Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Elektromagnetische Felder des Mobilfunks im Zuge des aktuellen 5G-Netzausbaus Technische Aspekte und biologische Wirkungen im oberen Frequenzbereich (FR2, oberhalb von ca. 24 GHz)

Stellungnahme der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 339. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 27./28. Oktober 2025

Vorwort

In Deutschland wurde im Jahr 2019 mit der Einführung des Mobilfunks der fünften Generation (5G) begonnen. Dies ist die konsequente Weiterentwicklung der bisherigen digitalen zellulären Mobilfunksysteme 2G, 3G und 4G, welche alle mittels der Aussendung hochfrequenter elektromagnetischer Felder arbeiten. Der 5G-Mobilkommunikationsstandard bietet neue, über Sprachkommunikation und Breitband-Datenübertragung hinausgehende Möglichkeiten und wird daher als Kerntechnologie für die Digitalisierung der Industrie, automatisierte und vernetzte Verkehrssysteme, Internet der Dinge und viele andere technische Entwicklungen angesehen.

Vor dem Hintergrund der Einführung des 5G-Mobilfunks wurde die SSK vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit im April 2019 beauftragt, eine Gesamtbeurteilung der Wirkung elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf den Menschen, insbesondere auch im Vergleich zu den damals betriebenen Mobilfunknetzen, vorzunehmen und Forschungsbedarf zu identifizieren. Darüber hinaus sollten Hinweise und Empfehlungen insbesondere zur Minimierung der Exposition der Bevölkerung und zur regulativen Behandlung von Mobilfunknetzen bzgl. der Exposition der Bevölkerung erarbeitet werden.

Zur Erfüllung dieses Beratungsauftrages bildete die Strahlenschutzkommission eine dem Ausschuss „Nichtionisierende Strahlen“ zuarbeitende Arbeitsgruppe, der folgende Mitglieder angehörten:

- Dr. Christian Bornkessel, Technische Universität Ilmenau
- Prof. Dr. Heidi Danker-Hopfe, Charité – Universitätsmedizin Berlin
- PD Dr. Thomas Kleine-Ostmann, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
- Prof. Dr. Mats-Olof Mattsson, SciProof International; Strömstad Akademi (S)
- Prof. Dr. Martin Röösli, Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut, Allschwil (CH)
- Dr. Gernot Schmid, Seibersdorf Labor GmbH (A)
- Prof. Dr. Myrtill Simkó, SciProof International; Strömstad Akademi (S)
- Prof. Dr. Matthias Wuschek, Technische Hochschule Deggendorf.

Die SSK dankt dem BfS für die Bereitstellung umfangreicher Fachinformationen und fachlicher Unterstützung.

Prof. Dr. Matthias Wuschek	*Dr. Beate Volkmer*	*Prof. Dr. Ursula Nestle*
Vorsitzender der Arbeitsgruppe „EMF und 5G-Mobilfunknetze“	Vorsitzende des Ausschusses „Nichtionisierende Strahlen“	Vorsitzende der Strahlenschutzkommission

INHALT

1 Einleitung 5

2 Stellungnahme der SSK 6

3 Wissenschaftliche Begründung zu Technik und Regulierung 11

3.1 Technische Aspekte der 5G-Technologie im FR2 11

3.1.1 Wellenausbreitung (FR2 im Vergleich zu FR1) 11

3.1.2 Mögliche typische Einsatzszenarien 15

3.1.3 Allgemeine technische Parameter, Antennen 17

3.1.4 Abschätzung von Immissionen und Expositionen (Messung, Simulation) . 19

3.2 Physikalische Wechselwirkungsmechanismen 20

3.3 Aktuelle Empfehlungen der ICNIRP 22

3.4 Überprüfung von Endgeräten hinsichtlich der Übereinstimmung mit den Referenz- und Basisgrenzwerten 23

3.5 Rechtliche Regelungen zum Schutz vor Hochfrequenzimmissionen durch Mobilfunkbasisstationen 25

3.5.1 Relevante Rechtsvorschriften für Anlagen ab 10 W EIRP 25

3.5.2 Grenzwertvorgaben der 26. BImSchV 25

3.5.3 Regelungen für Anlagen unter 10 W EIRP 26

3.5.4 Genehmigung und Kontrolle von ortsfesten Funkanlagen 26

3.6 Zusammenfassende Beurteilung der technischen und regulatorischen Aspekte der 5G-Technologie im Frequenzbereich FR2 29

3.7 Offene Fragen und Forschungsbedarf 30

4 Wissenschaftliche Begründung zu biologischen und gesundheitlichen Wirkungen 32

4.1 Stellungnahmen und Reviews zum Thema 33

4.1.1 Reviews zu biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von Expositionen im FR2-Frequenzbereich 33

4.1.2 Stellungnahmen von Expertengremien mit offiziellem Mandat und von Behörden zu biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von Expositionen im FR2-Frequenzbereich 39

4.2 Epidemiologie 42

4.3 Experimentelle Humanstudien 44

4.3.1 Studien zur Wahrnehmung von Feldern 44

4.3.2 Studien zu Schwellenwerten für thermischen Schmerz 45

4.3.3 (Weitere) Studien zu kardiovaskulären Effekten 48

4.4 In-vivo-Studien 49

4.4.1 Thermische Wirkungen, insbesondere auf Haut und Auge 49

4.4.2 Andere Endpunkte 53

4.5 In-vitro-Studien 54
4.5.1 Genexpression 54
4.5.2 Andere Endpunkte 56
4.6 Zusammenfassende Beurteilung der biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen der 5G-Technologie im Frequenzbereich FR2 58
4.7 Offene Fragen und Forschungsbedarf 59
5 Literatur 60
6 Abkürzungsverzeichnis 74
7 Begriffserklärungen 77
Anhang 84
A-1 Tabellarische Zusammenstellung der experimentellen Humanstudien 84
A-2 Tabellarische Zusammenstellung der In-vivo-Studien 86
A-3 Tabellarische Zusammenstellung der In-vitro-Studien 91
A-4 EU-Studien unter Horizon Europe (CLUE-H) 93

1 Einleitung

Die SSK wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit im April 2019 beauftragt, eine Gesamtbeurteilung der Wirkung elektromagnetischer Felder des Mobilfunks auf den Menschen, insbesondere auch im Vergleich zu den damals betriebenen Mobilfunknetzen, vorzunehmen und Forschungsbedarf zu identifizieren. Darüber hinaus sollten Hinweise und Empfehlungen insbesondere zur Minimierung der Exposition der Bevölkerung und zur regulativen Behandlung von Mobilfunknetzen bzgl. der Exposition der Bevölkerung erarbeitet werden.

