedliche Verfahren verwendet:

Entweder werden Uplink und Downlink in *unterschiedliche* Frequenzbänder gelegt oder die Kommunikation erfolgt in *einem* Frequenzband in beide Richtungen.

In diesem Fall wird von Time Division Duplex (TDD) und gelegentlich gepulsten elektromagnetischen Feldern gesprochen. Gepulste elektromagnetische Felder sind nicht kontinuierlich abgegebene Hochfrequenzfelder. Das von einer Mobilfunkstation ausgesendete Feld ist in der Regel viel weniger „gepulst“ als das von Mobiltelefonen, da die Station auch mit anderen Handys kommuniziert.

In den letzten Jahrzehnten sind **zahlreiche Studien** durchgeführt worden, **um Nachweise oder Hinweise für mögliche Risiken** durch Mobilfunk(-strahlung) zu finden, welche z.B. auf bislang noch unbekannte Wirkmechanismen hindeuten (siehe Kapitel 4). Generell ist es aber **unmöglich** eine **Nicht-Wirkung**, also eine Wirkung, die nicht existiert, **nachzuweisen**.

Wissenschaftliche Kommissionen haben diese Studien wiederholt zusammengefasst und bewertet (siehe Kapitel 4). Bei Einhaltung der Grenzwerte wird der **Mobilfunk als sicher eingestuft** [22]. Wegen noch offener Fragen zu Langzeitwirkungen (> 15 Jahre) werden Vorsorgemaßnahmen, speziell für die Nutzung von Mobiltelefonen, empfohlen [13].

2.3 EMF-Exposition durch Mobilfunkstandorte vs. Mobiltelefone

Die Quellen für die hochfrequenten elektromagnetischen Frequenzen im Mobilfunk kann man im Wesentlichen in die zwei folgenden Typen unterteilen:

- **ortsfeste Sender** (stärkere Sender, große Distanz zu Personen, gleichmäßige Exposition des ganzen Körpers)
- **ortsveränderliche Sender** (schwache Sender, geringe Distanz, lokale Exposition eines Körperteils)

Zu den **ortsfesten Sendern** zählen **Mobilfunkbasisstationen** (Makro- und Kleinzellen). Die klassischen Mobilfunk-Dachstandorte haben in Innenstädten üblicherweise einen Abstand von 300 bis 500 Metern und werden technisch als **Makrozellen** bezeichnet. **Kleinzellen** („Small Cells“) zeichnen sich durch eine geringe Sendeleistung und Reichweite aus und dienen der Kapazitätserhöhung an Orten mit hoher Nutzerzahl. Die Antennen der Kleinzellen sind oft an geeigneten Trägerstrukturen, wie Lichtmasten angebracht [30].

Ortsveränderliche Sender sind **Mobiltelefone**, Funkmodems, etc., welche üblicherweise einer Person zugeordnet sind und von dieser meist mitgeführt werden bzw. sich in deren Nähe befinden. Die Sendeleistung eines Mobiltelefons ist wesentlich geringer als die einer Mobilfunk-Basisstation. Dafür trägt man das Mobiltelefon in der Regel am Körper und bei Gesprächen ggf. direkt am Ohr.

Um diese Risiken durch Mobiltelefone und Basisstationen auszuschließen, wurden **Grenzwerte** definiert (siehe Kapitel 3.4). Die **vermuteten potentiellen Risiken** im Kontext des Mobilfunks sind nach den vorliegenden Studien und Bewertungen (Kapitel 4, 4.1) mit der **Nutzung des Mobiltelefons** verbunden. Um diese vermuteten potentiellen **Risiken** im Zusammenhang mit der Nutzung von Mobiltelefonen zu **minimieren** wurden vom BfS **Handlungsempfehlungen** [13] definiert.

Die **Abhängigkeit der Sendeleistung des Mobiltelefons** von der Entfernung zur Basisstation demonstriert eine Messung der TU Ilmenau im Auftrag der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe (Abbildung 2). Die Sendeleistung des Mobiltelefons ist unmittelbar neben der Kleinzelle um etwa den **Faktor 700** geringer als bei einer Verbindung zur Makrozelle. Die Feldstärke der Kleinzelle beträgt dabei 6 % des EMF-Grenzwerts (siehe Kapitel 6.2 und speziell Abbildung 11).

Der Vergleich der Exposition von Personen durch Mobilfunkstandorte und Mobiltelefone kann auf Basis einer größeren Stichprobe erfolgen. In dem von der TU-Ilmenau durchgeführten Projekt „EMF-Messung & Auswertung

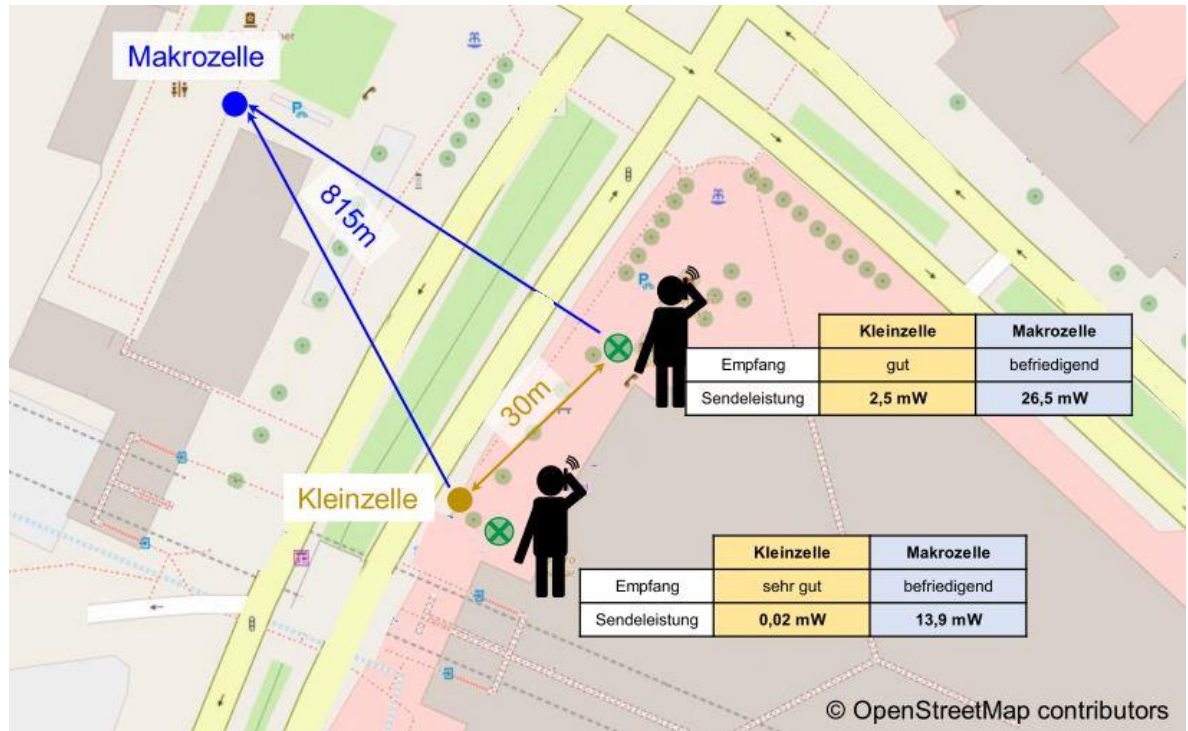


Abbildung 2 Mobiltelefon-Sendeleistung bzgl. Entfernung zur Basisstation [34]

(Mobilfunk) 2020“ [33] wurden die an 3 repräsentativen Mobilfunkstandorten in Berlin erfassten Messwerte mit den SAR-Werten von Mobiltelefonen [14] verglichen. Dabei erfolgte die Ermittlung und Darstellung der **leistungs-basierten** Grenzwertausschöpfung jeweils bei maximaler Auslastung von Mobilfunkanlage und Mobiltelefon (siehe Abbildung 3).

Hinweis: Die Exposition des Mobiltelefons wird immer leistungs-basiert angegeben, wohingegen die Exposition der Basisstation als Feldstärke angegeben wird, da die Grenzwerte in der 26. BImSchV als Feldstärkewerte angegeben sind. Eine Umrechnung (siehe A2 in [33]) macht beide Werte vergleichbar.

Tabelle 1 stellt die für die Basisstationen gemessenen Feldstärkewerte prozentual zum Grenzwert sowie die Leistungsflussdichte prozentual zum Grenzwert dar. Dabei fällt z.B. auf, dass 17,5 % Feldstärkewert einer leistungs-basierten Grenzwertausschöpfung von 3,06 % entspricht. Dieser nominell geringe Wert sollte nicht darüber hinwegtäuschen, dass die **leistungs-basierte Grenzwertausschöpfung** zu höheren Feldintensitäten **quadratisch**, und somit wesentlich schneller als die feldstärkebasierte Grenzwertausschöpfung, **ansteigt**.

Tabelle 1 Vergleich der Exposition durch Mobiltelefone und Basisstationen (Berlin, [33])

| | SAR in W/kg | SAR in % vom Grenzwert | Elektr. Feldstärke in % vom Grenzwert | Leistungsflussdichte in % vom Grenzwert |
|---------|-------------|------------------------|---------------------------------------|---|
| Minimum | 0,01 | 0,5 | 0,3 | 0,001 |
| Maximum | 1,82 | 91 | 17,5 | 3,06 |
| Median | 0,60 | 30 | 3,25 | 0,11 |

Der Vergleich der leistungsbasierten **Grenzwertausschöpfung** zeigt, dass ein **Mobiltelefon** die Grenzwerte **wesentlich stärker** (maximal 90 %, median 30 %) **als ein Mobilfunkstandort** (Basisstation) ausnutzt (maximal 3,06 %, Median 0,1%).

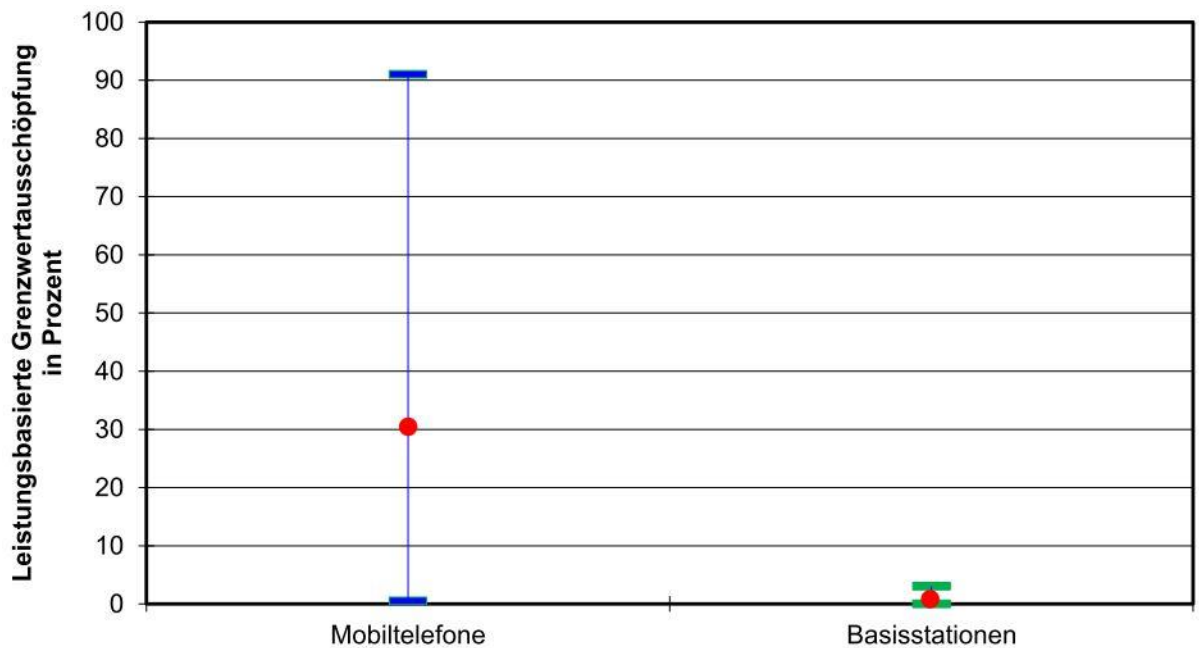


Abbildung 3 Spannweitendiagramm gemäß der Tabelle 1; der Median ist rot markiert

Einen weiteren Ansatz zum Vergleich der Exposition durch Mobilfunkstandorte und Mobilfunktelefone wählte die vom **Schweizer Bundesministerium** für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (**UVEK**) eingesetzte **Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung** [21]. Diese verwendet das sogenannte kumulative Dosismaß (J/kg).

Die Abbildung 4 stellt das **kumulative** durchschnittliche **Dosismaß für 24-Stunden vergleichend** für die **Gehirndosis** und **Ganzkörperdosis** dar. Dabei wird der Beitrag der **körperfernen** Quellen (Mobilfunkstandorte bzw. Basisstationen, Fernsehsender, etc.) und **körpernahen** Quellen (Mobiltelefone, Laptops, etc.) separat aufgeführt.

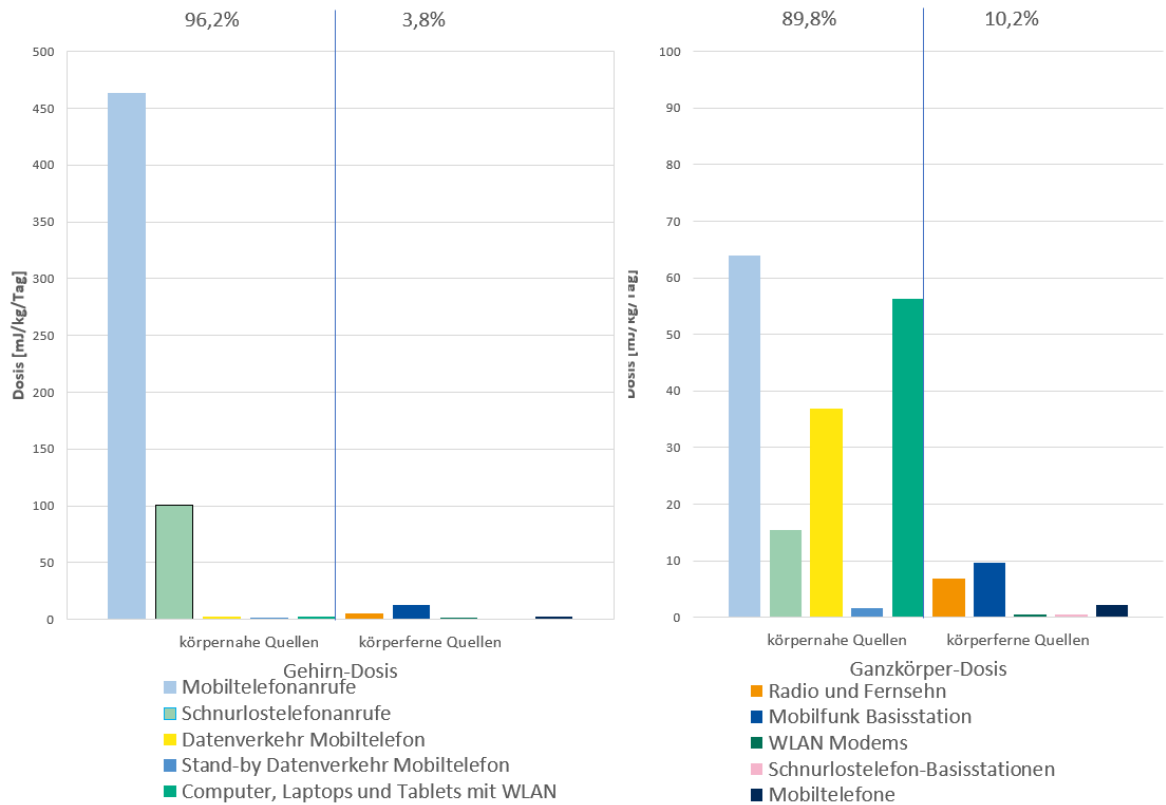


Abbildung 4 Durchschnittliche 24-Stunden-Dosis nicht-ionisierender Strahlung [21]

Hinweis: Mobiltelefone senden im Wesentlichen nur während eines Telefonates und bei Datenverkehr und tun dies ansonsten nur sporadisch. Aus diesem Grund sind für die Quelle Mobiltelefon der Datenverkehr und die Sprachtelefonie separat aufgeführt.

