

Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern bei Frequenzen des 6G-Mobilfunks

Dr. Christian Bornkessel, Thüringer Innovationszentrum Mobilität, TU Ilmenau, Deutschland
M. Sc. Lisa-Marie Schilling, Thüringer Innovationszentrum Mobilität, TU Ilmenau, Deutschland
M. Sc. Anna-Malin Schiffarth, RWTH Aachen, Deutschland
M. Sc. Thanh Tam Julian Ta, RWTH Aachen, Deutschland
Prof. Dr. Dirk Heberling, RWTH Aachen/FHR Wachtberg, Deutschland
Prof. Dr. Matthias Hein, Thüringer Innovationszentrum Mobilität, TU Ilmenau, Deutschland

1 Einleitung

Um einen Beitrag dazu zu leisten, dass Deutschland als digital souveräner Technologieanbieter eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung des nächsten Mobilfunkstandards 6G einnimmt, fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die „Spitzenforschung für die Kommunikationssysteme von morgen“ [1] derzeit im Rahmen von vier universitären 6G-Forschungshubs. Der von der RWTH Aachen koordinierte 6G-Hub „6GEM“ [2] zielt darauf ab, ganzheitliche Systeme für Anwendungen in Logistik, Produktion und Gesundheitsfürsorge zu entwickeln, die die Bedürfnisse der Nutzer und weiterer Betroffener nach Selbstbestimmung, Privatsphäre und Sicherheit vorausschauend und nachhaltig berücksichtigen.

In der Förderbekanntmachung der 6G-Hubs [3] werden die Aspekte einer möglichst geringen Strahlenexposition sowie einer gesellschaftlichen Akzeptanz von 6G explizit adressiert. Dieser verantwortungsvollen Aufgabe widmet sich das Teilvorhaben „Konzepte und Maßnahmen zur Minimierung der Strahlenexposition der Bevölkerung“, das von der RWTH Aachen und dem Thüringer Innovationszentrum Mobilität an der TU Ilmenau bearbeitet wird. Hintergrund des Teilvorhabens ist, dass bei der 6. Mobilfunkgeneration neben den sub-6GHz-Frequenzen auch neue, durch die bisherigen Mobilfunkgenerationen noch nicht genutzte Frequenzbereiche im Millimeterwellenbereich erschlossen werden. Dies erfordert eine Überprüfung, in wieweit bislang verwendete Strahlenexpositionsmetriken noch anwendbar sind, neue Messverfahren entwickelt oder vorhandene adaptiert werden müssen.

Vorliegender Beitrag fasst bisherige Ergebnisse des Teilvorhabens zusammen, in denen geeignete Expositionsmetriken für den 6G-Mobilfunk erforscht werden. Der Frequenzbereich für vorliegende Untersuchungen erstreckt sich von 100 GHz bis 300 GHz (sub-THz). Es wird erforscht, welche Konsequenzen die physikalischen Ausbreitungs- und Wechselwirkungsmechanismen in diesem Frequenzbereich für eine entsprechende Expositionsmesstechnik und -bewertung haben. Die Arbeiten basieren auf einer Recherche zu den Grenzwertphilosophien der relevanten internationalen Strahlenschutzempfehlungen sowie der deutschen Gesetzgebung.

2 Forschungsstand zur Grenzwertableitung im Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich

Als aktueller Stand der Technik hinsichtlich internationaler Grenzwertbestimmungen zum Schutz von Personen in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) speziell für den europäischen Regelungsraum werden die Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) aus dem Jahr 2020 herangezogen [4]; diese decken den Frequenzbereich bis 300 GHz ab. Bei den Empfehlungen handelt es sich nicht um Vorgaben, sondern um Richtlinien, die ihre rechtliche Gültigkeit erst durch Umsetzung in die europäische bzw. nationale Gesetzgebung erlangen, wie z.B. im Rahmen nationaler immissionsschutzrechtlicher Vorgaben oder der Umsetzung von EU-Richtlinien z.B. zur CE-Kennzeichnung in nationales Recht. Das Grenzwertkonzept nach ICNIRP ist mehrstufig aufgebaut und basiert auf Basisgrenzwerten, die direkte intrakorporale Wirkungen adressieren, und daraus abgeleiteten Referenzwerten, die sich unter Feldbedingungen einfacher messen lassen als die Basisgrenzwerte. Im Folgenden werden die Grundlagen der Ableitung der Grenzwerte dargestellt und Unterschiede zwischen sub-6GHz-Frequenzbereichen und sub-THz-Frequenzen diskutiert.