Unter anderem nach Begutachtung der Resultate des Deutschen Mobilfunkforschungsprogramms (DMF) stellte die SSK in ihrer Stellungnahme aus dem Jahr 2011 („Biologische Auswirkungen des Mobilfunks – Gesamtschau –"; SSK 2011) fest, dass sich auch durch damals aktuelle Forschungsergebnisse keine neuen Hinweise auf bis dahin noch nicht bedachte gesundheitliche Auswirkungen durch die hochfrequenten Felder des Mobilfunks ergaben, so dass die den bestehenden Grenzwerten zugrundeliegenden Schutzkonzepte nicht in Frage zu stellen waren.

Allerdings wurde auch angemerkt, dass die Gesamtproblematik der biologisch-gesundheitlichen Auswirkungen der Felder des Mobilfunks nicht endgültig geklärt werden konnte, sondern noch weiterer Forschungsbedarf gesehen wurde. Zudem wurde festgestellt, dass aufgrund der weiterhin dynamischen Entwicklung neuer Funktechnologien und der Nutzung neuer Frequenzen und Übertragungsverfahren eine begleitende Forschung, Immissionskontrolle und Expositionsbeurteilung sinnvoll erschien.

In den Spezifikationen des 5G-Mobilfunks wird für die Übertragung der Funksignale zwischen zwei deutlich unterschiedlichen Frequenzbereichen FR1 (ca. 0,4 GHz bis 7 GHz) und FR2 (ca. 24 GHz bis 71 GHz, „Millimeterwellen") unterschieden. In FR2 steht somit mehr Übertragungsbandbreite zur Verfügung. Da jedoch die potenzielle Reichweite einer Basisstation und das Eindringvermögen der Funkwellen in Gebäude mit zunehmender Sendefrequenz deutlich abnehmen, ist der Frequenzbereich FR2 für eine flächendeckende Versorgung größerer Gebiete über terrestrische Basisstationen – im Unterschied zum FR1 – kaum geeignet. Der Frequenzbereich FR2 findet stattdessen Anwendung für die Übertragung großer Datenmengen in lokal begrenzten Bereichen.

Da im Jahr 2019 die Frequenzbelegungspläne in diesem Frequenzbereich auf internationaler Ebene noch nicht finalisiert waren und damit auch die nationalen Vergabeverfahren noch nicht überall begonnen hatten, befand sich die Nutzung des FR2 für den 5G-Mobilfunk zu diesem Zeitpunkt noch in der Anfangsphase. Hingegen hatte der Aufbau von 5G-Netzen im Bereich FR1 im Jahr 2019 in Deutschland und anderen Ländern bereits begonnen.

Daher beschloss die eingesetzte Arbeitsgruppe zu Beginn ihrer Arbeit, aufgrund dieser zwei deutlich unterschiedlichen Entwicklungsfelder und -geschwindigkeiten der 5G-Technologie auch zwei getrennte Stellungnahmen zu erarbeiten. Ein erstes Dokument, welches im Dezember 2021 von der SSK verabschiedet und im März 2022 veröffentlicht wurde (SSK 2021), befasste sich nur mit den technischen, biologischen und gesundheitlichen Aspekten des 5G-Mobilfunks im damals bereits seit langem intensiv für die Mobilkommunikation genutzten Frequenzbereich bis etwa 7 GHz (FR1). Die Bewertung der 5G-Technologie für den zukünftig gegebenenfalls intensiver genutzten Millimeterwellenbereich (FR2) wurde – insbesondere auch wegen der im Jahr 2019 noch nicht absehbaren Nutzungsszenarien – auf die Zeit nach Fertigstellung der ersten Stellungnahme verschoben.

Die hier nun vorliegende Bewertung der 5G-Technologie im Frequenzbereich FR2 ist eine Ergänzung zur ersten Stellungnahme. Somit sind die Teile 1 und 2 der Stellungnahme als ein zusammenhängendes Dokument zu verstehen.

Auch im zweiten Teil der Stellungnahme erfolgt eine Beschreibung und Bewertung des aktuellen Standes der Forschung auf dem Gebiet der biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von hochfrequenten Feldern im hier nun relevanten Frequenzbereich von 24 bis 71 GHz.

Zunächst werden im ersten Teil der Wissenschaftlichen Begründung der Stellungnahme (Kapitel 3) physikalische Besonderheiten sowie wichtige immissions- und expositionsrelevante technische Parameter von 5G-Mobilfunksystemen im Frequenzbereich FR2 vorgestellt. Näher behandelt werden zudem die physikalischen Wechselwirkungen zwischen Hochfrequenzfeldern im Millimeterwellenlängenbereich und dem menschlichen Körper sowie die aktuell geltenden rechtlichen Regularien zum Schutz der Bevölkerung vor den Wirkungen hochfrequenter Felder.

Im zweiten Teil der Wissenschaftlichen Begründung der Stellungnahme (Kapitel 4) erfolgt eine Beschreibung und Bewertung des Standes der Forschung zu biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen hochfrequenter Felder des Mobilfunks im Frequenzbereich FR2.

Wirkungen hochfrequenter Felder des Mobilfunks auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate (z. B. Herzschrittmacher, Defibrillatoren) sind nicht Gegenstand der vorliegenden Stellungnahme, da Fragestellungen auf diesem Gebiet zum (technischen) Fachgebiet der Betriebssicherheit von elektrischen und elektronischen Geräten in elektromagnetischen Feldern bzw. allgemein zur Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) von Anlagen und Geräten zu zählen sind. Die Strahlenschutzkommission ist der Auffassung, dass eine Betrachtung dieser komplexen Thematik im Rahmen der technischen Standardisierung von elektrisch oder elektronisch betriebenen Implantaten durchzuführen ist.

Ferner beschäftigt sich die vorliegende Stellungnahme ausschließlich mit gesundheitlichen Risiken für den Menschen, nicht aber mit Risiken für dessen Umwelt (Flora und Fauna).