Die Abbildung 4 zeigt, dass Felder der **Mobilfunkbasisstationen** (ortsfeste Sender) bei der Ganzkörperdosis **eine untergeordnete Rolle** spielen und bei der **Gehirndosis zu vernachlässigen** sind.

2.4 Feldstärkeverlauf

Bedenken gegenüber dem Mobilfunk werden oft in Bezug zur **räumlichen Nähe** zu einem **Mobilfunkstandort** geäußert. Die Mobilfunkstandorte können in der Standortdatenbank der Bundesnetzagentur [15] abgefragt werden. Sie sind aber auch wegen ihrer Größe und des typischen Erscheinungsbilds gut zu erkennen. Auf die Unterschiede zwischen Mobilfunkstandorten und Mobilfunktelefonen bzgl. der EMF-Exposition wird in Kapitel 2.3 eingegangen. Diese zeigen, dass Vorsorgemaßnahmen bei Mobiltelefonen mindestens genauso wichtig sind wie die für Basisstationen.

Generell hängt die Stärke eines elektromagnetischen Feldes von der Entfernung vom Sender ab, wobei unter Idealbedingungen die **Feldstärke quadratisch mit steigender Entfernung abnimmt**. Dies gilt für eine gleichmäßige Abstrahlung durch die Antenne in alle Richtungen. Somit wäre die maximale Feldstärke nahe der Antenne zu erwarten, welche dann mit größer werdender Entfernung schnell abnimmt. Eine **Mobilfunkantenne** hat allerdings eine **andere Abstrahlcharakteristik** (siehe Abbildung 5).

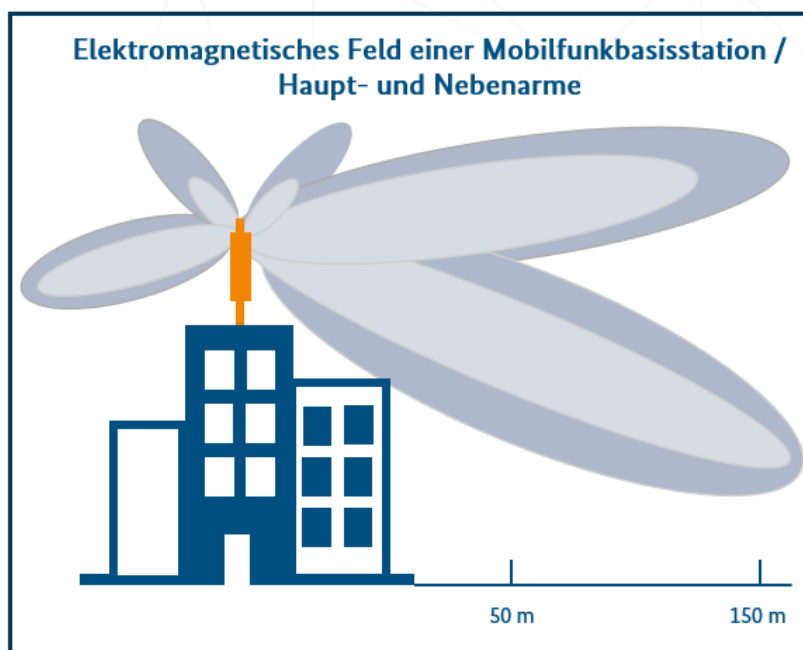


Abbildung 5 Schematische Darstellung Abstrahlcharakteristik [Quelle: Gigabitbüro des Bundes]

Ein Mobilfunkstandort hat üblicherweise drei Antennen, welche jeweils einen Sektor von 120° abdecken. Die Abstrahlcharakteristik jeder einzelnen Antenne (siehe Abbildung 5) hat eine **Hauptstrahlrichtung**, wobei Orte, welche nicht vom Hauptstrahl abgedeckt werden, eine geringere Feldstärke aufweisen. Hinzukommen, technisch bedingt, **Nebenstrahlrichtungen**.

Die ortsabhängige Position in den Haupt- und Nebenstrahlrichtungen führt zu wiederholtem Anstieg und Abfall der Feldstärkewerte in Abhängigkeit der Entfernung. Um dies auf Basis eines praktischen Beispiels darstellen zu können wurde in Steglitz-Zehlendorf ein passender Mobilfunkstandort (freistehender Mast, freie Sichtachse) vermessen (siehe Abbildung 6).

Die Abbildung 6 zeigt gut, dass wesentlich höhere Werte als direkt am Mobilfunkstandort, in größerer Entfernung, z.B. 200m, auftreten können. In diesem Sinne erlaubt die **Entfernung** zum Mobilfunkstandort **keine verlässliche Aussage über die Höhe** des zu erwartenden Wertes der **Feldstärke**. Abgesehen davon liegen alle Messwerte **weit unter den Grenzwerten der 26. BImSchV**.

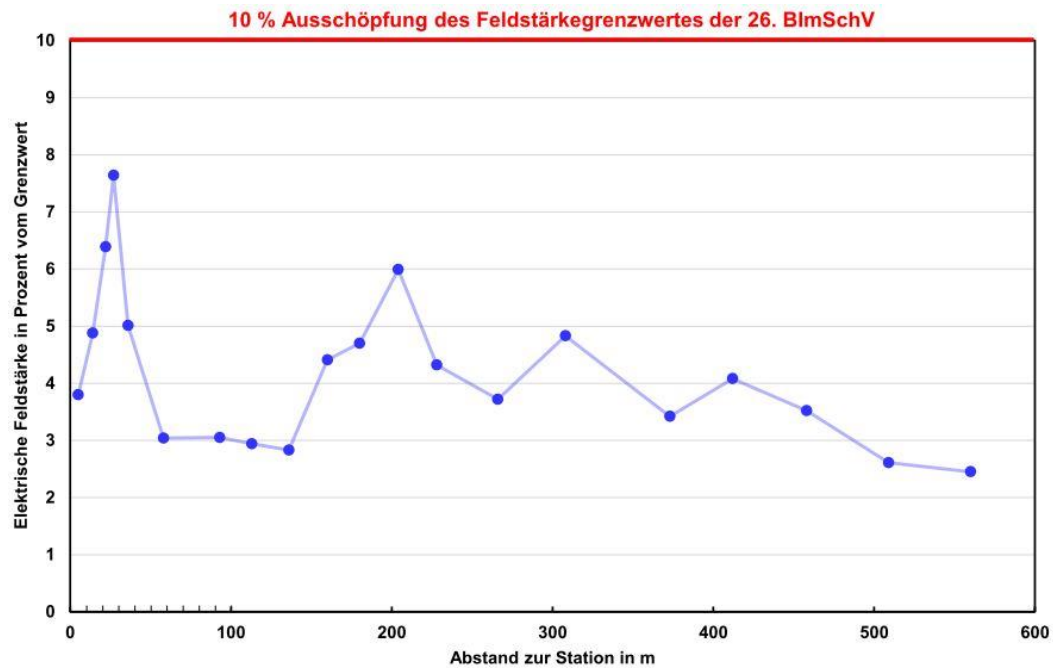


Abbildung 6 Verlauf feldstärkebasierte Grenzwertausschöpfung (freistehender Mast)

3 Grenzwerte

3.1 Allgemein

Hochfrequente elektromagnetische Felder werden vom Körper teilweise aufgenommen, d.h. absorbiert. Der **An teil der absorbierten Energie** hängt von der Stärke und der Frequenz des Feldes ab. Die **nachgewiesene Wirkung** der hochfrequenten elektromagnetischen Felder **ist** die **Wärmewirkung**. Diese wird durch die Anregung von Molekülen und der damit verbundenen Reibung verursacht.

Elektromagnetische Felder (Mobilfunkstrahlung) haben, wie in Kapitel 2 dargelegt, nicht genügend Energie, um das Erbgut zu schädigen oder unmittelbar an der Entstehung von Krebs beteiligt zu sein. Eine **Betrachtung zu vermuteten nicht-thermischen Wirkungen**, wie oxidativer Zellstress, findet sich in Kapitel 4.

Maßgeblich für die biologische Wirkung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern sind die absorbierte Energie und deren thermische Wirkung. Die **absorbierte Energie** pro Zeiteinheit wird in Watt pro Kilogramm (W/kg) angegeben und als Spezifische Absorptionsrate (**SAR**) bezeichnet.

3.2 Grenzwerte für Mobilfunkstandorte (ortsfeste Sender)

Eine **Erhöhung der Körperkerntemperatur um mehr als 1°C** über einen längeren Zeitraum, hat gesundheitliche Wirkungen. Bei hochfrequenten elektromagnetischen Feldern, welche auf den gesamten Körper eines Menschen einwirken, wird dies bei einem Ganzkörper-SAR-Wert von 4 W/kg erreicht. Mit einem **Sicherheitsfaktor von 50** wird der **Grenzwert auf 0,08 W/kg festgelegt** [5]. Dieser ist für **Sendeanlagen** relevant, da deren Energie wegen der Entfernung zwischen Sendeanlage und Körper auf den **gesamten Körper** und nicht nur punktuell einwirkt.

Für die **lokale Exposition** z.B. durch ein Mobiltelefon am Kopf werden zusätzliche so genannte **Teilkörper-SAR-Grenzwerte** festgelegt, die eine lokale Erwärmung der exponierten Körperstelle begrenzen (siehe Kapitel 3.3).

Über Computermodellierung und experimentelle Daten wurde die **Stärke** des hochfrequenten **elektrischen Feldes** bestimmt, die zum Erreichen dieses **SAR-Grenzwerts erforderlich ist**. Im Fernfeld-Bereich¹ der Sendeanlage stehen das elektrische Feld und das magnetische Feld in einer festen Beziehung, so dass die Angabe eines **Grenzwerts**, entweder **für das elektrische Feld (Einheit: V/m)** oder für das magnetische Feld (Einheit: A/m), ausreichend ist. Üblicherweise werden bei Messungen die ermittelten Werte für das elektrische Feld (Einheit: V/m) angegeben.

Die **Grenzwerte für ortsfeste Sender** sind in der Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (**26. BImSchV**) [9], speziell im Anhang 1 [10], **festgelegt**.

Die Grenzwerte der elektrischen Feldstärke sind frequenzabhängig, da die spezifische Absorptionsrate (SAR) von der Frequenz abhängt².

3.3 Grenzwerte für Mobiltelefone (ortsveränderliche Sender)

Die **Grenzwerte für Mobiltelefone** werden **nicht in der 26. BImSchV** [9] festgelegt. Für diese gelten die Grenzwerte des **Funkanlagengesetzes** (FuAG) [37].

Für die **lokale Exposition** (z.B. durch ein Mobiltelefon am Kopf) wurden sogenannte **Teilkörper-SAR-Grenzwerte** festgelegt, die eine lokale Erwärmung der exponierten Körperstelle begrenzen. Diese betragen für die Exposition von Kopf und Rumpf 2 W/kg und für Gliedmaßen 4 W/kg und folgen damit den **international empfohlenen SAR-Grenzwerten** [5], welche auch in der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EC [12] übernommen wurden.

¹ Der **Begriff Fernfeld** ist ein technischer Begriff und beginnt entsprechend der Definition der Bundesnetzagentur [7], [8] beim **Vierfachen der Wellenlänge** (4λ). So beginnt das Fernfeld für eine Frequenz von 700MHz ($\lambda = 42,83$ cm) ab 1,71m und für 3GHz ($\lambda = 9,99$ cm) ab ca. 40cm.

² Die Energieaufnahme ist besonders hoch, wenn die Körperhöhe die halbe Wellenlänge des hochfrequenten elektromagnetischen Feldes ($\lambda/2$) ist (Resonanzfrequenz). Dies ist bei Erwachsenen bei ca. 70 MHz und bei Kindern bei 100 MHz [3].

Die Hersteller von Mobiltelefonen bzw. mobilen Endgeräten müssen die SAR-Werte ihrer Produkte entsprechend europäischer Messnormen ermitteln und angeben [11].

Das Bundesamt für Strahlenschutz hat Empfehlungen für die Nutzung von Mobiltelefonen herausgegeben [13]. U.a. wird empfohlen möglichst **nicht bei schlechtem Empfang zu telefonieren**, da dann die **Sendeleistung des Mobiltelefons höher** ist. Der Empfang kann ggf. durch die Nutzung einer externen Antenne verbessert werden.

3.4 Grenzwerte – Wer legt sie fest und wer überwacht sie?

Die **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)** ist eine Nicht-Regierungsorganisation, welche durch die **World Health Organization (WHO)** anerkannt ist. Sie organisiert und unterstützt die Arbeit von Expertengruppen und veröffentlicht die Ergebnisse als Richtlinien [5]. Die ICNIRP entstand auf Grund einer Initiative der International Radiation Protection Association (IRPA).