2.1 Biologischer Effekt

Die maßgeblichen Wirkungen, die der Grenzwertsetzung im Hochfrequenz- und Mikrowellenbereich zugrunde liegen, sind thermischen Ursprungs. Diese entstehen, indem durch äußere EMF intrakorporal erzeugte elektrische Felder auf polare Moleküle - hauptsächlich Wassermoleküle - und auf frei bewegliche geladene Partikel wie Elektronen und Ionen eine Kraft ausüben. In beiden Fällen wird ein Teil der Energie in kinetische Energie umgewandelt, die dafür sorgt, dass die polaren Moleküle zu rotieren beginnen und die geladenen Partikel sich bewegen und einen Strom ausbilden. Diese interagieren mit anderen polaren Molekülen und geladenen Partikeln, so dass ein Teil der kinetischen Energie in Wärme umgewandelt wird. Diese Wärme kann beim Überschreiten eines bestimmten Schwellwertes negative gesundheitliche Effekte verursachen.

ICNIRP betont, dass die Wärmewirkung nicht der einzige nachgewiesene biologisch relevante Effekt von hochfrequenten EMF ist. Beispielsweise wurden bei einer Dauerstrich- (CW) Exposition bei 18 GHz auch Veränderungen der biologischen Permeabilität von Zellmembranen festgestellt, allerdings erst bei Expositionen größer als ca. 5 kW/kg, die die Schwelle für thermische Wirkungen weit überschreiten. Grundsätzlich erfolgt die Grenzwertsetzung aber über denjenigen etablierten biologischen Effekt, der bei der niedrigsten Exposition auftritt, so dass eine Schutzwirkung automatisch auch für diejenigen Effekte existiert, die erst bei höheren Expositionen auftreten.

2.2 Schwellwert

ICNIRP unterscheidet zwischen der Erhöhung der *Körperkerntemperatur* (bei Ganzkörperexposition, z.B. im Fernfeld einer Strahlungsquelle) und der *lokalen* Erwärmung einzelner Körperteile bzw. -gewebe (bei lokaler bzw. Teilkörperexposition, z.B. Mobiltelefon am Kopf).

Für die *Ganzkörperexposition* ist als Schwellwert eine EMF-induzierte Erhöhung der Körperkerntemperatur von maximal 1°C zugelassen. Bei der *Teilkörperexposition* unterscheidet man zwischen verschiedenen Körperbereichen bzw. den dazugehörigen Gewebeklassen: „Typ-1“-Gewebe beinhaltet alle Gewebe von Oberarm, Unterarm, Hand, Oberschenkel, Bein, Fuß, Ohrmuschel und Hornhaut, vorderer Augenkammer und Iris des Auges, Epidermis, Dermis, Fett-, Muskel- und Knochengewebe. „Typ-2“-Gewebe umfasst alle Gewebe im Kopf, Auge, Unterleib, Rücken, Brustkorb und Becken mit Ausnahme der unter „Typ-1“ definierten Gewebe. Eine Unterscheidung in diese zwei Gewebetypen findet deswegen statt, weil die Typ-1-Gewebe mit <33 bis 36°C eine andere normothermische Temperatur haben als die Typ-2-Gewebe mit bis zu 38,5°C; dies ist in Abbildung 1 visualisiert. Da lokale Gewebetemperaturen von 41°C oder höher als potenziell schädlich angesehen werden, beträgt der Schwellwert für die durch EMF induzierte Temperaturerhöhung für Teilkörperexposition bei Typ-1-Geweben 5°C und bei Typ-2-Geweben 2°C.

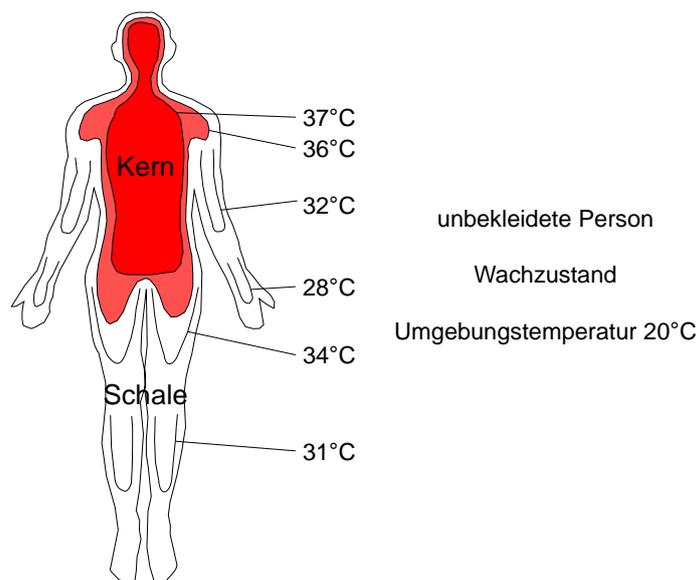


Abbildung 1: Isothermen des ruhenden, unbedeckten Menschen bei 20°C Lufttemperatur, nach [5]