Hinweis zur Erläuterung von Fachbegriffen in den folgenden Kapiteln:

Naturgemäß finden sich in einem derartigen Dokument eine Vielzahl an technischen, biologischen und medizinischen Fachbegriffen. Diese werden in der wissenschaftlichen Begründung der Stellungnahme (Kapitel 3 und 4) bzw. in Kapitel 7 „Begriffserklärungen“ näher erläutert. In Kapitel 2 wird allerdings auf eine nochmalige Erläuterung der Fachbegriffe verzichtet.

2 Stellungnahme der SSK

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit sollte die Strahlenschutzkommission (SSK) beurteilen, ob aus aktueller Sicht der Forschung die Grundlagen, auf denen die in Deutschland geltenden Grenzwerte für Hochfrequenzimmissionen (Sendeanlagen und Endgeräte) basieren, weiterhin uneingeschränkt Gültigkeit besitzen. Auslöser für diesen Auftrag war der Start des 5G-Mobilfunknetzausbaus in Deutschland im Jahr 2019.

Im Dezember 2021 wurde der erste Teil der Stellungnahme durch die Strahlenschutzkommission verabschiedet, der sich zunächst nur mit den technischen, biologischen und gesundheitlichen Aspekten von Hochfrequenzfeldern im aktuell intensiv für die Mobilkommunikation genutzten Frequenzbereich bis etwa 7 GHz (FR1) beschäftigt. Diesen nutzen auch die Anlagen der aktuell deutschlandweit in Betrieb befindlichen 5G-Netze.

Wegen zu diesem Zeitpunkt kaum vorhandenen Anwendungen wurde entschieden, die Bewertung des Millimeterwellenbereichs oberhalb ca. 24 GHz (FR2) in einer separaten Stellungnahme der SSK vorzunehmen. Diese liegt nun mit diesem Dokument vor.

Bezüglich der **technischen Aspekte** des 5G-Mobilfunks im Frequenzbereich FR2 (Kapitel 3 dieses Dokuments) identifiziert die SSK folgende relevante Unterschiede zum Frequenzbereich FR1 und nimmt zusammenfassend wie folgt Stellung:

- Der FR2 weist grundsätzlich stärkere Übertragungsdämpfungen auf als der FR1. Dadurch sinkt die maximal mögliche Übertragungsdistanz, und eine gerichtete Abstrahlung der verwendeten Antennen ist zwingend erforderlich. Daher wird der FR2 vorwiegend für die Innenraumkommunikation oder für fest installierte bzw. Line-of-Sight (LoS)-Übertragungsstrecken im Außenbereich mit zum Teil hohen Datenraten verwendet.
- Noch deutlicher als im Frequenzbereich FR1 kann mittels Beamforming-Antennen im Frequenzbereich FR2 die verfügbare Sendeleistung selektiv und bedarfsorientiert auf bestimmte Bereiche konzentriert werden. Dies bedeutet, dass eine Zunahme der Immission vor allem dort zu erwarten ist, wo eine große Dichte an aktiven Endgeräten besteht. In anderen örtlichen Bereichen, die nicht durch Beams erfasst werden, wird die mittlere Immission hingegen im Vergleich zu einer statischen Ausleuchtung geringer sein.
- Wie bei 5G im FR1 ist auch im FR2 die vom 5G-System permanent in die Funkzelle abgestrahlte Always-on-Signalisierungsleistung, also der Anteil der Gesamtleistung, der u. a. zum Zweck der Signalisierung und zur Synchronisierung der Endgeräte permanent abgestrahlt wird, deutlich kleiner als bei 2G/3G/4G. Dies führt insbesondere in Zeiten geringer Auslastung der Anlage zu einer im Vergleich zur maximal möglichen Immission noch niedrigeren Immission als bei den Vorgängertechnologien.
- Aufgrund der höheren in FR2 genutzten Frequenzen erfolgt die Strahlungsabsorption an der Körperoberfläche, sodass vor allem die Haut und die Cornea des Auges als potenzielle Zielgewebe für Schadwirkungen in Frage kommen. Die bekannten messtechnischen Verfahren zum Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte zum Schutz vor negativen gesundheitlichen Folgen von körpernah betriebenen Funksendegeräten müssen für Geräte mit Aussendungen in FR2 entsprechend erweitert bzw. angepasst werden. Dies erfolgt gegenwärtig bereits in internationalen Standardisierungsgremien.
- Grundsätzlich gelten in Deutschland bei 5G-Basisstationen im Frequenzbereich FR2 die gleichen rechtlichen Regelungen und Durchführungsvorschriften, wie es bei den bereits seit vielen Jahren in Betrieb befindlichen Mobilfunkanlagen im Frequenzbereich FR1 der Fall ist. Dies gilt sowohl für Anlagen mit mehr als 10 W EIRP als auch für leistungsschwächere Varianten mit weniger als 10 W EIRP.
- Allerdings besteht sowohl im Frequenzbereich FR1 als auch im Frequenzbereich FR2 die Möglichkeit des Betriebs von privaten 5G-Campusnetzen. Bei derartigen Netzen ist abzusehen, dass zusätzlicher Aufklärungsbedarf bei den Betreibern bezüglich der Verpflichtung zur Sicherstellung des Schutzes von Personen im Umfeld von Funkantennen notwendig ist, da diese Betreiber auf dem Gebiet der Sicherstellung des Gesundheitsschutzes bei Funkanlagen meist wenig erfahren sind.

Zum Stand der Forschung bezüglich **biologischer und gesundheitlicher Auswirkungen** hochfrequenter Felder im Frequenzbereich FR2 (Kapitel 4) nimmt die SSK wie folgt Stellung:

- Im Vergleich zum Frequenzbereich FR1 ist die Zahl der experimentellen Studien für den Frequenzbereich FR2 gering. Dies gilt insbesondere für humanexperimentelle Studien.
- Epidemiologische Studien im FR2 haben hauptsächlich die berufliche Radarexposition untersucht, zum Beispiel im Militär oder bei der Polizei. Dabei haben die meisten Studien unter besonderer Berücksichtigung der EMF-Exposition keine erhöhten Risiken für Erkrankungen wie Krebs gefunden. Die Studien sind aber wenig belastbar. Beispielsweise ist die Exposition in den meisten Studien nur unzureichend quantifiziert worden, oder mögliche Störgrößen (Confounder) wurden nur rudimentär oder gar nicht berücksichtigt.
- Humanexperimentelle Studien zeigen, dass die Wahrnehmungsschwelle für durch die hochfrequenten elektromagnetischen Felder (HF-EMF) verursachte Temperaturerhöhung an der Hautoberfläche im Frequenzbereich FR2 bei etwa 1 °C liegt.
- In zwei von drei verfügbaren Studien zum Schwellenwert für thermischen Schmerz wurde eine statistisch signifikant erhöhte Schmerzschwelle während einer 30-minütigen Exposition durch Millimeterwellen bei Feldstärken zum Teil oberhalb der Grenzwerte beobachtet. Insgesamt wurden bisher nur sehr kleine Stichproben mit innerhalb und zwischen den Studien variierenden Expositionsparametern untersucht.
- Die Mehrzahl der In-vitro-Studien und der tierexperimentellen In-vivo-Studien mit Expositionen im Millimeterwellenbereich haben biologische Reaktionen (meist als Folge der thermischen Einwirkungen) gezeigt. Daraus können jedoch keine Schlussfolgerungen hinsichtlich der biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von Expositionen im Frequenzbereich FR2 gezogen werden, da die Studien sehr heterogen sind und ihre Anzahl gering ist. Es gab keinen konsistenten Zusammenhang zwischen Leistungsdichte, Expositionsdauer oder -frequenz und den Auswirkungen der Exposition. Die verfügbaren In-vivo-Studien, die sich meist mit der Erwärmung der Haut und des Auges beschäftigten, liefern keine angemessenen und ausreichenden Informationen für eine sinnvolle, verlässliche Gefahreneinschätzung. Zudem liefern die Studien (in vivo und in vitro) keine ausreichenden Informationen für die Beantwortung der Frage nach dem Vorhandensein von gesundheitsrelevanten nicht-thermischen Wirkungen.

Die zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht belastbare Datenlage lässt gegenwärtig noch keine Schlussfolgerungen bezüglich möglicher gesundheitsrelevanter Auswirkungen einer Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder im FR2 unterhalb der in Deutschland geltenden Grenzwerte zu. Zusammenfassend lässt sich aber festhalten, dass die aktuell vorliegenden Daten nicht darauf hindeuten, dass es im FR2 andere potenziell negative biologische Wirkungen gibt als die, welche auf thermischen Effekten im Körpergewebe basieren und grundsätzlich bereits aus dem FR1 bekannt sind.

Angesichts einer zukünftig möglicherweise in Deutschland beginnenden Nutzung des Frequenzbereichs FR2 (siehe Abschnitt 3.1.2) und der derzeit unzureichenden Datenlage ist es notwendig, potenzielle Gesundheitsrisiken weiter zu untersuchen.

Aus den in dieser Stellungnahme diskutierten Aspekten ergeben sich folgende besonders relevante Themen, bei denen die Datenlage noch verbesserungswürdig erscheint, weshalb sie durch zukünftige Forschungsprojekte bearbeitet werden sollten (siehe dazu auch die entsprechenden Schlussfolgerungen in Kapitel 3 und 4):

- Aufgrund der in FR2 vorliegenden örtlichen Konzentration der Strahlungsabsorption in der Haut und der Cornea des Auges kommt der Detailkenntnis der Absorptionsvorgänge

besondere Bedeutung zu. Wenngleich zu diesem Fragenkomplex bereits Forschungsergebnisse vorliegen, erscheinen viele Detailfragen gegenwärtig noch offen. Die Beantwortung dieser Fragen erscheint insbesondere wegen der großen biologischen Variabilität der Haut entlang des menschlichen Körpers und Veränderungen aufgrund des Alterungsprozesses als sehr komplex. Gegenwärtige Grenzwertempfehlungen beruhen, unter Berücksichtigung von mehr oder weniger gut fundierten Sicherheitsfaktoren, auf numerischen Berechnungen unter Verwendung sehr einfacher planarer Schichtmodelle der Haut, ausschließlich im Hinblick auf thermische Effekte. Weitere systematische Untersuchungen unter Berücksichtigung der anatomisch-makroskopischen Feinstruktur der menschlichen Haut, z. B. Schweißdrüsen oder Haarfollikel (inkl. deren Variabilität und alterungsbedingten Veränderungen), zur Etablierung anatomisch ausreichend differenzierter Absorptionsmodelle könnten hier zu einer Weiterentwicklung der Grenzwertempfehlungen beitragen.

- Da derzeit in Deutschland lediglich einige wenige 5G-Testinstallationen im FR2-Frequenzbereich vorliegen, stammen die derzeit verfügbaren Immissionsdaten aus simulationsbasierten Abschätzungen oder aus Messungen in anderen Ländern. Es wird empfohlen, im Falle eines operativen Netzaufbaus von 5G-Sendeanlagen im Frequenzbereich FR2 in Deutschland diesen immissionsmesstechnisch zu begleiten und dabei z. B. auch die immissionsrelevanten Besonderheiten von strahlschwenkenden Antennen zu berücksichtigen.
- Betreiber von 5G-Campusnetzen sollten im Rahmen des Lizenzierungsverfahrens eingehend über ihre Pflichten zur Sicherstellung des Schutzes von Personen vor elektromagnetischen Feldern (Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierte Personen) informiert werden.
- Weiterführende Studien zu biologischen Wirkungen sollten in erster Linie Frequenzen des FR2 betreffen, die zukünftig zur Nutzung vorgesehen sind.
- Da viele Studien bezüglich der wissenschaftlichen Methodik qualitativ unzureichend sind oder zumindest erhebliche Schwachstellen aufweisen, müssen Konzeption und Durchführung künftiger Studien deutlich verbessert werden. Dies gilt sowohl für epidemiologische als auch für humanexperimentelle sowie insbesondere für In-vivo- und In-vitro-Studien.
- Humanexperimentelle Studien zu biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen: Diese sollten sich auf Effekte konzentrieren, die insbesondere über die Haut vermittelt werden, einschließlich der Auswirkungen auf Komponenten des Nerven- und Immunsystems.
- Beim Menschen und/oder in Tiermodellen: Analyse möglicher langfristiger Auswirkungen von Expositionen durch Frequenzen des FR2 auf das gesamte Nervensystem, die insbesondere über die Haut vermittelt werden (z. B. Verhalten, kognitive Leistungsfähigkeit, Neurophysiologie, Schmerzwahrnehmung).
- Tierexperimentelle Studien: Diese sollten die am stärksten exponierten Organe, insbesondere die Haut und die Augen untersuchen.
- In-vivo-/ In-vitro-Studien: Auswirkungen der FR2-Exposition auf die Hautflora, insbesondere auf die Mikroorganismen, die Teil des Immunsystems sind, sollten untersucht werden. Außerdem wird in diesem Zusammenhang empfohlen, die Immunantwort zu untersuchen.