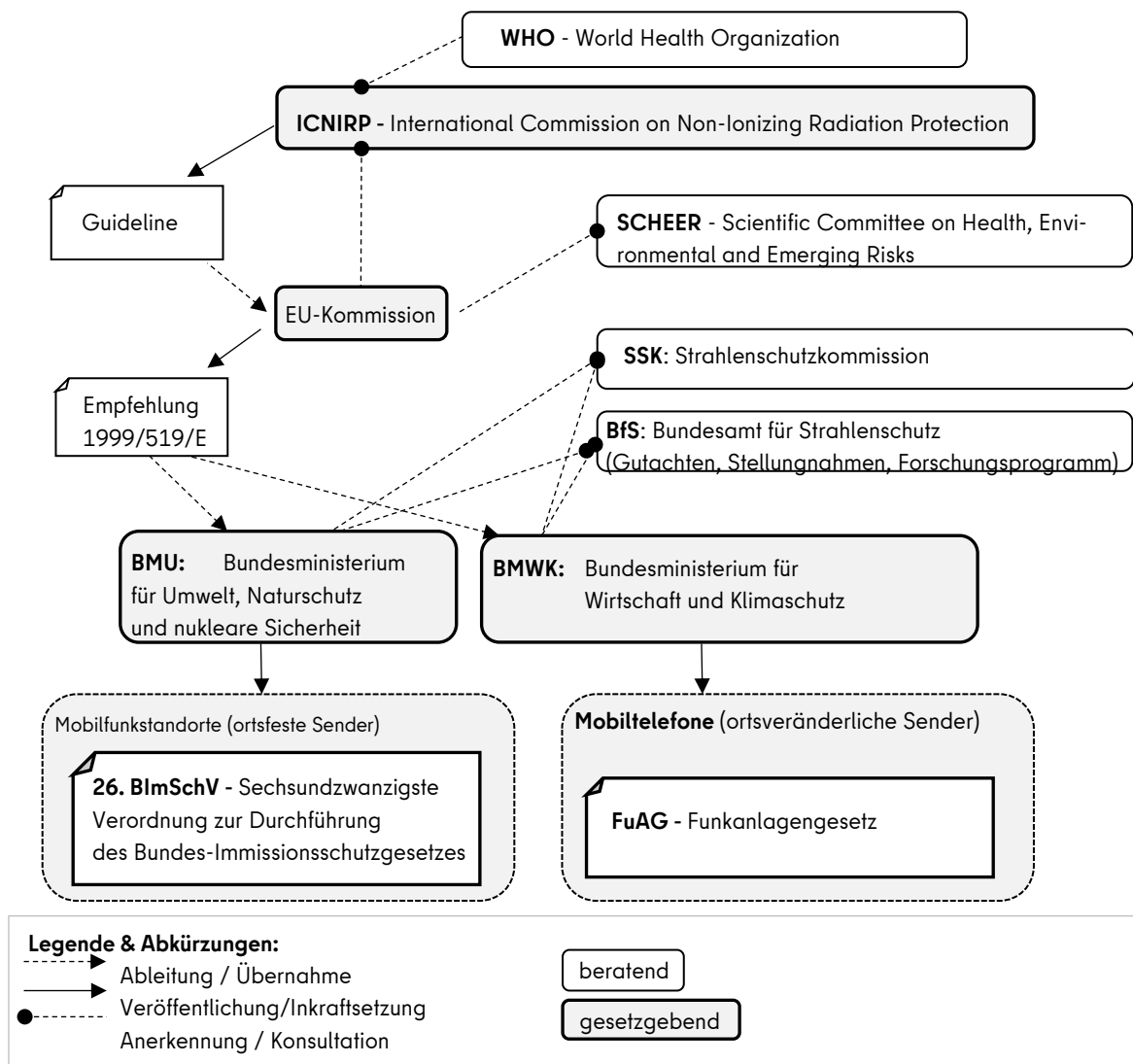


Abbildung 7 Festlegung von Grenzwerten – Dokumente & Akteure

Die **ICNIRP** hat im März 2022 ein Statement veröffentlicht in dem die Statuten, die Finanzierung, die Offenlegung der Mitglieder und die Grundlinien der wissenschaftlichen Arbeit von ICNIRP festgehalten werden. Die ICNIRP

wird durch Fördermittel von gemeinnützigen staatlichen und wissenschaftlichen Organisationen finanziert und erhält keine Mittel von der Industrie oder anderen interessierten Parteien. [41]

Die **Europäische Kommission** (EU-Kommission) konsultiert die ICNIRP, um die EU-Empfehlung zu erarbeiten. Diese wird zusammen mit der Bewertung der **deutschen Strahlenschutzkommission (SSK)** für die Erarbeitung der Bundesimmissionsschutzverordnung (BlmSchV) berücksichtigt.

Das Bundesministerium der Justiz (**BMJ**) gibt die „Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder“ (**BEMFV**) heraus [15]. Im Rahmen dieses **Nachweisverfahrens** wird die Einhaltung der in der **26.BlmSchV** [9], [10] festgelegten Grenzwerte vor Inbetriebnahme des Standorts von der **BNetzA** geprüft. Bei positiver Prüfung wird die **Standortbescheinigung** erteilt, welche die Nutzung des Mobilfunkstandortes erlaubt.

Die **freiwillige Selbstverpflichtung der Mobilfunknetzbetreiber** [16] gegenüber der Bundesregierung, vertreten durch das BMUV, stellt klar, dass die Verfahren und Grenzwerte entsprechend BEMFV und 26. BlmSchV auch für stationäre Mobilfunkanlagen mit Leistung im Bereich zwischen **2 Watt und 10 Watt** (EIRP) Anwendung finden.

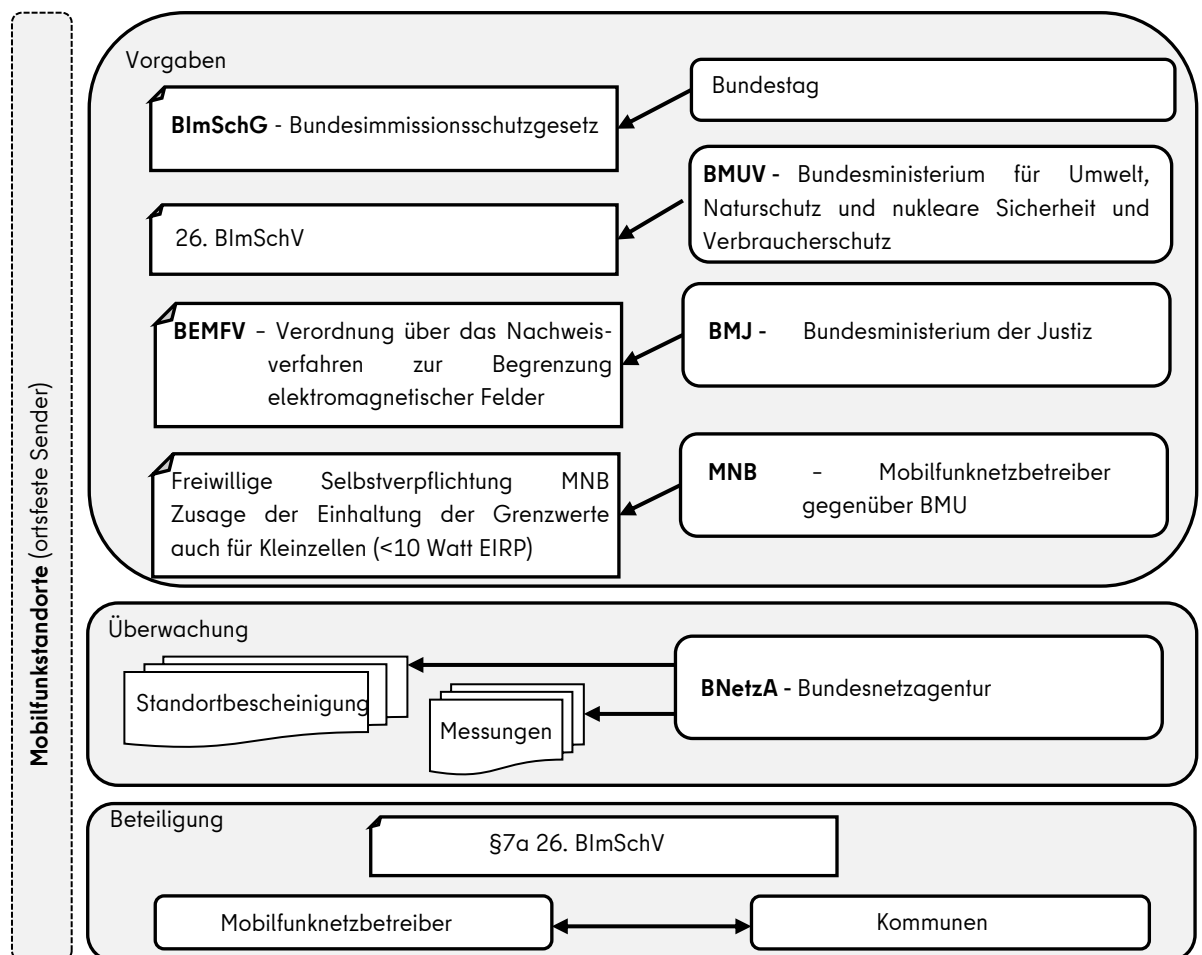


Abbildung 8 Überwachung der Einhaltung der Grenzwerte für Mobilfunkstandorte

Die BNetzA führt kontinuierlich eigene Messungen zur Überprüfung der Einhaltung der Grenzwerte durch und veröffentlicht diese in der EMF-Datenbank [15] als Ausschöpfungsgrad des Grenzwerts (in Prozent). Die in der

EMF-Datenbank veröffentlichten Ausschöpfungsgrade beziehen sich allerdings nicht auf die Feldstärkegrenzwerte der 26. BImSchV sondern beschreiben eine leistungsbasierte Grenzwertausschöpfung.³ Dies ist technisch korrekt aber für den normalen Nutzer nicht selbsterklärend, da es wesentlich geringere Ausschöpfungsgrade suggeriert. Auf Antrag führt die BNetzA auch zusätzliche Messungen durch.

Zusätzliche (nicht öffentliche) Daten für diese Standorte können die **Kommunen** über einen separaten Zugang zur EMF-Datenbank erhalten. Entsprechend dem **§7a der 26. BImSchV** [9] werden die Kommunen bei der Auswahl der Standorte **beteiligt**.

Die Hersteller von **Mobiltelefonen** ermitteln die **SAR-Werte** ihrer Produkte entsprechend der Europäischen Messnormen EN 62209-1 / EN 62209-2 eigenständig und müssen die Einhaltung der Grenzwerte gemäß dem Funkanlagengesetz (FuAG) sicherstellen [11]. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) veröffentlicht **Empfehlungen zum Telefonieren mit dem Mobiltelefon** und Listen mit den SAR-Werten aktueller Modelle und Auslaufmodelle [13].

3.5 Sind niedrigere Grenzwerte (für Mobilfunkstandorte) notwendig?

Grenzwerte für hochfrequente elektromagnetische Felder, d.h. auch für den Mobilfunk (siehe Kapitel 2), werden nach werden nach **wissenschaftlichen Kriterien** (siehe Kapitel 2.4) festgelegt. Es werden ständig neue Studien, speziell auch zu nicht-thermischen Wirkungen (siehe Kapitel 4 und 4.1), durchgeführt und bewertet. Dies schließt auch epidemiologische Studien ein. Eine **Notwendigkeit zur Anpassung** der angewendeten wissenschaftlichen Kriterien **besteht nicht**.

Es wird gelegentlich auf die **niedrigeren Grenzwerte** anderer Länder, namentlich der **Schweiz** verwiesen. Die in der Schweiz **nur für Orte mit empfindlicher Nutzung** (OmeN) festgelegten Grenzwerte entsprechen etwa 10 % der von der ICNIRP (siehe Kapitel 3.2) empfohlenen Grenzwerte. Die Festlegung bezieht sich auf die jeweilige Sendefunkanlage, nicht auf den Standort wie in Deutschland. So überlagern sich die Felder von unterschiedlichen Netzbetreibern und erhöhen auch die in der Schweiz für OMEN-Gebiete festgelegten Grenzwerte. Diese Festlegung basiert aber nicht auf wissenschaftlichen Erkenntnissen sondern folgt dem **Gedanken der Vorsorge**. Die Schweizer **Festlegung** auf 10 % der international empfohlenen Grenzwerte ist **mehr oder weniger willkürlich** und kann als **Kompromiss** zwischen einer Minimierung der EMF-Exposition einerseits und deren (technischer und wirtschaftlicher) Notwendigkeit zur Bereitstellung einer digitalen Infrastruktur andererseits verstanden werden. Dieser **Kompromiss stößt aber gegenwärtig an seine Grenzen** [21], da der angestrebte 5G-Mobilfunkausbau (wegen der mit der 5G-Technik verbundenen Erhöhung der Sicherheitsabstände) wesentlich teurer und langwieriger wäre (bis zu 20-30 Jahre) und den Mobilfunkkritikern die Grenzwerte trotzdem nicht ausreichend (niedrig) sind.

Aktuelle Untersuchungen zum Einsatz adaptiver Antennen in 5G, zeigen eine deutlich reduzierte Strahlenexposition und führt zur Einführung eines Korrekturfaktors, der höhere Sendeleistungen zulässt [38]

Bei der Diskussion um niedrigere EMF-Grenzwerte geht es fast ausschließlich um die Grenzwerte der Mobilfunkstandorte (ortsfeste Sender). Dabei wird ignoriert, dass die als **möglicherweise krebserregend eingestuft** **Risiken** (siehe Hinweis zur Einstufung der IARC in Kapitel 4.2) mit der **Nutzung von Mobilfunktelefonen** (ortsveränderlicher Sender) **verbunden** sind. Darüber hinaus zeigen die Berliner EMF-Messungen (siehe Kapitel 6) eine geringe Grenzwertausschöpfung. Zum Thema des 5G-Mobilfunks wird separat in „Kapitel 5 - Stellt 5G ein Risiko dar?“ eingegangen.

Bei dem **Mobilfunk** geht es um die Bereitstellung einer **leistungsfähigen digitalen Infrastruktur** für jeden **Einzelnen** für die private Nutzung und für Handel, Handwerk, **Rettings- und Einsatzkräfte** sowie die in Berlin oft klein- und mittelständigen **Unternehmen**. **Niedrigere** EMF-Grenzwerte führen zu **höheren Kosten** und deutlich **längeren Realisierungszeiträumen**, welches die Berechnungen der Schweizer AG Mobilfunk und Strahlung [21] deutlich zeigen. Die Nutzer müssen die höheren Kosten über höhere Tarife finanzieren, welches geringe Einkommen proportional stärker belastet. Eine weitere Konsequenz kann sein, dass Gebiete keine Mobilfunkversorgung erhalten.

³ Für den Zusammenhang von feldstärkebasierten und leistungsbasierten Grenzwertausschöpfungsgrad siehe Kapitel 2.3

3.6 Sind abweichende Regelungen für spezielle Orte sinnvoll?

Wie im Kapitel 3.5 erwähnt gelten in der Schweiz für Orte mit empfindlicher Nutzung (OmeN) andere EMF-Grenzwerte als an allen übrigen Orten der Schweiz. Zu diesen Orten zählen Wohnungen, Schulräume und Spielplätze aber z.B. nicht Balkone oder Sporthallen bzw. Sportanlagen. In Deutschland gibt es eine solche Unterscheidung durch die Verordnungen/Gesetzes des Bunds nicht.

Abgesehen davon, dass die **abgesenkten Grenzwerte keinen wissenschaftlichen Erkenntnissen geschuldet** sind, können diese **ggf. kontraproduktiv** wirken. Dies gilt speziell für Vorgaben, die einen **Mindestabstand** zwischen OmeN (, z.B. Schulen) und einem Mobilfunkstandort verlangen.