2.3 Basisgrenzwerte

2.3.1 Dosimetrische Größe im Frequenzbereich bis 6 GHz

Für die Ermittlung der relevanten dosimetrischen Größen ist entscheidend, wo bzw. bis zu welcher Gewebetiefe die Energie des einfallenden EMF absorbiert und in Wärme umgewandelt wird; letzteres wird durch den normalen Skineffekt beschrieben. Bei Frequenzen unterhalb von 6 GHz dringen EMF vergleichsweise tief in Gewebe ein: Die primär von der Frequenz und der elektrischen Leitfähigkeit des Gewebes abhängenden Eindringtiefe in Hautgewebe beträgt bei 6 GHz etwa 8,1 mm [4], so dass hier eine *volumenbasierte* dosimetrische Größe als Basisgrenzwert definiert wird. Dies ist die spezifische Absorptionsrate (SAR), die die pro Kilogramm Körpergewebe („spezifische“) absorbierte Energierate - also Energieänderung pro Zeit - beschreibt und in Watt pro Kilogramm angegeben wird. Es gibt einen Ganzkörper-SAR-Basisgrenzwert mit Mittelung über den gesamten Körper zur Begrenzung der Erhöhung der Körperkerntemperatur um maximal 1°C und einen Teilkörper-SAR-Basisgrenzwert mit Mittelung über 10 g Gewebe zur Begrenzung der lokal begrenzten Temperaturerhöhungen von 5°C bzw. 2°C. Beide Grenzwerte sind einzuhalten.

2.3.2 Dosimetrische Größe im Frequenzbereich ab 6 GHz

Bei Frequenzen oberhalb von 6 GHz werden die EMF zunehmend an den äußeren Gewebeschichten absorbiert, so dass Volumeneffekte weniger relevant werden. Beispielsweise sinkt die Eindringtiefe in Hautgewebe bei 300 GHz auf 0,23 mm ab [4]. Deswegen geht man zumindest bei der lokalen Exposition mit der absorbierten Leistungsflussdichte S_{ab} (in Watt pro Quadratmeter) von einer *volumenbasierten* dosimetrischen Größe auf eine *flächenbasierte* Größe über. Durch die damit definierten (lokalen) Basisgrenzwerte ist abgesichert, dass die lokale Temperaturerhöhung unterhalb der 5°C- bzw. 2°C-Schwelle bleibt. Allerdings kann eine Erwärmung der oberen Hautschichten durch Blutgefäße auch in tiefere Körperschichten transportiert werden, weswegen ICNIRP die für Frequenzen unterhalb von 6 GHz abgeleitete SAR-Ganzkörper-Wirksamkeit konservativ auch auf den Frequenzbereich von 6 GHz bis 300 GHz überträgt, um eine unzulässige Erhöhung der Körperkerntemperatur auszuschließen.

2.3.3 Ableitung der Basisgrenzwerte im Frequenzbereich bis 6 GHz

Als Basis für die Bestimmung der Ganzkörper-SAR-Grenzwerte für den Frequenzbereich 100 kHz bis 6 GHz gilt die Beobachtung, dass eine über den gesamten Körper gemittelte SAR von 4 W/kg gemittelt über 30 Minuten (thermisches Gleichgewicht) die Körperkerntemperatur um nicht mehr als 1°C ansteigen lässt. Für die Allgemeinbevölkerung wird als Sicherheitsfaktor ein Reduktionsfaktor von 50 verwendet, so dass sich insgesamt ein Ganzkörper-SAR-Grenzwert von 0,08 W/kg ergibt. Dieser Sicherheitsfaktor berücksichtigt wissenschaftliche Unsicherheiten, Unterschiede in der thermischen Physiologie in der Bevölkerung und Variabilität in Umweltbedingungen und Grad der körperlichen Aktivität.