- Studien an In-vitro-Modellen (Haut, Hornhaut sowie Bindehaut des Auges usw.) zu thermischen Effekten sollten gefördert werden.
- Zur Verbesserung der Datenlage besteht Forschungsbedarf zu möglichen nicht-thermischen Wirkmechanismen.

Zurzeit laufen vier EU-Projekte (ETAIN, GOLIAT, NextGEM und SEAWave, siehe Anhang A-4), von denen Antworten auf einige der offenen Fragen erwartet werden.

3 Wissenschaftliche Begründung zu Technik und Regulierung

In diesem ersten Teil der wissenschaftlichen Begründung werden zunächst wichtige immissions- und expositionsrelevante physikalisch-technische Parameter von 5G-Mobilfunksystemen im Frequenzbereich FR2 vorgestellt (z. B. allgemeine technische Parameter, Wellenausbreitung, physikalische Wechselwirkung mit dem menschlichen Körper). Dabei wird insbesondere auf die Gemeinsamkeiten und Unterschiede im Vergleich zu 5G-Systemen im Frequenzbereich FR1 eingegangen. Weiterhin finden sich hier Beispiele für typische Anwendungsszenarien von 5G im Frequenzbereich FR2. Zudem werden einige regulatorische Aspekte vorgestellt und diskutiert.

3.1 Technische Aspekte der 5G-Technologie im FR2

3.1.1 Wellenausbreitung (FR2 im Vergleich zu FR1)

Die Wellenausbreitung im Frequenzbereich FR2 erfolgt grundsätzlich nach den gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie im Frequenzbereich FR1 und lässt sich mit Hilfe der Maxwell-Gleichungen vollumfänglich beschreiben. Aufgrund der höheren Frequenzen (FR1: 410 MHz bis 7,125 GHz, FR2: 24,25 GHz bis 71 GHz) ergeben sich jedoch andere Ausbreitungseigenschaften. Die höheren Frequenzen *f* gehen mit kürzeren Wellenlängen $\lambda = c/f$ einher (FR1: 4,2 cm bis 73,2 cm, FR2: 4,2 mm bis 12,4 mm), wobei $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s die Geschwindigkeit ist, mit der sich die Funkwellen im freien Raum ausbreiten. Während es sich bei den Funkwellen im FR1 um Zentimeter- und Dezimeterwellen handelt, spricht man im FR2 häufig bereits von Millimeterwellen.

Bei Funkübertragung in der Nähe des Erdbodens breiten sich elektromagnetische Wellen nie ganz frei aus, sondern werden durch die Eigenschaften der Erdoberfläche und der Atmosphäre beeinflusst. Oberhalb von Frequenzen im Megahertzbereich und damit sowohl für die Frequenzen in FR1 als auch in FR2 stellt der Erdboden einen guten Reflektor dar. Bei der Wellenausbreitung wird zwischen Bodenwellen, die entlang der Erdoberfläche gebeugt werden und der Erdkrümmung folgen, und den Raumwellen unterschieden, die sich ohne Beugung am Boden ausbreiten (Unger 1994). In den vom Mobilfunk genutzten Frequenzbereichen FR1 und FR2 sind nur die Raumwellen von Bedeutung.

Die Dämpfung elektromagnetischer Wellen zwischen einem Sender und einem Empfänger im Freiraum steigt aufgrund der Verringerung der Leistungsdichte im Raum quadratisch mit dem Abstand. Zudem tritt der Effekt auf, dass mit zunehmender Frequenz die Wirkfläche der Empfangsantenne bei gleichbleibender Bündelungseigenschaft der Antenne (ausgedrückt durch den Antennengewinn, ein Zahlenfaktor, der meist im logarithmischen Maß, d. h. in Dezibel [dB], angegeben wird; vgl. Kapitel 7 „Antennengewinn“) abnimmt, was zu einer zusätzlichen Reduktion der dem Empfänger zugeführten Leistung führt. Diese beiden Effekte können nach der Friis-Formel als Freiraumdämpfung α_{dB} beschrieben werden. Es gilt:

$$\alpha_{\mathrm{dB}} = -10\,\lg\left(\frac{c}{4\pi r f}\right)^2 \approx -147.5\ \mathrm{dB} + 20\,\lg\left(\frac{r}{m}\cdot\frac{f}{Hz}\right).$$

Hierbei ist *c* die Lichtgeschwindigkeit, *f* die Frequenz und *r* die Distanz zwischen Sende- und Empfangsort. Während eine FR1-5G-Verbindung über 100 m bei 700 MHz eine Freiraumdämpfung von etwa 69 dB aufweist, hat diese Verbindung bei 3,6 GHz bereits eine Dämpfung von etwa 84 dB. Im FR2 bei 30 GHz ergibt sich eine Dämpfung von etwa 102 dB.

Um die hohe Dämpfung im FR2 zu überwinden, ist der Einsatz von Antennen mit einer hohen Richtwirkung und damit hohem Gewinn unumgänglich. Während in FR1 Antennen mit geringerem Gewinn eingesetzt werden (passive Sektorantennen) und Beamforming nur bei höheren Frequenzen (z. B. im 3,6 GHz-Band) erfolgt, müssen im FR2 Antennenarrays mit vielen Elementen verwendet werden, die dadurch einen entsprechend hohen Antennengewinn aufweisen. Üblicherweise sind hierzu im Array mehr als die derzeit im FR1 verwendeten 32 oder 64 Einzelantennen notwendig. Trotzdem bleibt die mögliche Übertragungsdistanz stärker beschränkt als in FR1, so dass der Frequenzbereich FR2 vorwiegend für die Übertragung großer Datenmengen über kurze Distanzen im Bereich von wenigen zehn Metern bis einigen 100 Metern verwendet wird.

Dementsprechend erfolgt im FR2 eine stärkere Bündelung der Strahlung. Typisch ist im FR2 gegenüber dem FR1 eine um etwa den Faktor fünf stärkere Bündelung der Abstrahlung, wodurch sich 3-dB-Strahlbreiten von nur wenigen Grad ergeben. Im FR1 weisen passive Sektorantennen einen typischen Gewinn zwischen 13 dBi und 18 dBi auf (zu „dBi“ vgl. Kapitel 7 „Antennengewinn“). Beamforming-Antennen im 3,6 GHz-Band besitzen typischerweise Gewinnwerte zwischen 23 dBi und 25 dBi. Die Antennengewinne im FR2 sind hingegen größer als 25 dBi.