Eine Regelung zum Mindestabstand zu einem Mobilfunkstandort ignoriert, dass die **Mobiltelefone**, welche als mögliches Risiko benannt sind (siehe Kapitel 1 und 4) in diesem Fall mit **umso höherer Leistung senden müssen**. In einem in Berlin gemessenen Beispiel hat das Mobiltelefon mit 700-facher Sendeleistung bei der Nutzung eines entfernten Standortes im Vergleich zu einem nahegelegenen Standort arbeiten müssen (siehe Abbildung 2).

Die Betrachtung der **EMF-Exposition** durch Mobilfunkstandorte im **Vergleich** zu Mobiltelefonen erfolgt in Kapitel 2.3. Dabei zeigt sich, dass die **Grenzwertausschöpfung durch Mobiltelefone drastisch höher** ist als die der Mobilfunkstandorte (siehe Abbildung 3) und die **24-Stunden-Dosis durch Mobiltelefone ebenfalls wesentlich** (Ganzkörper-Dosis) bzw. **drastisch** (Gehirn-Dosis) **höher** ist (siehe Abbildung 4).

Darüber hinaus zeigt sich, dass eine **einfache Abstandsregel** (siehe Kapitel 2.4 und 6) **keine belastbare Aussage** über die **Höhe der EMF-Exposition** durch den Mobilfunkstandort gibt.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass **abweichende Regelungen** für spezielle Orte bzgl. Mobilfunkstandorte aus folgenden Gründen **nicht notwendig bzw. sinnvoll** sind:

1. **Mobiltelefone** (ortsveränderliche Sender) sind der Grund der **IARC-Einstufung** als „möglicherweise karzinogen“ (zusammen mit sauer eingelegten Gemüse, siehe Kapitel 4.2) und erzeugen im Vergleich zu Mobilfunkstandorten eine **drastisch höhere Grenzwertausschöpfung** (siehe Kapitel 4)
2. Eine **Mindestabstandsregelung** besagt nichts über die tatsächliche EMF-Exposition durch den Mobilfunkstandort (siehe Kapitel 2.4) und **führt ggf. zu höheren Sendeleistung von Mobiltelefonen** (siehe Punkt 1. Und Kapitel 2.3), welches kontraproduktiv ist
3. Der **Grenzwertausschöpfungsgrad** von Mobilfunkstandorten in Berlin ist **generell niedrig** (siehe Kapitel 5)
4. Niedrigere EMF-Grenzwerte für Mobilfunkstandorte sind **aus wissenschaftlicher Sicht nicht angezeigt** (siehe Kapitel 3.5) sondern **erhöhen die Kosten** und **verlängern den Realisierungszeitraum** für die digitale Infrastruktur deutlich

Die Aussagen oben gelten für Mobilfunkstandorte generell. In **Kapitel 5** wird speziell auf das Thema **5G-Mobilfunk** eingegangen.

4 Stand der Forschung zu nicht-thermischen Wirkungen

Die Anzahl der (weltweiten) Studien zu elektromagnetischen Feldern ist über die letzten Jahrzehnte stark angewachsen und wächst weiter. Das **EMF-Portal der RWTH Aachen** (Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen) listet gegenwärtig 35.480 Studien und 6954 Zusammenfassungen zu der Wirkung elektromagnetischer Felder [19]. Der Bereich **Mobilfunk ist mit 5.316 Studien** vertreten (Stand 11.04.2022). Die Studien in diesem Bereich werden u.a. von verschiedenen (internationalen) Fachgremien regelmäßig bewertet, wie dem „Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks“ (SCHEER) [20] (siehe Abbildung 7).

Eine aktuelle Übersicht über die Bewertungen der verschiedenen Studien zu nicht-thermischen Wirkungen bietet die im Dezember 2021 verabschiedete Stellungnahme der **Strahlenschutzkommission (SSK)** [siehe Kapitel 5.2 in [42]]. Die Stellungnahme befasst sich mit den biologischen und gesundheitlichen Aspekten von Hochfrequenzfeldern im bisher bereits intensiv für die Mobilkommunikation genutzten Frequenzbereich bis etwa 7 Gigahertz (Frequency Range 1, FR1), der auch in den aktuellen 5G-Netzen genutzt wird.

Für die Bewertung gesundheitsbezogener Auswirkungen eines chemischen Stoffes oder einer physikalischen Einwirkung werden im allgemeinen Studienergebnisse **unterschiedlicher Studienarten** (z.B. Humanstudien, Tierexperimentelle Studien...) herangezogen. Die Ergebnisse aus einem Studientyp allein, ohne untermauernde Ergebnisse aus den anderen Bereichen, werden in der Bewertung geringer eingeschätzt [42]. Konzentriert man sich beispielsweise ausschließlich auf Tierexperimentelle Studien, ist dies kritisch, da die Übertragung der Ergebnisse von einer Spezies auf eine andere, insbesondere auf den Menschen, generell mit Unsicherheiten behaftet ist. Es ist jedoch wichtig darauf hinzuweisen, dass **epidemiologisch** ermittelte Befunde eine stärkere Rolle bei der Bewertung gesundheitlicher Risiken spielen [42].

Die Zusammenfassung der Evidenz für biologische und gesundheitliche Wirkungen hochfrequenter, elektromagnetischer Felder der SSK (siehe Tabelle 2) zeigt, dass **unzureichende Evidenz** für **alle epidemiologisch** untersuchten Gesundheitseffekte sowie eine Reihe weiterer Effekte in Human-, In-vivo- oder In-vitro-Studien besteht.

Tabelle 2 Zusammenfassende Bewertung für alle evaluierten Endpunkte (SSK) [42]

| | Evidenz / Bewertung | | | |
|--|---------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| | Epidemiologie | Humanstudien | Tierexperimentelle Studien | Zellexperimentelle Studien |
| Krebs | 0 | | +/0 | +/0 |
| Verhalten | 0 | | +/0 | |
| Kognitive Funktionen | +/0 | +/0 | +/0 | |
| Zerebraler Blutfluss und Hirnstoffwechsel | | 0 | - | |
| Schlaf-EEG - Spektralwerte | | + | | |
| Schlaf-EEG - Makrostruktur | | 0 | | |
| Ruhe-EEG im Wachzustand | | + | | |
| Ereigniskorrelierte und evozierte Potenziale | | +/0 | +/0 | |
| Autonomes Nervensystem und kardiovaskuläres System | 0 | - | n.v. | |
| Neurodegenerative Erkrankungen | 0 | | - | 0 |
| Symptome und Wohlbefinden | 0 | - | | |
| Immunsystem und Hämatologie | 0 | 0 | n.v. | n.v. |
| Fertilität und Fortpflanzung | 0 | 0 | +/0 | 0 |
| Embryonalentwicklung | 0 | | 0 | n.v. |
| Andere Organsysteme | 0 | 0 | 0 | n.v. |
| Gentoxikologie | 0 | 0 | +/0 | +/0 |
| Oxidativer Stress | | 0 | + | + |
| Mechanistische Untersuchungen | | | 0 | 0 |

Legende: Die EFHRAN-Klassifizierung umfasst vier Stufen der Evidenz

| | |
|-------------|---|
| ++ | „Ausreichende Evidenz“ /Zusammenhang zwischen Exposition und Effekt in mehreren Studien von unabhängigen Forschenden oder mit verschiedenen Untersuchungsprotokollen bestätigt wurde. Die Expositions-Wirkungs-Beziehung ist übereinstimmend und andere Einflussfaktoren (Confounder) können mit zufriedenstellender Sicherheit ausgeschlossen werden. |
| + | „Begrenzte Evidenz“ /Der beobachtete 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. |
| 0 | „Unzureichende Evidenz“ /Die Studien lassen wegen ihrer Qualität, Übereinstimmung oder statistischen Aussagekraft keine eindeutigen Schlussfolgerungen zu. |
| - | „Evidenz für Abwesenheit eines Effekts“ /wenn in mehreren Studien von unabhängigen Forschenden mit unterschiedlichen Untersuchungsprotokollen an mindestens zwei Spezies oder zwei Zelltypen und bezogen auf einen ausreichenden Bereich von Feldintensitäten keine Effekte beobachtet wurden. |
| n.v. | Studien liegen nicht vor |
| | Studien können aus ethischen und/oder methodischen Gründen nicht durchgeführt werden oder sind nicht sinnvoll |

Mit Blick auf die Legende zeigt sich, dass für **kein Krankheitsbild** (1. Spalte in Tabelle 2) eine ausreichende Evidenz (rote Markierung) für das Bestehen eines Zusammenhangs zwischen Exposition und Effekt von unabhängigen Forschenden oder mit verschiedenen Untersuchungsprotokollen bestätigt werden konnte.

Für **Krebs** (erste Zeile) besteht gegenwärtig **„unzureichende epidemiologische Evidenz“** für einen Zusammenhang mit der Mobiltelefonnutzung oder HF-EMF-Expositionen durch Sendeanlagen. Die große Mehrzahl der epidemiologischen Studien findet keinen Zusammenhang zwischen diesen HF-EMF-Expositionen und verschiedenen Arten von Tumoren im Kopfbereich oder dem Auftreten von Leukämien.

Für **kognitive Funktionen** liegt die Evidenz zwischen **„begrenzt“** und **„unzureichend“**. Ein Effekt wurde in ca. einem Drittel aller experimentellen Humanstudien beobachtet, wobei diese Effekte isoliert unterschiedliche kognitive Domänen betreffen.

„Evidenz für Abwesenheit eines akuten Effekts“ (blau) liegt vor für das autonome Nerven- und das kardiovaskuläre System (Humanstudien), für unspezifische Symptome wie Kopfschmerzen, Schlafstörungen etc. (Humanstudien), für neurodegenerative Erkrankungen (in vivo) sowie zerebraler Blutfluss und Hirnstoffwechsel (in vivo) [42].

Die epidemiologische Evidenz für einen Effekt auf die **Fertilität** wurde als „unzureichend“ (gelbe Markierung) eingestuft. Ebenfalls „unzureichend“ ist die Evidenz aus Humanstudien und Zellexperimentellen Studien, während die Evidenz von Tierstudien **„unzureichend“ bis „begrenzt“** (+/0, orange Markierung) ist.

Insgesamt besteht eine grundsätzliche **Übereinstimmung** mit den Schlussfolgerungen **anderer internationaler Expertengremien**, die in den letzten etwa zehn Jahren vergleichbare Bewertungen durchgeführt haben.

Eine Übersicht über die Bewertungen der verschiedenen Studien zu nicht-thermischen Wirkungen gibt auch der am 18.11.2019 veröffentlichte Bericht der Arbeitsgruppe Mobilfunk und Strahlung [21], welcher im Auftrag des **Schweizer Bundesministeriums für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)** erstellt wurde. Die gesundheitliche Wirkung von **Mobilfunkanlagen** wird übereinstimmend als **nicht oder unzureichend evident** eingestuft. **Ausreichend bis begrenzt** nachgewiesen sind **Wirkungen auf Hirnströme** bzw. Gehirnaktivität (EEG) bei einer Exposition durch ein **Mobiltelefon**.

Auch der **österreichische Wissenschaftliche Beirat Funk (WBF)**⁴ hat im Expertenforum 2021 „Update zum Stand der Wissenschaft“ 167 aktuelle Studien analysiert und bewertet und kommt zu dem Schluss, dass auch weiterhin eine vom Mobilfunk ausgehende Gefahr für die Gesundheit der Menschen ausgeschlossen werden kann [40].

⁴ Der Wissenschaftliche Beirat Funk ist ein unabhängiges wissenschaftliches Gremium aus Expertinnen und Experten, die das Ministerium zu gesundheitlichen Aspekten im Bereich Funk beraten [40].

4.1 Diskussion ausgewählter Studien zu nicht-thermischen Wirkungen

Der **übergroße Anteil der Studien** der letzten Jahrzehnte hat **keinen Nachweis** eines Risikos **und** auch **keinen Hinweis** auf mögliche Risiken durch Mobilfunk(-strahlung) erbracht. Die Einzelstudien werden, wie in Kapitel 4 beschrieben, regelmäßig von nationalen und internationalen Expertengruppen zusammenfassend bewertet. Umso mehr finden **einzelne Studien**, welche die Evidenz einer nicht-thermischen Wirkung anzeigen, Beachtung. Nachfolgend werden die relevanten Punkte zu zwei häufig diskutierten Studien aufgeführt. Beide Studien wurden von der **ICNIRP** bewertet [24]. Die dritte Studie (**Mobi-Kids Studie**) wird an dieser Stelle erwähnt, da diese speziell die Auswirkungen bei Kindern und Jugendlichen untersucht.

NTP-Studie - US National Toxicology Program (NTP) 2018, [26], [27]

Die Studie zieht den Schluss, dass eine klare Evidenz für das Auftreten von Herztumoren bei Ratten und Mäusen besteht. Bei dem Herztumor handelt es sich um ein Schwannom, d.h. ein Tumor der von Schwann-Zellen ausgeht, welche die Nerven umhüllen. Diese Evidenz trat in der Studie bei einer Langzeitexposition des **gesamten Körpers** über einen Zeitraum von **2 Jahren** mit einer **Leistung von 6 W/kg** auf. Dies ist das 3-fache des für Mobiltelefone zulässigen Teilkörper-SAR-Wertes und das ca. **75-fache des Grenzwertes** für Ganzkörperexposition. Betroffen waren **ausschließlich männliche Tiere** obwohl auch weibliche Tiere exponiert wurden.

Auffällig ist, dass die **Sterblichkeit der exponierten Tiere** (am Ende des 2-jährigen Versuchszeitraums) **wesentlich geringer** war als die der Tiere der Kontrollgruppe, welche keiner Mobilfunkstrahlung ausgesetzt war.

Der **zuständige Wissenschaftler der NTP-Studie**, Ph.D. Michael Wyde (Mitarbeiter in der Systems Toxicology Group des NIEHS) **sieht** seinerseits die **Übertragbarkeit** der Studienergebnisse **auf die Mobiltelefonnutzung nicht gegeben** [28] „Given such complexity, the NTP findings should not be directly extrapolated to human cell phone use.“

Das **BfS** stellt fest [22], dass die Studie „**keine aussagekräftigen Belege**“ liefert, dass die „hochfrequenten elektromagnetischen Felder von **Handys das Krebsrisiko beim Menschen erhöhen**“. Dies wird u.a. auch darauf zurückgeführt, dass Menschen nicht am ganzen Körper solch hoher Feldintensität ausgesetzt sind und schließt nicht aus, dass thermischer Stress der Tiere zu dem Ergebnis geführt hat.

Generell: Für **Aussagen zu Mobilfunkstandorten** (Basisstationen) ist die **Studie ungeeignet**.