Hinsichtlich der lokalen Exposition ist es nicht praktikabel, Expositionsgrenzwerte für verschiedene Gewebeklassen zu definieren. Deswegen unterscheidet ICNIRP lediglich die Körperbereiche „Kopf/Rumpf“ (Kopf, Auge, Ohrmuschel, Unterleib, Rücken, Brustkorb und Becken mit Typ-1 und Typ-2-Geweben) sowie „Gliedermaßen“ (Oberarm, Unterarm, Hand, Oberschenkel, Bein und Fuß mit *ausschließlich* Typ-1-Geweben), siehe Abbildung 1. Im Frequenzbereich 100 kHz bis 6 GHz ist eine Teilkörper-SAR von mindestens 20 W/kg, gemittelt über ein würfelförmiges Gewebenvolumen, das einer Masse von 10 g entspricht, nötig, um eine Temperaturerhöhung auf 41°C im Kopf-/Rumpfbereich zu erreichen. Für die Gliedermaßen ist eine Teilkörper-SAR von 40 W/kg nötig, jeweils gemittelt über 6 Minuten (thermisches Gleichgewicht des 10 g Volumens). Bei Annahme eines Sicherheitsfaktors von 10 ergeben sich Teilkörper-SAR-Grenzwerte von 2 W/kg für Kopf/Rumpf und 4 W/kg für Gliedermaßen. Die Reduktionsfaktoren für die lokale Exposition sind kleiner als bei Ganzkörperexposition, weil der Schwellwert für gesundheitliche Auswirkungen weniger von den Umweltbedingungen und den hochgradig variablen zentral-gesteuerten thermoregulatorischen Prozessen abhängt, und weil der damit verbundene Gesundheitseffekt medizinisch weniger schwerwiegend ist.

Frequenzbereich	Ganzkörper-SAR in W/kg	Teilkörper-SAR (Kopf/Rumpf) in W/kg	Teilkörper-SAR (Gliedermaßen) in W/kg	Lokal absorbierte Leistungsfluss- dichte S_{ab} in W/m ²
100 kHz bis 6 GHz	0,08	2	4	Nicht anwendbar
>6 bis 300 GHz	0,08	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	20

Tabelle 2.1: Basisgrenzwerte nach [4] für die Exposition der Allgemeinbevölkerung durch EMF für Mittelungsintervalle ≥ 6 min. Die Ganzkörper-SAR ist über 30 min, die Teilkörper-SAR und S_{ab} sind über 6 min zu mitteln. Weitere Zusatzbedingungen siehe Text.

2.3.4 Ableitung der Basisgrenzwerte im Frequenzbereich ab 6 GHz

Im Frequenzbereich von 6 GHz bis 300 GHz findet die Absorption hauptsächlich nahe der Körperoberfläche statt. Eine absorbierte Leistungsflussdichte von mindestens 200 W/m² gemittelt über 6 Minuten ist nötig, um die Temperatur von Typ-1-Gewebe um 5°C und Typ-2-Gewebe um 2°C zu erhöhen. Auch hier wird ein Sicherheitsfaktor von 10 angesetzt, so dass sich ein Grenzwert für die lokal absorbierte Leistungsflussdichte von 20 W/m² ergibt. Die Exposition ist dabei über einen Querschnitt von 4 cm² zu mitteln, da die Exposition in diesem Querschnitt eine gute Abschätzung für die lokale Temperaturerhöhung darstellt. Bei steigenden Frequenzen muss die Mittelungsfläche reduziert werden, um kleineren Strahlungskeulen einer HF-Sendeeinrichtung Rechnung zu tragen, so dass für Frequenzen oberhalb von 30 GHz zusätzlich eine räumliche Mittelung über 1 cm² eingeführt wird. Die so abgeleiteten Basisgrenzwerte sind zusammenfassend in Tabelle 2.1 dargestellt. Der 6G sub-THz-Frequenzbereich ist dabei farbig markiert.

Für kürzere Expositionszeiten als 6 Minuten kann die Temperaturverteilung im Gewebe durch die Ausbildung von „hot spots“ heterogener werden, da die Wärme nicht schnell genug abgeführt werden kann. Deswegen kann hier eine zeitliche Mittelung über die gesamten 6 Minuten, d.h. auch über die Zeitintervalle, in denen keine Exposition vorliegt, zu kurzzeitigen Expositionswerten führen, die die o.g. Temperaturerhöhungen lokal überschreitet. Um dies zu verhindern, definiert ICNIRP zusätzlich Basisgrenzwerte für eine spezifische Energieabsorption in kJ/kg bei Frequenzen von 100 kHz bis 6 GHz und für eine absorbierte Energiedichte in kJ/m² oberhalb von 6 GHz.

2.4 Referenzwerte

Referenzwerte werden mit Hilfe von Berechnungen und Messungen aus den Basisgrenzwerten abgeleitet, um eine Überprüfung der Konformität anhand von physikalischen Größen zu gewährleisten, die einfacher zugänglich sind als Basisgrenzwerte. Bei der Ableitung wurde auf maximale Konservativität Wert gelegt (z.B. Ganzkörperexposition durch eine ebene Welle), d.h. die Referenzwerte weisen für „worst-case“ Expositionsszenarien ein vergleichbares Schutzniveau wie die Basisgrenzwerte auf, wohingegen sie in typischen Expositionsszenarien konservativer als die Basisgrenzwerte sind. Deswegen können in vielen Expositionsszenarien trotz Überschreitung der Referenzwerte die Basisgrenzwerte noch eingehalten sein. Die Referenzwerte gelten am Ort der exponierten Person, aber „bei Abwesenheit“ dieser, d.h. die Feldverteilung wird nicht durch die exponierte Person gestört.