Je höher die Frequenz, desto mehr wird bei der Wellenausbreitung eine strahlenoptische Betrachtung möglich. Aufgrund der deutlich höheren Frequenzen ergibt sich im FR2 bereits eine nahezu quasi-optische Wellenausbreitung. Während die Übertragung im FR1 weitgehend ungerichtet erfolgt, wird zwischen Sender und Empfänger im FR2 meist eine stark gerichtete Verbindung realisiert, die auf dem direkten Pfad (Line-of-Sight – LOS) oder auch auf einem indirekten Pfad mittels einer oder mehrerer Reflexionen an Objekten (Non Line-of-Sight – NLOS) erfolgen kann. Sowohl bei der Übertragung in FR1 als auch bei der stärker gerichteten Übertragung in FR2 kann es aufgrund von Mehrwegeausbreitung punktuell zu Signalschwächung durch destruktive Interferenz kommen (engl. Fading). Es gibt in der Mobilkommunikation allerdings auch Konzepte, die eine Mehrwegeübertragung positiv zur Steigerung der Übertragungskapazität nutzen (MIMO-Konzepte, vgl. Abschnitt 3.1.3).

Abgesehen von der notwendigerweise in FR2 stärker gerichteten Signalausbreitung unterscheidet sich die Wellenausbreitung in FR1 und FR2 auch hinsichtlich Reflexion, Transmission und Beugung bzw. Schattenwurf bei Objekten. Bedingt durch die kürzeren Wellenlängen in FR2 spielt Streuung tendenziell eine größere Rolle, da Strukturen von Objekten und Oberflächen (z. B. von Rauputz) Abmessungen im Bereich der Wellenlänge haben. Dies führt zu meist diffuser Reflexion an Oberflächen und einer tendenziell reduzierten Transmission durch Wände und Mauern im Vergleich zu niedrigeren Frequenzen (Possenti et al. 2023). Durch die starke Bündelung der Strahlung und dem im Vergleich zur starken Beugung bei niedrigeren Frequenzen räumlich klarer definierten Schattenwurf von Objekten kommt es häufiger zur Blockierung eines Ausbreitungspfades, z. B. wenn sich ein Objekt im Ausbreitungsstrahl befindet. Grundsätzlich ist der sogenannte Penetrationsverlust durch Hindernisse wie z. B. Gebäude und Bäume durch Reflexions- und Transmissionsverluste wesentlich höher als im FR1 und führt zu einer weiteren Reduktion der Reichweite. Der Penetrationsverlust hängt außer von der Signalfrequenz sowie der Struktur und Dicke des zu durchdringenden Materials stark von der elektrischen Leitfähigkeit und der Permittivität des Materials sowie von Einfallswinkel und Polarisation der elektromagnetischen Welle ab.

Als Konsequenz der oben genannten Ausbreitungseffekte bleiben im FR2 die abgestrahlten Felder von Sendern in Innenräumen im Wesentlichen auf diese beschränkt, so dass eine Versorgung mehrerer benachbarter Räume (wie z. B. bei WLAN-Netzen häufig der Fall) hier meist nicht möglich ist. Von Vorteil ist hingegen, dass sich unterschiedliche Netze, die beispielsweise

im gleichen Gebäude betrieben werden, weniger stark stören können. Sender, die sich außerhalb von Gebäuden befinden, können in den Innenräumen kaum oder gar nicht empfangen werden.

Tabelle 3.1 zeigt die zu erwartende Reichweite und die Gebäudeversorgung durch Sender im Außenbereich für FR1 und FR2 im Vergleich. Die gegebenenfalls dynamische Abschattung der Kommunikationsverbindung durch Objekte führt in FR2 zu besonders starken Pfadverlusten bis hin zu einer Unterbrechung der Verbindung. Diesen Effekten kann nur durch geeignete Beamforming-Algorithmen begegnet werden.

Tab. 3.1: Reichweite und Gebäudeversorgung bei 5G

	5G Ultra Highband FR2 26 GHz	**5G Highband FR1 3,5 GHz**	**5G Midband FR1 1,8 GHz**	**5G Lowband FR1 700 MHz**
Reichweite (typisch)	200 m	1 km	2 – 3 km	5 – 8 km
Gebäude-versorgung	Nicht	Schwer	Gut	Sehr gut

Insgesamt führt die Wechselwirkung mit Objekten im FR2 zu einer wesentlich größeren Empfangspegelvariation bei einer Änderung des Empfangsortes auf einer Skala von wenigen Metern als im FR1. Dieses mit dem englischen Ausdruck Shadowing bezeichnete Phänomen kann statistisch durch einen Shadowing-Verlust modelliert werden und muss im Linkbudget berücksichtigt werden. Es ist mit einer stärkeren Variabilität der Signalübertragung hinsichtlich des Empfangspegels aber auch hinsichtlich der dominierenden Ausbreitungspfade und der damit verbundenen Empfangsrichtungen (Angle of Arrival) zu rechnen.

Neben der Wechselwirkung mit Objekten spielt bei der Wellenausbreitung im FR2 auch die Absorption der Atmosphäre eine wichtige Rolle. Manche in der Atmosphäre vorhandenen Moleküle (relevant sind hier vor allem Sauerstoff O_2 und Wasserdampf H_2O) wechselwirken sehr stark mit der elektromagnetischen Strahlung. Dies führt zu Absorptionsresonanzen und damit zu einer erheblichen Zusatzdämpfung. Abbildung 3.1 zeigt die spezifische Dämpfung der Atmosphäre, wie sie von der Internationalen Fernmeldeunion (International Telecommunication Union – ITU) für Standardbedingungen berechnet wurde (ITU 2016). Zusätzlich zur Freiraumdämpfung führt das O_2-Molekül zu einem Dämpfungsmaximum bei ca. 60 GHz und das H_2O-Molekül zu einem luftfeuchteabhängigen Dämpfungsmaximum bei ca. 23 GHz.