Ramazzini-Studie - Ramazzini Institute Bologna, 2018, [25]

In der Ramazzini-Studie (Falconi, et al.) wurden Ratten ab dem 12. Tag der Trächtigkeit der Mutter dem Mobilfunk-EMF für 19 Stunden pro Tag für 7 Tage die Woche ausgesetzt. Die insgesamt 2448 Ratten wurden in 4 Gruppen eingeteilt, wobei eine die Kontrollgruppe bildete (0 V/m). Die anderen Gruppen wurden jeweils einer Mobilfunk-EMF von 5 V/m (0,001 W/kg), 25 V/m (0,03 W/kg) und 50 V/m (0,1 W/kg) exponiert. Die Exposition wurde während der gesamten Lebensdauer der Tiere (max. 152 Wochen) fortgesetzt. Es gab keine Unterschiede zwischen exponierten und nicht-exponierten Tieren beiderlei Geschlechts bzgl. Gewichtsentwicklung, Wasser- und Nahrungsaufnahme sowie Überlebensraten.

Ein **statistisch signifikantes Ergebnis** (Herztumor, d.h. Schwannom) ergab sich bei männlichen Tieren der Gruppe mit der **höchsten Exposition (50 V/m bzw. 0,1 W/kg)**. Die statistische Signifikanz ergab sich auch deswegen, weil in der Kontrollgruppe kein Schwannom-Fall auftrat. In historischen Kontrollen (also Kontrollgruppen anderen Studien) war die Rate 0,6 %.

Die **Signifikanz** zeigte sich **nur** bei der **höchsten Exposition (50 V/m bzw. 0,1 W/kg)**, wobei dies **nur** für die exponierten **männlichen Tiere** galt (betroffen 1,4 % in exponierter Gruppe und 0 % in Kontrollgruppe).

Eine Bestätigung des Ergebnisses der NTP-Studie durch die Ramazzini-Studie ist eher nicht gegeben, da im Fall der NTP-Studie eine statistisch relevante Signifikanz gerade **nur bei der höchsten Exposition von 6W/kg** gegeben war und **gerade nicht** bei geringeren Werten, **wie den 0,1W/kg in der Ramazzini-Studie**. Darüber hinaus sind die relevanten Ergebnisse geschlechtsspezifisch, welches eine Interpretation erschwert. Die Abweichung der

Schwannom-Fälle in der Kontrollgruppe nach unten (im Vergleich zu historischen Kontrollen) und die Abweichung der Schwannom-Fälle nach oben in der exponierten Gruppe können auch zu einem Zufallsbefund geführt haben.

Das ICNIRP sieht substantielle Schwachstellen bei beiden Studien, welche keine Schlussfolgerungen bzgl. Mobilfunk und Krebsentstehung zulassen [24]. Ebenso weist der Studienbeteiligte Michael Wyde darauf hin, dass er eine Übertragbarkeit der Ergebnisse der NTP-Studie auf die Mobilfunknutzung als nicht gegeben sieht [28].

Auch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hat die Studie analysiert und kommt zu der Schlussfolgerung, dass die Studienergebnisse „*keine überzeugende Evidenz für eine karzinogene Wirkung einer Ganzkörperexposition durch Mobilfunkstrahlung im Bereich und unterhalb der bestehenden Grenzwerte*“ liefern [44].

Fazit: Neben den **vielen Studien**, welche **auf keine Risiken** bei der Mobilfunknutzung hinweisen, zeigen die beiden oben aufgeführten Studien, dass die **Aussagen anderer (Tier-)Studien nicht eindeutig** sind und sich vor allem **nicht** auf den Menschen **übertragen lassen**. Weitere, durchdacht konzipierte Studien können aber helfen Unsicherheiten auszuräumen.

Mobi-Kids Studie - Dez. 2021, Environmental International, Castaño-Vinyals et al. 2021

Die MOBI-KIDS Studie wurde im Jahr 2009 begonnen den Zusammenhang zwischen Hirntumoren bei jungen Menschen und der Nutzung von Telekommunikationstechnologien, einschließlich Mobiltelefonen, zu untersuchen. Etwa **200 junge Menschen**, zwischen 10 und 24 Jahren mit Hirntumoren wurden gemeinsam mit einer gleichgroßen Gruppe ohne Hirntumore über Jahre beobachtet und untersucht. **14 Länder** haben sich an dieser Studie beteiligt.

Fazit: Die Studie ergab keine wissenschaftlichen Belege für einen ursächlichen Zusammenhang zwischen Hirntumoren bei Kinder und Jugendlichen und der Nutzung von Mobiltelefonen. Sie verringert somit die Unsicherheit bezüglich der Gesundheit von Kindern durch die Nutzung von drahtlosen Telefonen.[35]

4.2 Was bedeutet die 2B-Einstufung von „Handystrahlung“ durch die IARC?

Die Internationale Agentur für Krebsforschung (**IARC**) klassifiziert Risiken bzgl. ihrer karzinogenen (krebsauslösenden) Wirkung nach folgendem Schema [17]:

- Gruppe 1: karzinogen für Menschen
- Gruppe 2A: wahrscheinlich karzinogen
- Gruppe 2B:** möglicherweise karzinogen
- Gruppe 3: nicht eingestuft
- Gruppe 4: wahrscheinlich nicht karzinogen (bisher nur Caprolactam)

Die IARC hat hochfrequente elektromagnetische Felder **im Mai 2011 in die Gruppe 2B** („möglicherweise karzinogen“) eingestuft. Die Einstufung in die Gruppe 2B beruht auf Studien mit **Expositionsbedingungen**, wie sie beim „Gebrauch von **Mobil- oder Schnurlostelefonen entstehen**“ [18]. In der **Gruppe 2B** („möglicherweise karzinogen“) sind gegenwärtig über 300 Substanzen und Umwelteinflüsse aufgeführt, u.a. **sauer eingelegtes Gemüse** (Mixed Pickles), Kokosnussöl und Aloe Vera [4]. Die IARC identifiziert und charakterisiert das krebserregende Potenzial von Einwirkungen durch einen Stoff oder eine physikalische Größe, quantifiziert aber nicht das Risiko für das Auftreten einer Erkrankung.

Die Hinweise auf krebserregende Wirkung konnten in vom **Bundesamt für Strahlenschutz** (BfS) initiierten Studien **nicht bestätigt** werden. Das Bundesamt stellt fest, dass **bei Einhaltung** der Grenzwerte, **keine gesundheitlichen**

Beeinträchtigungen durch hochfrequente elektromagnetische Felder zu erwarten sind [36]. Zu dieser Schlussfolgerung kommt auch die Strahlenschutzkommission [42].

Im April 2019 hat die "IARC Monographs Advisory Group" eine Empfehlung für weitere IARC Bewertungen veröffentlicht. Demnach sollen hochfrequente elektromagnetische Felder aufgrund neuer vorliegender Ergebnisse in den Jahren **2020 - 2024 neu bewertet** werden. Die Neubewertung ist mit hoher Priorität eingestuft.

Das BfS hat, speziell auch für die Nutzung von Mobiltelefonen, Vorsorgeempfehlungen herausgegeben [13]. Es wird u.a. die Verwendung strahlungsarmer Mobiltelefone (niedriger SAR-Wert) empfohlen.

4.3 Elektrosensibilität

1-2% der Bevölkerung bezeichnen sich als elektrosensibel und führen Beschwerden wie Schlafstörungen oder Konzentrationsschwäche auf das Vorhandensein elektromagnetischer Felder zurück. Dieser vermutete Zusammenhang konnte **bisher wissenschaftlich nicht nachgewiesen** werden [22]. Demgegenüber könne das Wissen um das Vorhandensein von Feldern in Kombination mit Besorgnis über mögliche gesundheitliche Auswirkungen dieser Felder Beschwerden verursachen. Dieses Phänomen ist als **Nocebo-Effekt** bekannt.

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) zieht folgendes Resümee: „Als Fazit der zahlreichen bisher durchgeführten Studien ergibt sich, dass ein ursächlicher Zusammenhang zwischen elektromagnetischen Feldern und den Beschwerden elektrosensibler Personen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann. Diese Einschätzung wird auch von der WHO geteilt.“ [22]

4.4 Besteht weiterer Forschungsbedarf?

Auf Basis der umfangreichen Datenlage sieht das **Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)** keine wissenschaftlich gesicherten Belege für negative Gesundheitseffekte durch 5G unterhalb der bestehenden Grenzwerte. Den stets verbleibenden Unsicherheiten in der Risikobewertung wird über Forschung Rechnung getragen. Das BfS wird auch weiterhin die wissenschaftliche und technische Entwicklung kontinuierlich verfolgen. [29], Zusätzlich werden vom BfS auch Vorsorgemaßnahmen [13] für die Nutzung von Mobiltelefonen empfohlen. Die EMF-Exposition durch Mobilfunkstandorte und Mobilfunktelefone wird im Kapitel 2.3 anschaulich dargestellt und verglichen.

Eine vom **BfS** benannte **offene Frage** bezieht sich auf den prognostizierten verstärkten Einsatz von Sendeanlagen kleiner Leistung, s.g. **Kleinzellen** (engl. Small Cells). Mobilfunk-Kleinzellen kommen bereits heute in geringer Anzahl beim LTE-Mobilfunkausbau zum Einsatz. Für den 5G-Mobilfunkausbau wird mit einem weiteren Einsatz gerechnet, um ausreichend Übertragungskapazität zu gewährleisten. Ein **aktueller Messbericht für LTE-Kleinzellen in Berlin** [34] zeigt allerdings eine **geringe EMF-Grenzwertausschöpfung** und zieht ein **positives Fazit**. Eine Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6.2.

Im Zusammenhang mit der Nutzung eines neuen Frequenzbereichs, namentlich dem **Bereich von 26 GHz** (siehe Kapitel 2 und speziell Abbildung 1), hat das BfS **Forschungsvorhaben** zu Erfassung der Exposition und Erforschung möglicher Wirkung [29] vergeben. Die Wellenlänge dieser Frequenz ist vergleichsweise klein, so dass diese auch als Millimeterwellen bezeichnet werden. Das Thema **Millimeterwellen** wird im Kapitel 5.1 Frequenzbereiche von 5G behandelt.

5 Stellt 5G ein Risiko dar?

Nachdem es in der Vergangenheit zum 2G und 3G-Mobilfunkausbau starke Diskussionen und Bedenken gab war das für den LTE-Mobilfunkausbau, der sich in den letzten Jahren vollzog, nicht der Fall. Vielmehr gab es und gibt es die Diskussion über unzureichende Mobilfunkversorgung und „Mobilfunklöcher“. Die **mediale Präsenz des Themas 5G-Mobilfunk** hat die bereits **bekanntesten Kritiker** aber auch neue Kritiker **motiviert** das möglicherweise mit dem Mobilfunk verbundene Risiko zu thematisieren. Nachfolgend sollen die für die EMF-Exposition relevanten Aspekte des 5G-Mobilfunks differenziert dargestellt werden.

5.1 Frequenzbereiche von 5G

5.1.1 Sub-6GHz-Bereich (flächendeckende Abdeckung)

Die Bundesnetzagentur (BNetzA) hat 2019 die für den **5G-Mobilfunk** europaweit vorgesehenen Frequenzbänder im **Sub-6GHz-Bereich** (siehe Kapitel 2) nach einer Frequenzauktion in Deutschland zugeteilt. Versteigert wurden Frequenzpakete in den Bereichen **2 GHz** und **3,4 bis 3,7 GHz**. Die zugeteilten Frequenzbänder liegen in einem **Bereich**, welcher **bereits** für **Mobilfunk und WLAN** genutzt wird.

Zusätzlich zu den oben genannten Frequenzbändern wurden im Sommer 2020 auch Frequenzbänder **für 5G-Campusnetze** im Frequenzbereich **3 700 MHz bis 3 800 MHz** von der Bundesnetzagentur vergeben. 5G-Campusnetze sind **exklusive 5G-Mobilfunknetze** auf eigenen Frequenzen für ein **eingegrenztes Gebiet**. Diese können auf die individuellen Bedürfnisse ihrer Nutzer (z.B. Unternehmen) angepasst werden, was ein entscheidender Vorteil gegenüber der Nutzung öffentlicher Mobilfunkinfrastrukturen ist.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass eine **flächendeckende Abdeckung** des Landes mit **Mobilfunkempfang nur im Sub-6-GHz-Bereich** denkbar ist, da die potenzielle Reichweite einer Basisstation mit zunehmender Sendefrequenz deutlich abnimmt [42].

5.1.2 26-GHz-Bereich (lokale Nutzung)

Für 5G können prinzipiell auch andere als die Sub-6GHz-Frequenzen genutzt werden. Der **26-GHz-Bereich** (siehe Kapitel 2) ist dafür vorgesehen und wird z.B. in den USA auch bereits genutzt. Dieser Frequenzbereich gehört zum **Millimeterwellen-Bereich**, da die Wellenlängen im Bereich von Millimetern liegen. So z.B. hat eine Frequenz von 26 GHz eine Wellenlänge von 11,53 mm. Durch die großen Bandbreiten im 26-GHz-Bereich ist es möglich, **hohe Übertragungsraten** zu erzielen. Dazu muss idealerweise Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger bestehen, da Objekte in der Sichtachse, wie sogar Blätter, ein Problem darstellen.

Den Frequenzbereich 26,5 - 27,5 GHz stellt die Bundesnetzagentur unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Geschäftsmodelle für **lokale Anwendungen** bereit. Frequenzen im Bereich 26 GHz werden seit Anfang 2021 vergeben. Laut dem „Tätigkeitsbericht Telekommunikation 2020/2021“ (Stand Dezember 2021) [43] der BNetzA wurden **bisher sechs Frequenzuteilungen** erteilt. Allerdings stimmte nur eine Zuteilungsinhaberin (Technische Universität Dortmund) der Veröffentlichung ihrer Inhaberschaft auf den Internetseiten der Bundesnetzagentur zu.

Aufgrund der geringen Eindringtiefe von elektromagnetischen hochfrequenten Feldern existiert **keine direkte Wirkung auf innere Organe**. Da hierzu aber noch wenige Forschungsergebnisse vorliegen hat das **BfS** für den **26 GHz-Bereich** (Millimeterwellen-Bereich) weiteren **Forschungsbedarf angemeldet** [29]). Dabei sollen Auswirkungen auf Haut oder Augen adressiert werden. Dazu muss festgestellt werden, dass der 26 GHz-Frequenzbereich in der Vergangenheit für die Überbrückung von kurzen Strecken mit anderen Funkverfahren in Verwendung war.

5.2 Stellen 5G-Mobilfunkstandorte ein Risiko dar?

5G-Mobilfunkstandorte sind unter den gegenwärtigen Rahmenbedingungen **wie LTE-Mobilfunkstandorte** zu beurteilen. Dies bedeutet, dass bei Einhaltung der Grenzwerte **keine gesundheitlichen Auswirkungen zu erwarten** sind. Auch für 5G-Mobilfunkstandorte gelten die Grenzwerte der **26. BImSchV** sowie die in diesem Dokument vorgestellten Überlegungen (siehe Kapitel 2.3 oder Kapitel 3.6). Dabei ist zu berücksichtigen, dass potentielle Risiken mit Mobiltelefonen verbunden sind und nicht mit Mobilfunkstandorten.