2.4.1 Referenzwerte für Ganzkörperexposition

Die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung bei Ganzkörperexposition sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Im Frequenzbereich zwischen 400 MHz und 2000 MHz sind die Ganzkörper-Referenzwerte frequenzabhängig. Ursache hierfür sind Resonanzeffekte, bei denen die Wellenlänge λ einer vertikal polarisiert einfallenden elektromagnetischen Welle halb bzw. ein Viertel so groß wie die Körperdimension einer aufrechtstehenden Person ist, die isoliert bzw. auf einer metallischen Massefläche (Groundplane) steht. In diesen Fällen ist bei gleicher Feldintensität die resultierende Ganzkörper-SAR größer als außerhalb des Resonanzfrequenzbereiches. Der Fall einer

Frequenzbereich	Einfallende E-Feldstärke E_{inc} in V/m	Einfallende H-Feldstärke H_{inc} in A/m	Einfallende Leistungsflussdichte S_{inc} in W/m ²
0,1 – 30 MHz	$300/f_M^{0,7}$	$2,2/f_M$	NA
>30 – 400 MHz	27,7	0,073	2
>400 – 2000 MHz	$1,375 f_M^{0,5}$	$0,0037 f_M^{0,5}$	$f_M/200$
>2 – 300 GHz	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	10

Tabelle 2.2: Referenzwerte nach [4] für die Allgemeinbevölkerung, gemittelt über 30 Minuten und den gesamten Körper (ungestörte RMS-Werte); f_M ist die Frequenz in MHz; Zusatzbedingungen siehe Text.

vertikal polarisierten Welle stellt dabei ein „worst-case“ Szenario dar, da bei anderen Polarisierungen die resultierende Ganzkörper-SAR um Größenordnungen kleiner ist. Oberhalb der Ganzkörperresonanz, insbesondere oberhalb einiger GHz, nehmen die polarisationsabhängigen Effekte auf die resultierende SAR ab und sind nicht mehr signifikant.

Oberhalb von 2 GHz wird die Konformität durch Einhaltung des Referenzwertes für die einfallende Leistungsflussdichte S_{inc} nachgewiesen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei Frequenzen oberhalb von 6 GHz die Absorption der EMF primär an der Körperoberfläche stattfindet und deswegen die insgesamt absorbierte Leistung bzw. der Ganzkörper-SAR-Wert (Basisgrenzwert) unabhängig von der Frequenz in etwa proportional zur Größe des exponierten Bereichs der Körperoberfläche ist. Deswegen hat ICNIRP den im Frequenzbereich von 2 GHz bis 6 GHz geltenden Ganzkörper-Referenzwert von 10 W/m² auf den Bereich von 6 GHz bis 300 GHz übertragen. Dabei gelten die gleichen zeitlichen (30 Minuten) und örtlichen (gesamter durch den Körper eingenommener Raumbereich) Mittelungsvorgaben wie bei den Basisgrenzwerten.

Für Tabelle 2.2 gelten dabei folgende Zusatzbedingungen: Unter Fernfeldbedingungen kann der Referenzwert S_{inc} durch die äquivalente Leitungsflussdichte bei ebenen Wellen S_{eq} ersetzt werden. Da hierfür unter Zuhilfenahme der Freiraumimpedanz $Z_0=377$ Ohm

$$S_{eq} = |E|^2/Z_0 = Z_0 |H|^2 \quad (2.1)$$

gilt, kann im Fernfeld eine Konformitätsbewertung auch anhand der Beiträge der elektrischen oder magnetischen Feldstärkewerte erfolgen. Im strahlenden Nahfeld kann die Konformität bei Frequenzen oberhalb von 2 GHz nur mittels S_{inc} nachgewiesen werden und im reaktiven Nahfeld ist bei diesen Frequenzen eine Konformitätsbewertung nur anhand der Basisgrenzwerte möglich.