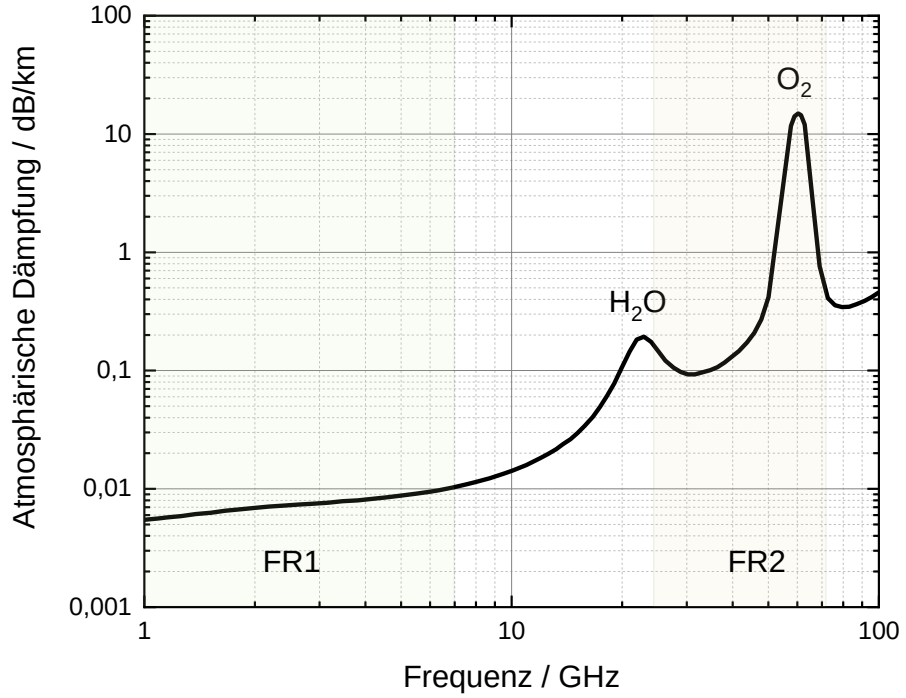

Abb. 3.1: Spezifische atmosphärische Zusatzdämpfung der Standardatmosphäre (Druck 1013,25 hPa, Temperatur 15 °C, absolute Luftfeuchtigkeit 7,5 g/m³), erstellt auf Basis der Daten von ITU (2016).

Erfolgt die Mobilkommunikation nicht ausschließlich innerhalb von Gebäuden, wird die Wellenausbreitung zudem durch Niederschlag beeinflusst. Hydrometeore wie Regentropfen, Schneeflocken und Hagel führen abhängig von der Niederschlagsrate zu einer erheblichen zusätzlichen Dämpfung. Mit Hilfe der ITU-Modelle für die Regendämpfung (ITU 2005) und für Nebel- und Wolkenpartikel (ITU 2019) lässt sich die zusätzliche spezifische Dämpfung in Abhängigkeit von Frequenz, Polarisation und Regenrate bestimmen. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft die zusätzliche Regendämpfung für horizontale Polarisation für vier verschiedene Niederschlagsraten (Moroder 2021).

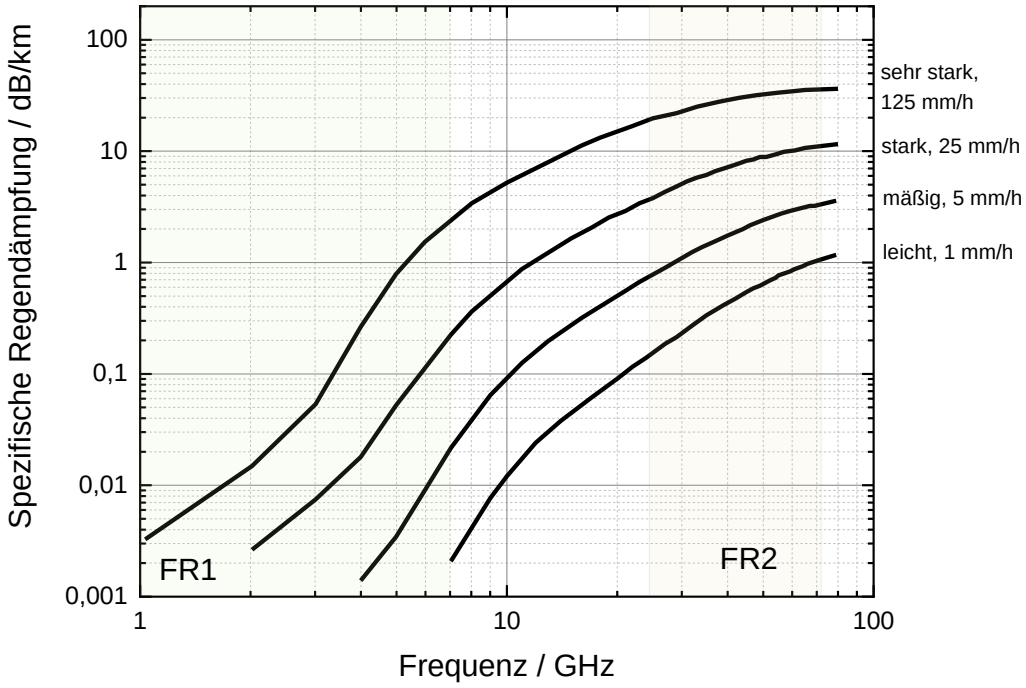

Abb. 3.2: Spezifische Regendämpfung für horizontale Polarisation in Abhängigkeit von der Niederschlagsrate gemäß ITU-R P.838-3 (ITU 2005), erstellt auf Basis der Daten von Moroder (2021).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der FR2 tendenziell stärkere Übertragungsdämpfung aufweist als der FR1 und damit die maximal mögliche Übertragungsdistanz sinkt. Für eine effiziente Funkverbindung ist eine gerichtete Abstrahlung der elektromagnetischen Wellen erforderlich. Aufgrund der Transmissionseigenschaften der Atmosphäre und der starken Wetterabhängigkeit der Übertragung ist der FR2 nur eingeschränkt für die Nutzung außerhalb von Innenräumen geeignet (vornehmlich bei vorhandener Sichtverbindung zwischen Sende- und Empfangsantennen).