5.2.1 5G DSS-Anlagen

5G DSS (Dynamic Spectrum Sharing) erlaubt den **parallelen Betrieb von LTE und 5G** im gleichen Frequenzbereich. Je nach Nutzeranforderung können entweder LTE-Signale, 5G-Signale oder LTE- und 5G-Signale gleichzeitig abgesendet werden. Dadurch wird ein schnellerer Ausbau von 5G gewährleistet. 5G DSS nutzt also die gleichen Frequenzen und Sendeleistungen, wie sie bereits aus 4G bekannt sind. In diesem Sinne sind DSS-Standorte wie LTE-Standorte zu bewerten. Das zeigen auch die Ergebnisse der Berliner EMF-Messung (siehe Kapitel 6.3.1).

5.2.2 5G-massive-MIMO-Anlagen

Ebenso wie in LTE Advanced Pro oder WLAN 802.11ac (Wi-Fi 5) bzw. 802.11ax (Wi-Fi 6) werden auch in 5G Mehrelement-Antennensysteme, s.g. **MIMO** (Multiple Input, Multiple Output)-Antennen, verwendet. Mit diesen werden **mehrere Signale parallel übertragen** (höhere spektrale Effizienz), um die Datenrate zu erhöhen oder die Robustheit zu verbessern. Die MIMO-Technologie wird in **5G, analog zu Wi-Fi 5 und Wi-Fi 6**, auch zur Ausrichtung des Sendestrahls zum Mobiltelefon genutzt (**Beamforming**). Der **Unterschied von 5G zu LTE** ist, dass statt **2 oder 4** Antennenelementen nun bereits bis zu **256 Antennenelemente** eingesetzt werden können (**massiveMIMO**). Dies erlaubt eine wesentlich stärkere Fokussierung des Sendestrahls, wobei **Orte, welche nicht fokussiert** werden eine entsprechend **schwächere Feldstärke** verzeichnen.

Durch das Beamforming können **mehrere Mobiltelefone** vom selben Mobilfunkstandort mit **einem separaten Sendestrahl** (Beam) die **volle Kapazität** des Mobilfunkstandorts nutzen (spacial multiplexing). Viele 5G Stationen nutzen jedoch weiterhin MIMO anstatt massiveMIMO - abhängig von der Zielsetzung (Kapazität, Datenrate etc)

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) stellt fest, dass viele Erkenntnisse aus früheren Mobilfunkgenerationen übertragbar sind [29]. Wie oben dargestellt wird der gleiche Frequenzbereich wie für Mobilfunk und WLAN (Sub-6GHz-Bereich) und gleiche Technologien (Beamforming) verwendet.

6 Berliner EMF-Messberichte

In diesem Dokument wird die Grenzwertausschöpfung für Mobilfunkstandorte (ortsfeste Sender) generell auf Basis der Feldstärke angegeben, da die rechtlich verbindlichen Grenzwerte in der 26. BImSchV ebenso als Feldstärkewerte angegeben sind. Eine Ausnahme stellt der Vergleich Mobilfunkstandort vs. Mobiltelefon in Kapitel 2.3 dar. Dort ist auch der Unterschied erläutert.

6.1 LTE-Makrozellstandorte

Im Zeitraum November 2019 bis **März 2020** erfolgten im Auftrag der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe EMF-Messungen von Makrozellenstandorten [33]. Dies **sind Mobilfunkstandorte** (ortsfeste Sender, siehe 3.2), welche erhöht positioniert sind und einen größeren Versorgungsbereich abdecken. In Städten befinden sich die Makrozellstandorte **überwiegend auf Hausdächern** und im ländlichen Bereich werden dafür meist separate Maste errichtet. Dabei wurden Messungen für folgende Konstellationen durchgeführt und die Grenzwertausschöpfung bestimmt:

- Messung der Grenzwertausschöpfung im Umfeld von **zwei typischen Makrozellstandorten** (Typ „**leistungsstark**“, siehe Abbildung 9 und Typ „**typisch**“, siehe Abbildung 10), u.a. die Etage unter Antenne, der Balkon des gegenüberliegenden Hauses, etc.)
- Messung der Grenzwertausschöpfung entlang der Sichtachse eines Makrozellstandorts von 5m bis 560m Abstand (**Messung Feldstärkeverlauf** bzw. Linienmessung), deren Ergebnisse in Kapitel 2.4 beschrieben sind.

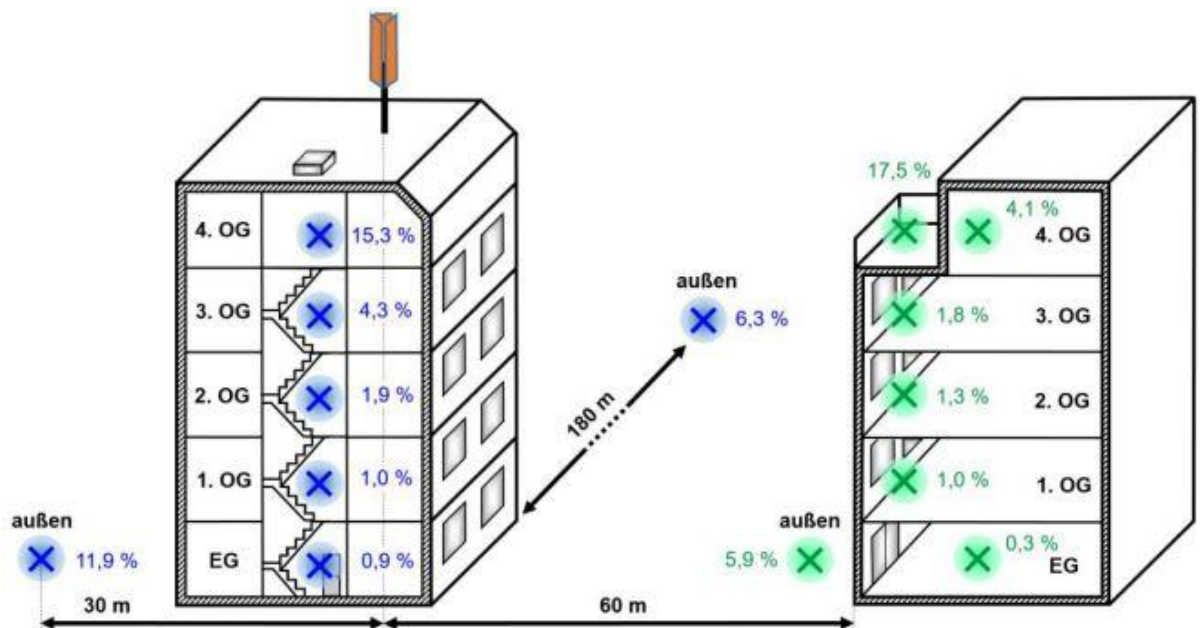


Abbildung 9 Feldstärkebasierte Grenzwertausschöpfung leistungsstarker Makrozellstandort [33]

Die feldstärkebasierte Bestimmung der Grenzwertausschöpfung des **leistungsstarken Makrozellstandortes** zeigt, dass auch in Positionen, welche **Höchstwerte** für die Feldstärke **erwarten lassen** (außen und/oder nahe der Antennen), die Grenzwertausschöpfung **maximal 17,5 % beträgt** und sonst weit darunter liegt. Die Werte nehmen im Gebäudeinneren noch wesentlich schneller als im Außenbereich (in Abhängigkeit zum Abstand der Antennen) ab.

Die Werte in den höchsten Stockwerken (Gebäude mit Makrozellstandort und gegenüberliegendes Gebäude, außen) in Abbildung 9 zeigen, dass dort die **höchsten Feldstärken** auftreten **aber auch**, dass diese **weit unter den Grenzwerten** liegen.

In Abbildung 9 ist auch die Abschirmwirkung der Gebäudehülle des gegenüberliegenden Gebäudes gut zu sehen. Diese verursacht den Rückgang von 17,5 % Grenzwertausschöpfung (außen) auf 4,1 % im 4.OG innen.

Die **Abstrahlcharakteristik** einer Basisstation (siehe Abbildung 5) wird anhand der Messpunkte (grün) am gegenüberliegenden Gebäude gut aufgezeigt. Der Messwert auf Straßenniveau (außen) ist wesentlich geringer als der Messwert (außen) auf ähnlicher Höhe wie die Basisstation. Auch hier liegen die Messwerte, selbst für die leistungsstarke Basisstation, weit unter dem zulässigen Grenzwert.

Die Verteilung der Exposition für einen **typischen Makrozellstandort** ist analog zu derjenigen eines leistungsstarken Makrozellstandorts, wobei die **Ausschöpfungsgrade aber noch wesentlich** (ca. Faktor 2 - 7,6) niedriger liegen (siehe Abbildung 10).

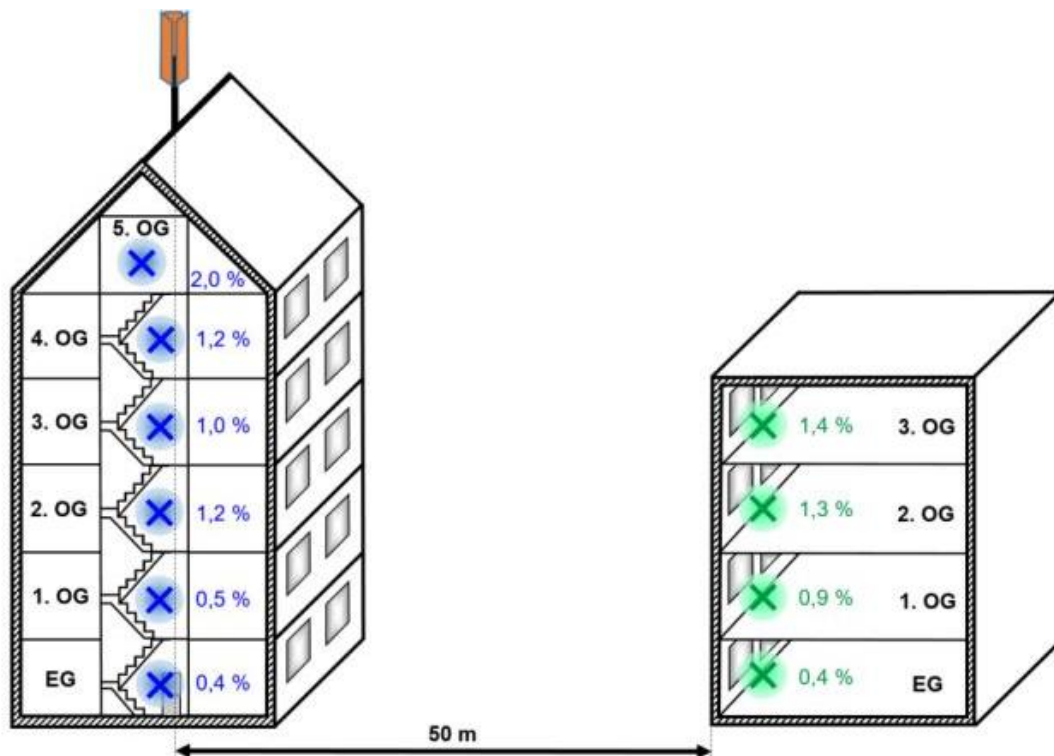


Abbildung 10 Feldstärkebasierte Grenzwertausschöpfung typischer Makrozellstandort [33]

Die EMF-Messungen 2019/2020 bestätigen die Messungen der Jahre 2004/2008. Interessant dabei ist, dass die EMF-Messwerte in Innenräumen mit Ausnahmen (in der Messung 2019/2020 [33] nur im Dachgeschoss unter dem leistungsstarken Makrozellstandort) unter den Schweizer Anlagegrenzwerten für Orte mit empfindlicher Nutzung (OMEN) liegen. Auf die Diskussion zur Höhe der Grenzwerte wird in Kapitel 3.5 eingegangen. Informationen zu Feldstärkeverlauf, Kleinzellen, 5G u.a. findet sich in den nachfolgenden Kapiteln.

Generell kann man feststellen, dass der **Grenzwert** der 26. BImSchV in allen Messpunkten nicht nur eingehalten sondern **weit unterschritten** wird. Dies stellt das Standortverfahren der Bundesnetzagentur (siehe Kapitel 3.4) sicher und dies zeigen die Berliner Messungen in 2004/2008 und 2019/2020 [33].

6.2 LTE-Kleinzellenstandorte

Kleinzellen ('Small Cells') zeichnen sich durch eine geringe Sendeleistung und Reichweite aus und dienen der Kapazitätserhöhung an Orten mit hoher Nutzerzahl, wie Veranstaltungsorten oder belebten Plätzen. Die Antennen der Kleinzellen sind oft an geeigneten Trägerstrukturen, wie Lichtmasten angebracht [30]. Kleinzellen werden bereits heute in LTE-Mobilfunknetzen eingesetzt.

Für den **5G-Mobilfunkausbau** aber auch für den **LTE-Mobilfunkausbau** wird ein **verstärkter Einsatz von Kleinzellen erwartet**, um den **schnell steigenden Bedarf** an Übertragungskapazität zu gewährleisten. Die Bundesnetzagentur ermittelt jährlich das mobile Datenvolumen und hat einen Anstieg von 1,38 Mrd. GB in 2017 auf 2,77 Mrd. GB in 2019 festgestellt. Dies entspricht ca. einer Verdopplung des Datenverkehrs in 2 Jahren basierend auf einem Anstieg von 44 % in 2018 und weiteren 39 % in 2019. Der Ericsson Mobility Report prognostiziert ein weiteres Wachstum in ähnlicher Größenordnung in den nächsten Jahren [31].

Der **Berliner EMF-Messbericht** [34] stellt die Ergebnisse der Ende 2019 durchgeführten Messungen an einer LTE-Kleinzelle in Berlin-Reinickendorf dar. Die Kleinzelle sendet mit 10 W EIRP (äquivalente isotrope Strahlungsleistung), welches die höchste genehmigungsfreie Leistung darstellt.

Für Kleinzellen gelten **Grenzwerte**, die **wertemäßig mit denjenigen der 26. BImSchV übereinstimmen**. Dies bekräftigt die freiwillige Selbstverpflichtung der Mobilfunknetzbetreiber [16] gegenüber der Bundesregierung, vertreten durch das BMUV. Es wird klargestellt, dass die Verfahren und Grenzwerte entsprechend BEMFV und 26. BImSchV ebenso auf ortsfeste Mobilfunkanlagen mit einer Leistung im Bereich zwischen **2 Watt und 10 Watt** (EIRP) Anwendung finden.