2.4.2 Referenzwerte für lokale Exposition

Die über den gesamten Körper gemittelten Referenzwerte nach Tabelle 2.2 korrespondieren dabei mit den *Ganzkörper*-Basisgrenzwerten nach Tabelle 2.1. Zusätzlich gibt es auch Referenzwerte für die lokale Exposition, die mit den Basisgrenzwerten für *Teilkörper*-Exposition korrespondieren; diese sind in Tabelle 2.3 dargestellt. Dies stellt eine Neuerung gegenüber der Vorgängerversion der ICNIRP-Empfehlungen aus dem Jahr 1998 dar, die Referenzwerte nur über den gesamten Körper gemittelt definierte. Dabei lassen sich die Referenzwerte für die lokale Exposition oberhalb von 6 GHz aus den Basisgrenzwerten für lokale Absorption in diesem Frequenzbereich ableiten: Die absorbierte Leistungsflussdichte ergibt sich aus der einfallenden Leistungsflussdichte abzüglich des an der Körperoberfläche reflektierten Teils. Der Reflexionsfaktor ist abhängig von den dielektrischen Gewebeeigenschaften, der Form der Körperoberfläche, dem Einfallswinkel und der Polarisation. ICNIRP hat die Referenzwerte anhand eines geschichteten Modells und Normaleinfall abgeleitet und betrachtet diesen Fall als „worst-case“-Modellierung für die meisten Expositionsszenarien. Der Reflexions- bzw. Transmissionsfaktor ist dabei frequenzabhängig, so dass auch die Referenzwerte für lokale Exposition frequenzabhängig sind. Dabei gelten die gleichen zeitlichen (6 Minuten) und örtlichen (4 cm² bzw. 1 cm²) Mittelungsvorgaben wie bei den lokalen Basisgrenzwerten.

Frequenzbereich	Einfallende E-Feldstärke E_{inc} in V/m	Einfallende H-Feldstärke H_{inc} in A/m	Einfallende Leistungsflussdichte S_{inc} in W/m ²
0,1 – 30 MHz	$671/f_M^{0,7}$	$4,9/f_M$	Nicht anwendbar
>30 – 400 MHz	62	0,163	10
>400 – 2000 MHz	$4,72f_M^{0,43}$	$0,0123f_M^{0,43}$	$0,058f_M^{0,86}$
>2 – 6 GHz	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	40
>6 – 300 GHz	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	$55/f_G^{0,177}$
300 GHz	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	20

Tabelle 2.3: Referenzwerte für lokale Exposition nach [4] für die Allgemeinbevölkerung, gemittelt über 6 Minuten (ungestörte RMS-Werte); f_M bzw. f_G ist die Frequenz in MHz bzw. GHz; Zusatzbedingungen siehe Text.

Auch für die Referenzwerte bei lokaler Exposition gelten feldzonenabhängige Randbedingungen; so kann im Fernfeld eine Konformitätsbewertung auch anhand der Beiträge der elektrischen oder magnetischen Feldstärkewerte erfolgen. Im strahlenden Nahfeld kann die Konformität bei Frequenzen oberhalb von 6 GHz nur mittels S_{inc} nachgewiesen werden und im reaktiven Nahfeld ist bei Frequenzen oberhalb von 2 GHz eine Bewertung nur anhand der Basisgrenzwerte möglich. Als Begründung für diese feldzonenabhängige Bewertungsmetrik führt ICNIRP an, dass die Unsicherheiten der referenzwertbasierten Erfassung vom Fernfeld zum Nahfeld zunehmen, z.B. hinsichtlich der räumlichen Variation der elektromagnetischen Felder über den Ort der exponierten Person. Deswegen müsse die Vorgehensweise im strahlenden und vor allem reaktiven Nahfeld konservativer als im Fernfeld sein, um auch hier durch die Referenzwerte eine adäquate Sicherstellung der Einhaltung der Basisgrenzwerte zu gewährleisten. Die Hauptbestimmungsgröße für die unterschiedlichen Feldregionen ist der Grad der Übereinstimmung des lokal vorliegenden Expositionsfeldes mit einer ebenen Welle. Zwar führt ICNIRP in seinem Anhang eine mögliche Definition der Feldzonenbereiche ein (Fernfeld ab Abständen von $2D^2/\lambda$ von der Sendeantenne mit Apertur D , strahlendes Nahfeld ab $\lambda/2\pi$), bezeichnet dies aber selber nur als groben Richtwert. Hier erscheinen antennentypspezifische Feldzonendefinitionen [6] wesentlich besser geeignet.