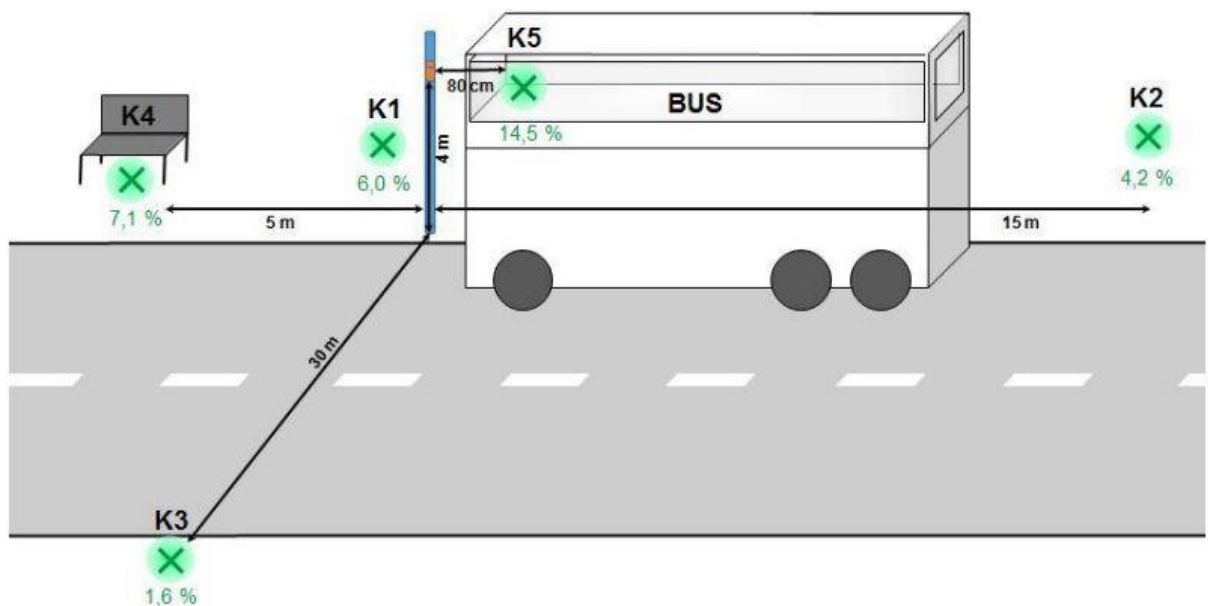


Abbildung 11 Feldstärkebasierte Grenzwertausschöpfung LTE-Kleinzellenstandort [34]

Die feldstärkebasierten Grenzwertausschöpfungen sind in Abbildung 11 dargestellt. Es zeigt sich, dass selbst unmittelbar neben dem Kleinzellenstandort in ca. **1,5m über dem Boden** nur eine **geringe Grenzwertausschöpfung (maximal 7,1%)** zu verzeichnen ist. Selbst im Oberdeck eines Doppelstockbusses ist in **80cm Entfernung** von der Antenne der Grenzwert **nur zu 14,5% ausgeschöpft**.

Der vom **BfS geäußerte Forschungsbedarf** bzgl. des Einsatzes von Kleinzellen (siehe Kapitel 4.4) kann mit den Ergebnissen des Berliner EMF-Messung [34] für die betrachteten Trägerstruktur (mit ausreichend hoch angebrachter Antenne) **relativiert werden**. Es zeigt sich eine **geringe Grenzwertausschöpfung in unmittelbarer Nähe und Kleinzellen haben eine geringe Reichweite**. Vielmehr kann angenommen werden, dass der vermehrte Einsatz von Kleinzellen zu einer gleichmäßigeren Abdeckung mit geringer Feldstärke führt.

Die **Schlussfolgerung** bzgl. Kleinzellen ist, dass deren **Nutzung unproblematisch** erscheint und sogar **Vorteile** hinsichtlich der **Reduzierung** der von allen Sendern (einschließlich der Mobiltelefone) herrührenden **Gesamtimmissionen** ermöglichen könnte.

6.3 5G-Makrozellstandorte

Im April 2022 wurden Messungen an zwei 5G-Makrozellstandorten durch die Technische Universität Ilmenau vorgenommenen [32].

Ein Standort verfügt über ein 5G-System im Frequenzbereich um **2100 MHz**, bei dem LTE und 5G gemeinsame Ressourcen nutzen (**DSS, Dynamic Spectrum Sharing**) (siehe Kapitel 6.3.1).

Der zweite Standort umfasst ein 5G-System bei **3600 MHz mit massive-MIMO-Antennentechnik**, bei dem die Abstrahlungsrichtungen der Antennen flexibel auf einzelne Nutzer ausgerichtet werden können (siehe Kapitel 6.3.2).

Um eine mögliche **Veränderung der Immissionssituation** durch **5G** untersuchen zu können, wurden die exakt gleichen Messorte wie in 2019/2020 (siehe Kapitel 6.1) ausgewählt, wobei nicht an allen der damaligen Messpunkte gemessen wurde. Dies war möglich, da die Standorte inzwischen mit 5G bzw. 5G DSS aufgerüstet wurden.

Alle gemessenen Immissionen werden im Folgenden auf den nach 26. BImSchV verlangten Zustand bei maximaler Anlagenauslastung ausgewiesen.

6.3.1 Dynamic Spectrum Sharing (DSS) in 5G

Auf Basis der vorgenommenen Messungen soll bewertet werden, inwieweit der Einsatz von DSS zu einer erhöhten Strahlenexposition führen kann.

Bei 5G DSS-Anlagen teilen sich LTE und 5G gemeinsam die Frequenzressourcen, d.h. diese können je nach Nutzeranforderung entweder als LTE-Signale, als 5G-Signale oder gleichzeitig als LTE- und 5G-Signale von der Basisstation abgesendet werden. Die ausgewählte Anlage ist ein Beispiel, bei der ein vorhandenes Mobilfunksystem ersetzt wurde. In diesem Fall wurde UMTS abgeschaltet und durch DSS ersetzt, bei dem sich nutzungs-spezifisch LTE und 5G dynamisch dieselben Frequenzressourcen teilen.

Der genutzte Standort entspricht dem Standort, der bereits in Kapitel 6.1 betrachtet wurde, und kann aufgrund der nur geringen technischen Veränderungen der Anlagenparameter gut zum Vergleich herangezogen werden.

Auch bei dieser Messung nehmen im Anlagengebäude die Immissionen in Richtung tieferer Stockwerke ab.

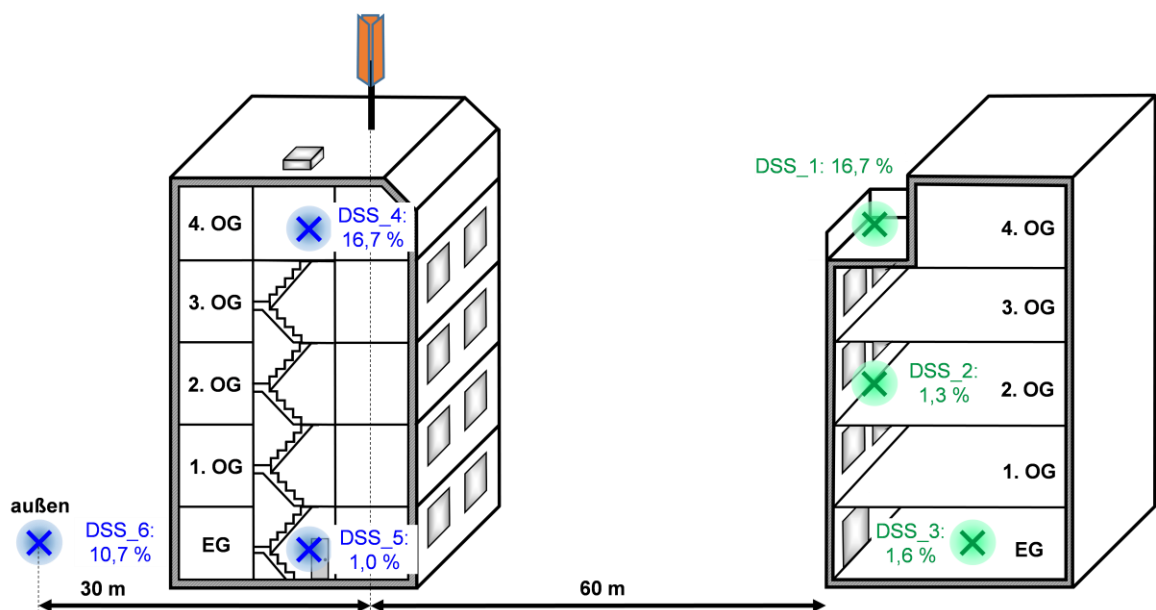


Abbildung 12 Immissionswerte an einem 5G-DSS-Standort

Im obersten Geschoss des Anlagengebäudes direkt unterhalb der **Dachkuppel** werden **16,7 % des elektrischen Feldstärkegrenzwertes** der 26. BImSchV erreicht; im **Erdgeschoss** hingegen nur noch **1,0 %**.

An einem **Außenmesspunkt** in etwa 30 m Bodenabstand von der Mobilfunkanlage wird mit **10,7 %** ein höherer Wert erreicht als im Erdgeschoss.

Dies zeigt, dass der Abstand zur Mobilfunkanlage nicht das ausschlaggebende Kriterium für die elektromagnetische Immission ist. Entscheidend sind vielmehr die Ausrichtung zur Anlage (d.h. innerhalb oder außerhalb der Hauptstrahlrichtung der Antenne) sowie die Sichtverhältnisse (Sicht oder keine Sicht bzw. Hindernisse im Ausbreitungsweg).

Dies zeigt sich auch sehr gut bei der Verteilung der Immissionen im Nachbargebäude:

Auf dem **Balkon im 4. OG** werden mit **16,7 %** ähnlich hohe Immissionen gemessen, wie direkt unterhalb der Anlage, obwohl der Messpunkt etwa 60 m und damit wesentlich weiter als alle Messpunkte im Anlagengebäude von der Mobilfunkanlage entfernt ist.

Zu tieferen Stockwerken nehmen die Immissionen ab, da diese Messpunkte zunehmend außerhalb der vertikalen Hauptstrahlrichtung liegen und außerdem aufgrund der Lage innerhalb des Gebäudes die Dämpfungswirkung der Fenster eine Rolle spielt.

Die **Gegenüberstellung der Messwerte aus 2019/2020 und 2022** in Tabelle 3 verdeutlicht, dass sich die Immissionssituation durch die Ersetzung des 2020 vorhandenen UMTS-Systems durch 5G-DSS **nicht geändert** hat. Eine relevante Immissionsänderung liegt dann vor, wenn sie größer als die spezifizierte Messunsicherheit von ± 3 dB ist. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich ist, sind alle Immissionsveränderungen kleiner als ± 1 dB.

Tabelle 3 Veränderung der in 2019/2020 und 2022 gemessenen Immissionswerte [33]

| Messpunkt | Grenzwertausschöpfung der elektrischen Feldstärke | | Veränderung |
|-----------|---|--------------|-------------|
| | Messung 2019/2020 | Messung 2022 | |
| DSS_1 | 17,5 % | 16,7 % | -0,4 dB |
| DSS_2 | 1,3 % | 1,3 % | 0,0 dB |
| DSS_3 | 0,3 % | 1,6 % | +14,5 dB |
| DSS_4 | 15,3 % | 16,7 % | +0,8 dB |
| DSS_5 | 0,9 % | 1,0 % | +0,9 dB |
| DSS_6 | 11,9 % | 10,7 % | -0,9 dB |

Lediglich am Messpunkt OL_3 liegt eine größere Veränderung vor. Vermutet wird hier eher eine Veränderung der Umgebungsbedingungen.

Fazit: Wird an einer Mobilfunkanlage 5G-DSS anstelle eines anderen Mobilfunksystems bei ansonsten unveränderten Anlagenparametern installiert, führt dies nicht zu einer Veränderung der Immissionssituation.

6.3.2 Einsatz von adaptiven Antennen (massive-MIMO) in 5G

Zur Analyse der Strahlenexposition beim Einsatz von adaptiven Antennen (massive-MIMO) in 5G konnte der bereits in den vergangenen Jahren analysierte Standort, wie er in Abbildung 10 dargestellt ist, genutzt werden.

Zur Ermittlung der Maximalimmission an der 5G-massive-MIMO-Anlage wurde ein **5G-fähiges Mobiltelefon** verwendet und auf diesem wurde **eine App gestartet**, die zur Ermittlung der Datenübertragungsrate dient. Dadurch wurde mit dem Endgerät ein Antennenbeam von der Anlage zum Messpunkt „gezogen“ (**aktive Datensession**), der seitens der Basisstation maximale Ressourcen abrufte.

Auch hier ergibt sich im Anlagengebäude eine **Abnahme der Immission hin zu tieferen Stockwerken**. Die Immission im Nachbargebäude nimmt ebenfalls zu tieferen Geschossen hin ab und erreicht im Erdgeschoss ein ähnliches Niveau wie im Anlagengebäude.

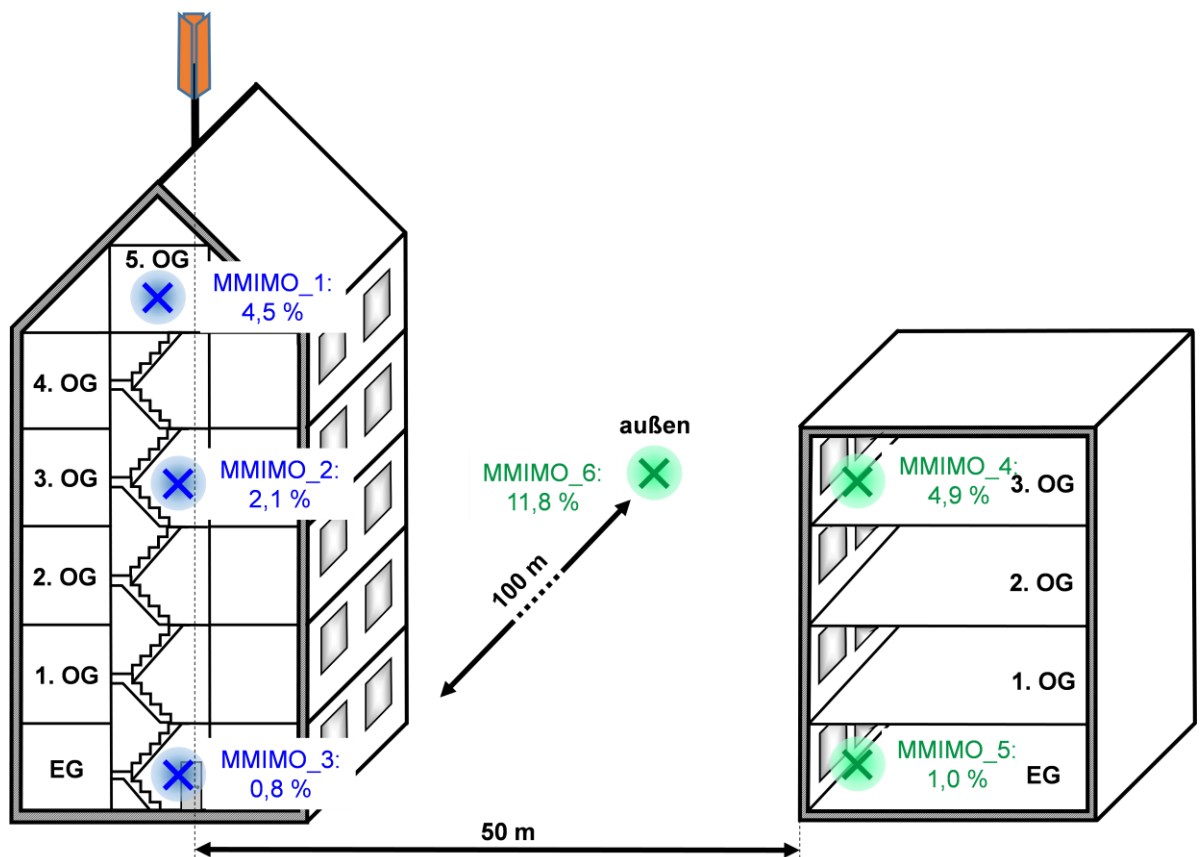


Abbildung 13 Messwerte an einem 5G-Standort mit massiven MIMO-Antennen

Die höchste Immission wurde an einem etwa 100 m entfernten Außenmesspunkt gemessen; hierhin konnte offenbar direkt ein Beam der 5G-Anlage ausgerichtet werden.

Ein Vergleich der in Abbildung 13 angezeigten Werte mit jenen in 2019/2020 gemessenen Werten (siehe Abbildung 10), zeigt, dass die Installation eines **zusätzlichen** 5G-massive-MIMO-Systems in Verbindung mit der Änderung weiterer Anlagenparameter zu einer Erhöhung der Immission an allen Messpunkten, die größer als die Messunsicherheit ist, führt. Die Grenzwertausschöpfung mit einem Maximalwert von 11,8 % im Außenbereich bzw. 4,9 % im Innenbereich ist jedoch weiterhin sehr niedrig.

Zusätzlich zu den auf maximale Anlagenauslastung extrapolierten Immissionen wurden an der 5G-massive-MIMO-Anlage exemplarisch an drei Messpunkten auch Messungen der 5G-Momentanmission wie folgt durchgeführt:

- „Momentan ohne Verkehr“: Momentanmission ohne Provokation von Datenverkehr durch ein 5G-Endgerät
- „Momentan EG nah“: Momentanmission, wobei sich **am Messpunkt ein 5G-Endgerät** befindet und mit diesem eine **typische Auslastung (ARD Live Stream)** erzeugt wird, so dass ein Beam auf den Messpunkt „gezogen“ wird
- „Momentan EG fern“: Momentanmission, wobei sich ein **5G-Endgerät** mit typischer Auslastung **nicht direkt am Messpunkt**, sondern an anderer Stelle der gemessenen 5G-Zelle befindet, so dass ein Beam auf das Endgerät, aber nicht auf den Messpunkt „gezogen“ wird

Die Tabelle unten bietet einen Vergleich der Maximalimmissionen mit dem Momentanmissionen. Es wird ersichtlich, dass die Momentanmissionen bei typischen Nutzungsszenarien (d.h. wenn z.B. durch Videostreaming ein Antennenbeam auf den Messpunkt „gezogen“ wird) nur etwa 1/10 (feldstärkebezogen, bzw. 1/100 leistungsdichtebezogen) der theoretischen Maximalmission beträgt.

Tabelle 4 Vergleichsmessung der Maximal- und der Momentanmissionen [33]

| Messpunkt | Grenzwertausschöpfung bzgl. der elektrischen Feldstärke | | | |
|-----------|---|-----------------------|-----------------|------------------|
| | Maximal möglich | Momentan ohne Verkehr | Momentan EG nah | Momentan EG fern |
| MMIMO_3 | 0,8 % | 0,05 % | 0,05 % | 0,05 % |
| MMIMO_5 | 1,0 % | 0,05 % | 0,09 % | 0,08 % |
| MMIMO_6 | 11,8 % | 0,5 % | 1,0 % | 0,6 % |

Der Wert von 0,05 % (siehe Zeile 1 und Zeile 2) stellt die Empfindlichkeitsgrenze des verwendeten Messgerätes dar.

Fazit: Sofern - wie im Falle von 5G-massive-MIMO-Anlagen - das 5G-System nicht ein vorhandenes Mobilfunksystem ersetzt, sondern zusätzlich installiert wird, kommt es zu einer Erhöhung der Immission. Allerdings sind insbesondere bei 5G-massive-MIMO-Anlagen die erzeugten Momentanmissionen deutlich geringer als die theoretischen Maximalmissionen. Hierbei zeigt sich auch die Stärke von massive-MIMO-Anlagen, die Sendeleistung zielgerichtet auf die Nutzer der Zelle konzentrieren zu können. Bereiche, in denen sich keine Nutzer aufhalten (Messpunkt beim Szenario „EG fern“), erfahren nur eine besonders geringe Immission, die nahe an der Momentanmission ohne Verkehr liegt.

Abkürzungen

| | |
|---------|--|
| 5G | Fünfte Mobilfunkgeneration |
| BfS | Bundesamt für Strahlenschutz |
| BImSchV | Bundesimmissionsschutzverordnung |
| BMUV | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz |
| BNetzA | Bundesnetzagentur |
| dBm | Dezibel Milliwatt |
| DECT | Digital Enhanced Cordless Telecommunications (Schnurlostelefone) |
| EMF | Elektromagnetische Felder |
| FuAG | Funkanlagengesetz |
| Hz | Hertz (physikalische Einheit zur Angabe der Frequenz, siehe Kapitel 2) |
| IARC | International Agency for Research on Cancer |
| ICNIRP | International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection |
| LTE | Long Term Evolution (4. Mobilfunkgeneration) |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output bezeichnet in der Nachrichtentechnik ein Übertragungssystem für die Nutzung mehrere Sende- und Empfangsantennen zur drahtlosen Kommunikation. |
| MNB | Mobilfunk Netzbetreiber |
| NISV | Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung / Schweiz |
| OmeN | Orte mit empfindlicher Nutzung (Begriff der NISV) |
| SAR | Spezifische Absorptionsrate |
| SCENIHR | Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks |
| SSK | Strahlenschutzkommission |
| UVEK | Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Schweiz) |
| W | Watt (physikalische Einheit zur Angabe von Leistung) |
| WHO | World Health Organisation |

Referenzen

- [1] Was sind elektromagnetische Felder, Bundesamt für Strahlenschutz, Internetseite, <http://www.bfs.de/DE/themen/emf/einfuehrung/einfuehrung.html>
- [2] Elektromagnetisches Spektrum, Wikipedia, https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum
- [3] Biologische Wirkung hochfrequenter Felder durch Energieabsorption und Erwärmung, Bundesamt für Strahlenschutz, Internetseite, <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/hff/wirkung/hff-nachgewiesen/hff-nachgewiesen.html>
- [4] High Frequency, International Commission on non-ionizing radiation protection, <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications/>
- [5] Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields, IC-NCRP Guidelines, <https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>
- [6] Umweltschutz - Elektromagnetische Felder, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Internetseite, <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/elektromagnetische-felder-und-licht/>
- [7] Beschreibung der Nahfeldberechnung in den „Erläuterungen der Bewertungsverfahren nach BEMFV“ Kapitel 1.3 ff., https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Verbraucher/ElektromagnetischeFelder/Anzeige_Afu/Erlaeuterung_der_Bewertungsverfahren_nach_BEMFV.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [8] Beschreibung der Fernfeldberechnung in den „Erläuterungen der Bewertungsverfahren nach BEMFV“ Kapitel 1.2 ff., https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Verbraucher/ElektromagnetischeFelder/Anzeige_Afu/Erlaeuterung_der_Bewertungsverfahren_nach_BEMFV.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [9] 26. BImSchV - Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Internetseite, https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/
- [10] Anhang 1 der 26. BImSchV, Internetseite, https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/anhang_1.html
- [11] Spezifische Absorptionsrate (SAR) von Handys, Bundesamt für Strahlenschutz, Internetseite, <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/mobilfunk/vorsorge/sar-handy/sar-handy.html>
- [12] 1999/519/EG: Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A31999H0519>
- [13] Empfehlungen des BfS zum Telefonieren mit dem Handy, Bundesamt für Strahlenschutz, Internetseite, <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/mobilfunk/vorsorge/empfehlungen-handy/empfehlungen-handy.html>
- [14] SAR-Suche, BfS, Internetseite, https://www.bfs.de/SiteGlobals/Forms/Suche/BfS/DE/SARsuche_Formular.html
- [15] Standortverfahren, Bundesnetzagentur, Internetseite, <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Technik/EMF/Standortbescheinigung/funkanlagen-node.html>
- [16] Fortschreibung der Selbstverpflichtung gegenüber der Bundesregierung aus dem Jahr 2001 mit dem Schwerpunkt „Kleinzellen“, BMU, 03.04.2020, Internetseite, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Strahlenschutz/selbstverpflichtung_kleinzellen_bf.pdf
- [17] IARC List of Classification, Internetseite, <https://monographs.iarc.fr/list-of-classifications/>
- [18] Einstufung hochfrequenter elektromagnetischer Felder durch die IARC, BfS, Internetseite, http://www.bfs.de/DE/themen/emf/hff/wirkung/iarc/iarc_node.html
- [19] EMF-Portal der RWTH-Aachen, Internetseite, <https://www.emf-portal.org/de>

- [20] Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER), EU-Kommission, Internetseite, https://ec.europa.eu/health/scientific-committees/scientific-committee-health-environmental-and-emerging-risks-scheer_en
- [21] Bericht der AG Mobilfunk und Strahlung im Auftrag des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Schweiz, 18.11.2019, https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektromog/fachinfo-daten/bericht-mobilfunk-und-strahlung.pdf.download.pdf/Bericht_MobilfunkStrahlung.pdf
- [22] Wissenschaftlich diskutierte biologische und gesundheitliche Wirkung hochfrequenter Felder, BfS, Internetseite, <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/hff/wirkung/hff-diskutiert/hff-diskutiert.html>
- [23] Wie riskant ist Handstrahlung? Ein Faktencheck, Stiftung Warentest, 27.08.2019, <https://www.test.de/Mobilfunk-Wie-riskant-ist-Handstrahlung-Ein-Faktencheck-5509718-0/>
- [24] ICNIRP Note: Critical Evaluation of Two Radiofrequency Electromagnetic Field Animal Carcinogenicity Studies Published in 2018, <https://www.emf-portal.org/de/article/35966>
- [25] Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission, Falconi, et al., Ramazzini Institute Bologna, 2018, <https://www.emf-portal.org/de/article/34742>
- [26] Toxicology and Carcinogenesis Studies in Hsd:Sprague Dawley SD Rats Exposed to Whole-Body Radio Frequency Radiation at a Frequency (900 MHz) and Modulations (GSM and CDMA) Used by Cell Phones, M.E. Wyde, et. al., US National Institute of Health, 2018, <https://www.emf-portal.org/de/article/37902>
- [27] NTP Technical Report on Toxicology and Carcinogenesis Studies In B6C3F1/N Mice Exposed to Whole-Body Radio Frequency Radiation at a Frequency (1,900 MHz) and Modulations (GSM and CDMA) Used by Cell Phones, M.E. Wyde, et. al., US National Institute of Health, 2018, <https://www.emf-portal.org/de/article/37901>
- [28] NTP scientist weighs in on 5G technology, National Institute of Environmental Health Science, Januar 2020, Internetseite, <https://factor.niehs.nih.gov/2020/1/community-impact/5g-technology/index.htm>
- [29] 5G, BfS, Internetseite, https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/emf/standpunkt-5g.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- [30] Mitnutzungspotentiale kommunaler Trägerinfrastrukturen für den Ausbau der nächsten Mobilfunkgeneration 5G, BMVI, 01.07.2019, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/mitnutzungspotentiale-kommunale-traegerinfrastrukturen-ausbau-5g.html>
- [31] Ericsson Mobility Report November 2019, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/november-2019>
- [32] EMF-Messprojekt Berlin 2022, Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe, <https://www.berlin.de/gigabitstrategie/mobilfunk/immissionsschutz/>
- [33] Datenschutzkonforme Version V1.0 des Abschlussberichtes zum Projekt „EMF-Messung & Auswertung (Mobilfunk) 2020“, Technische Universität Ilmenau, 18.03.2020 https://www.berlin.de/sen/wirtschaft/digitalisierung/assets/bericht_emf-messung-berlin_2020.pdf
- [34] Datenschutzkonformer Abschlussberichtes Version 1.0 zum Projekt „Immissionsuntersuchung an einer Mobilfunk-Kleinzelle“, Technische Universität Ilmenau, 25.03.2020, https://www.berlin.de/sen/wirtschaft/digitalisierung/assets/bericht_emf-messung-berlin-kleinzellen_2020.pdf
- [35] MOBI-KIDS-Studie <https://www.emf-portal.org/de/glossary/3623>
- [36] Einstufung hochfrequenter elektromagnetischer Felder <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/hff/wirkung/iarc/iarc.html>
- [37] Funkanlagengesetz (FuAG) <https://www.gesetze-im-internet.de/fuag/FuAG.pdf>

- [38] Mobilfunk und 5G: Umgang mit adaptiven Antennen ist geklärt; <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektromog/dossiers/bericht-arbeitsgruppe-mobilfunk-und-strahlung.html>
- [39] Bundesamt für Strahlenschutz: 5G - Die 5. Mobilfunk-Generation; <https://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschueren/emf/standpunkt-5g.html>
- [40] WBF (Wissenschaftlicher Beirat Funk, Österreich) Pressemitteilung zum jährlichen WBF Expertenforum, https://info.bmlrt.gv.at/dam/jcr:a92d3197-8f9d-4c75-a7c2-f87c0d54ef0a/WBF_Presse-Information_2021.pdf
- [41] A Description of ICNIRP'S Independent, Best Practice System of Guidance on the Protection of People and the Environment from Exposure to Non-Ionizing Radiation, https://journals.lww.com/health-physics/Fulltext/2022/05000/A_Description_of_ICNIRP_S_Independent_Best.9.aspx
- [42] Stellungnahme der Strahlenschutzkommission (2021): Elektromagnetische Felder des Mobilfunks im Zuge des aktuellen 5G-Netzausbaus - Technische Aspekte und biologische Wirkungen im unteren Frequenzbereich (FR1, bis ca. 7 GHz), https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse_PDF/2021/2021-12-10_Stgn_5G_Mobilfunk.pdf?__blob=publicationFile
- [43] Bundesnetzagentur, Tätigkeitsbericht - Telekommunikation 2020/2021, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2021/TTB2020.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [44] Bundesamt für Strahlenschutz: Langzeitstudie an Ratten zu Ganzkörperexposition mit Mobilfunkfeldern (Ramazzini-Studie), <https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/stellungnahmen/emf/langzeitstudie-ratten-ramazzini.html>