2.5 Konsequenzen für die Immissionserfassung

Insbesondere die Veränderung der Expositionsmetrik für die Basisgrenzwerte ab 6 GHz von einer volumenbasierten in eine oberflächenbasierte Absorptionsrate sowie die explizite Einführung einer feldzonenabhängigen Bewertungsmethodik haben folgende Konsequenzen für die Immissionserfassung für 6G-Frequenzen im sub-THz-Bereich:

- Die messtechnische Konformitätsprüfung anhand von Basisgrenzwerte kann weiterhin nur unter Laborbedingungen durchgeführt werden. Aufgrund des Übergangs zur absorbierten Leistungsflussdichte oberhalb von 6 GHz müssen neue Messeinrichtungen entwickelt und validiert werden, die z.B. auf der Messung der Erwärmung eines Hautphantoms per Infrarotkamera [7] oder eine Feldstärkemessung in einem Phantom [8] basieren können.
- Die Basisgrenzwerte können auch mittels elektromagnetischer Vollwellensimulation überprüft werden, wobei der Simulationsaufwand durch die kleine Wellenlänge erheblich ist.
- Eine messtechnische Konformitätsüberprüfung anhand der gemessenen elektrischen Feldstärke ist nur im Fernfeld der Strahlungsquelle möglich. Im strahlenden Nahfeld muss die einfallende Leistungsflussdichte ermittelt werden; hierfür existieren aber keine geeigneten Messgeräte, da die existierenden jeweils nur elektrische oder magnetische Feldstärke messen. Hier stellen kombinierte mess- und simulationstechnische Hybridverfahren [9] eine aussichtsreiche Alternative dar. Der Fernfeldabstand von der Strahlungsquelle steigt linear mit der Frequenz und beträgt beispielsweise für eine quadratische Aperturanterenne mit den Kantenabmessungen von 30 cm x 30 cm bei 100 GHz 120 m.

3 Rechtliche Anforderungen für ortsfeste Sendeanlagen in Deutschland

Die gesetzlichen Regelungen für 6G-Anlagen in Deutschland sind davon abhängig, ob es sich um ortsfeste Sendeanlagen wie Basisstationen oder um Endgeräte handelt. Bei den ortsfesten Anlagen wird unterschieden, wie groß die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (EIRP) ist: Für ortsfeste Anlagen mit einer EIRP > 10 W gelten die Regelungen und Grenzwerte der 26. BImSchV [10]. Die dort definierten Grenzwerte sind bei den 6G-Frequenzen unter Fernfeldbedingungen zahlenmäßig identisch mit den Ganzkörper-Referenzwerten der ICNIRP-Richtlinien [4], erlauben jedoch keine Ganzkörpermittlung in Zusammenhang mit Teilkörper-Referenzwerten. Bei ortsfesten Anlagen mit einer EIRP < 10 W wird über EU-weit harmonisierte Richtlinien und Produktnormen auf die Basisgrenzwerte und Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG [11] verwiesen.

4 Aktuelle Forschungsergebnisse zur biologischen Forschung bei Millimeterwellen

Wie in Kapitel 2 ausgeführt, basieren die Bevölkerungsschutzgrenzwerte auf der Begrenzung der Erwärmung von Körpergewebe. Die zunehmende Nutzung des Frequenzbereichs oberhalb von 6 GHz hat Befürchtungen in Teilen der Bevölkerung vor möglichen gesundheitsschädlichen Effekten bei diesen Frequenzen aufkommen lassen. Kürzlich sind zwei wissenschaftliche Arbeiten veröffentlicht worden, die die wissenschaftliche Literatur der letzten Jahre zu biologischen Wirkungen und Gesundheitseffekten überprüft haben [12], [13]. Die Reviews ergaben keine bestätigten Hinweise darauf, dass schwache HF-Felder über 6 GHz für die menschliche Gesundheit gefährlich sind. Beklagt wurde aber die oftmals mangelhafte Qualität der vorliegenden Studien. Bei zukünftigen experimentellen Studien sollte insbesondere der Versuchsaufbau verbessert und dabei besonderes Augenmerk auf die Dosimetrie und die Temperaturkontrolle gelegt werden. Außerdem ist die Zahl der vorliegenden Studien zu dieser Thematik derzeit noch begrenzt; in [12] konnten beispielsweise nur 107 experimentelle und 31 epidemiologische Studien einbezogen werden.

5 Zusammenfassung, Handlungsbedarf und Ausblick

Für den Schutz von Personen in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern hat die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) Grenzwerte definiert, die auch den für 6G relevanten sub-THz-Bereich von 100 GHz bis 300 GHz abdecken. Das Grenzwertkonzept ist dabei mehrstufig und basiert auf Basisgrenzwerten, die direkte intrakorporale Wirkungen der EMF, d.h. eine Erwärmung von Körpergewebe adressieren, und daraus abgeleiteten Referenzwerten, die sich unter Feldbedingungen einfacher messen lassen als die Basisgrenzwerte.

Für den sub-THz-Frequenzbereich sind die Basisgrenzwerte als Ganzkörper-SAR zur Begrenzung einer Erhöhung der Körperkerntemperatur und zusätzlich als absorbierte Leistungsflussdichten zur Begrenzung lokaler Erwärmungen definiert. Beides sind Größen, die sich einer direkten Messung unter Feldbedingungen entziehen und nur durch numerische Simulationsverfahren und ggf. unter Laborbedingungen messtechnisch erfassbar sind.

Die Referenzwerte für Ganzkörperexposition und lokale Exposition beziehen sich auf einfallende Leistungsflussdichten, die jeweils über unterschiedliche Körperbereiche zu mitteln sind. Befindet sich die exponierte Person im Fernfeld der Strahlungsquelle, kann anstatt der einfallenden Leistungsflussdichte auch die äquivalente Leistungsflussdichte ebener Wellen angewendet werden, und eine Messung der elektrischen Feldstärke alleine ist hinreichend. Im reaktiven Nahfeld hingegen ist im sub-THz-Frequenzbereich eine Überprüfung der Konformität nur anhand der Basisgrenzwerte, also numerisch oder messtechnisch unter Laborbedingungen, möglich. In der Feldregion des strahlenden Nahfeldes wäre nach ICNIRP eine direkte Messung der einfallenden Leistungsflussdichte nötig, was aber an messtechnische Grenzen stößt, da die derzeit für Expositionsmessungen verfügbaren Messgeräte entweder nur die elektrische oder nur die magnetische Feldstärke messen, jedoch nicht die Leistungsflussdichte. Hier sind die Forschung und Entwicklung einer geeigneten Messtechnik erforderlich.

Weitere Teilaufgaben des vorliegenden 6GEM-Projektes befassen sich mit der Erforschung geeigneter Messtechniken und deren Anwendung im Labor und in Testfeldern sowie mit einem Vergleich der Gesamtexposition durch Basisstation und Endgerät in verschiedenen Netzkonzepten. Weiterhin wird untersucht, wie eine Erfassung und Bewertung der Exposition mit Hilfe numerischer Verfahren unter Verwendung eines räumlich hochaufgelösten digitalen Zwillings möglich sind [14].

Förderhinweis

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16KISK040 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Literatur

- [1] 6G-Forschungs-Hubs, <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/forschung/kommunikationssysteme/6g-forschungs-hubs>, (zugegriffen 11. Januar 2024)
- [2] 6GEM, Projektwebseite, <https://www.6gem.de/>, (zugegriffen 11. Januar 2024)
- [3] Förderbekanntmachung, <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-3528.html>, (zugegriffen 11. Januar 2024)
- [4] ICNIRP Guidelines 2020, „Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)“, Health Physics, vol. 118 no. 5, pp. 483-524, 2020.
- [5] J. Aschoff und R. Wever, „Kern und Schale im Wärmehaushalt des Menschen,“ Naturwissenschaften vol. 20, S. 477-487, 1958.
- [6] R. Vallauri, G. Bertin, B. Piovano und P. Gianola, „Electromagnetic field zones around an antenna for human exposure assessment: Evaluation of the human exposure to EMFs,“ IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 57, no. 5, S. 53-63, Oct. 2015, doi: 10.1109/MAP.2015.2474127.
- [7] M. Ziane, A. Boriskin und M. Zhadobov, „Temperature-mediated measurement of near-Field power density distribution induced by low-power mmWave close-to-body devices,“ in BioEM 2023 2nd Annual Conference of BioEM, Oxford, 2023.
- [8] M. Ziane und M. Zhadobov, „In-Phantom absorbed power density reconstruction based on free-space E-field vector measurement,“ in BioEM 2023 2nd Annual Conference of BioEM, Oxford, 2023.
- [9] T. Struck, L.-M. Schilling, C. Bornkessel und M. A. Hein, „Hybrid measurement and post-processing method for human RF exposure assessment of mobile radio small-cells,“ in 2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 2023, S. 1-5, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133468.
- [10] 26. BImSchV, „Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV)“, BGBl. Jg. 2013 Teil I Nr. 50, 21.08.2013.
- [11] Empfehlung des Rates 1999/519/EG zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz), Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 199/59, 30.07.1999.
- [12] K. Karipidis, R. Mate, D. Urban, R. Tinker und A. Wood, „5G mobile networks and health – a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz“, J Expo Sci Environ Epidemiol. 2021; 31(4): 585–605, doi: 10.1038/s41370-021-00297-6.
- [13] M. Simkó und M.O. Mattsson, „5G Wireless communication and health effects - a pragmatic review based on available studies regarding 6 to 100 GHz,“ Int J Environ Res Public Health. 2019;16:3406. doi: 10.3390/ijerph16183406.
- [14] L.-M. Schilling et al., „Herausforderungen bei der Erstellung eines digitalen Zwillings zur numerischen Immissionsbewertung von 5G- und 6G-Mobilfunkanlagen,“ in EMV 2024, Köln, 2024.