3.1.2 Mögliche typische Einsatzszenarien

Gemäß der diskutierten Ausbreitungseigenschaften eignet sich 5G im Frequenzbereich FR2 nicht zur Verbesserung der allgemeinen großflächigen Netzabdeckung, da dafür die maximalen Reichweiten im Bereich einiger hundert Meter zu gering sind und eine Versorgung auch innerhalb von Gebäuden durch Sender außerhalb quasi ausgeschlossen ist. Stattdessen bietet sich die Nutzung des Frequenzbereiches FR2 als Ergänzung zur allgemeinen Netzabdeckung in Anwendungsfällen an, bei denen besonders hohe Bandbreiteanforderungen bestehen. So sind derzeit im Frequenzbereich 24,25 GHz bis 27,5 GHz durch Zuteilungsverfahren der Bundesnetzagentur Bandbreiten bis 800 MHz verfügbar. Im Folgenden einige mögliche Anwendungsbeispiele:

Fixed Wireless Access (FWA)

Fixed Wireless Access (FWA) wird auch als „Funk-DSL“ bezeichnet und beschreibt die drahtlose Anbindung eines Haushaltes oder eines kleineren Unternehmens an das Festnetz, um auf einen Glasfaser-, Kabel- oder konventionellen DSL-Anschluss verzichten zu können. Bereits

bei 4G LTE wurden Lösungen mit 50 MBit/s oder sogar mehreren 100 Mbit/s angeboten, beispielsweise in Ortschaften, in denen keine oder nur eine schlechte DSL-Anbindung verfügbar war. 5G FR2 wird für die Anbindung von Nutzenden mit Datenraten im Gbit/s-Bereich in Erwägung gezogen und bereits getestet. Dabei kommt speziell für diesen Anwendungszweck entwickelte Hardware zum Einsatz (Customer Premises Equipment – CPE).

Indoor-Kommunikation

Bei entsprechendem Bandbreitenbedarf ist die Versorgung der Innenräume von Gebäuden mit 5G im FR2 denkbar. Der Vorteil besteht darin, dass genutzte Frequenzen in angrenzenden Gebäuden problemlos wiederverwendet werden können. Allerdings steht die 5G-Versorgung in Konkurrenz zu WLAN-Lösungen, die z. B. ab Wi-Fi 7 (IEEE-Standard 802.11be) viele der 5G-Funktionalitäten wie Handover zwischen Zugangspunkten und Massive MIMO bei sehr hohen Datenraten im Gbit/s-Bereich bieten und vermutlich kostengünstiger und einfacher realisiert werden können, da die Administration selbstständig ohne Netzbetreiber oder Installation eines Campusnetzes erfolgen kann.

Backhauling

Unter Backhauling versteht man die Anbindung eines untergeordneten Netzwerkknotens, zum Beispiel einer 5G-Mobilfunkbasisstation, an das Kommunikationskernnetz. Solche Verbindungen werden traditionell mit einer Richtfunkverbindung im Mikrowellenbereich realisiert, wenn eine Glasfaseranbindung schwierig oder nicht möglich ist. Die Realisierung im 5G-Standard im Frequenzbereich FR2 ermöglicht die einfache und flexible Inbetriebnahme solcher Richtfunkstrecken als integraler Teil des 5G-Netzes. Die Anbindung erfolgt über präzise aufeinander ausgerichtete Hochgewinnantennen und ermöglicht Datenraten im Gbit/s-Bereich über Entfernungen bis zu einigen Kilometern.

Industrieautomatisierung

Im Rahmen der Digitalisierung der industriellen Produktion (*Industrie 4.0*) ist die flexible Vernetzung sehr vieler Geräte und Werkzeuge, Sensoren und Produkte erforderlich, an die z. T. Echtzeit-Anforderungen mit geringer Latenzzeit gestellt werden. Sind große Datenraten erforderlich (z. B. bei Anwendungen der virtuellen Realität in der Produktion), so ist gegebenenfalls die Verwendung des FR2 erforderlich.

Kleinzellen (Small Cells)

Unter Kleinzellen (Small Cells) werden mit geringer Sendeleistung betriebene Funkzellen verstanden, deren Reichweite nur wenige zehn bis einige hundert Meter beträgt. Sie kommen zum Einsatz, um die Kapazität von Mobilfunknetzen in stark von Personen frequentierten Bereichen zu vergrößern. Dabei ist einerseits der Einsatz in urbanen Gegenden mit vielen Netzteilnehmern denkbar (Street Level Small Cells), bei dem die Basisstation in z. T. bereits existierenden „Straßenmöbeln“ (z. B. Reklametafeln oder Litfaßsäulen) und an Straßenlaternen untergebracht werden kann. Andererseits ist auch der Einsatz an Orten denkbar, an denen viele Menschen zusammenkommen, z. B. an Flughäfen und Bahnhöfen, in Fußballstadien und bei Messe- und Veranstaltungszentren. Gegebenenfalls stellt der Einbau in direkt zugängliche Installationen eine Herausforderung hinsichtlich der Einhaltung von Personenschutzgrenzwerten dar, dem durch bauliche Maßnahmen (z. B. Einbau nur ab einer bestimmten Höhe) begegnet werden muss.

Vernetzung von Fahrzeugen

Die Vernetzung von Fahrzeugen schreitet stetig voran und ermöglicht neue Funktionalitäten, insbesondere im Bereich der Sicherheit und letztendlich auch das automatisierte und vernetzte Fahren. Bei der Realisierung von Funkverbindungen zwischen Fahrzeugen und Straßeninfrastruktureinrichtungen stehen WLAN- und mobilfunknetzbasierte Lösungen (Cellular V2X) in direkter Konkurrenz. Sind bei der Übertragung sehr hohe Datenraten erforderlich, so ist auch die Nutzung des FR2 zu erwarten.

E-Health

Im medizinischen Bereich sind für einige Anwendungen wie z. B. Teleoperationen sehr hohe Datenraten mit hohen Latenzanforderungen verknüpft. In anderen Bereichen (z. B. mobile MRT und Computertomographie) fallen sehr große Datenmengen an, die schnell und sicher übertragen werden sollen. In diesen Fällen ist der Einsatz von FR2 Basisstationen plausibel.

3.1.3 Allgemeine technische Parameter, Antennen

In diesem Abschnitt werden, basierend auf den Ausführungen in Abschnitt 3.1.1, wichtige immissionsrelevante Parameter zusammengefasst; die Diskussion ihrer Auswirkungen auf Immission und Exposition erfolgt im nächsten Abschnitt. Die immissionsrelevanten Parameter umfassen dabei die folgenden Punkte:

- Frequenzen,
- Antennen und Abstrahlcharakteristik,
- Sende- und Strahlungsleistungen,
- Netzausbau.

Frequenzen

Der Frequenzbereich bei FR2 erstreckt sich von 24,25 GHz bis 71 GHz. Dies entspricht Freiraumwellenlängen von 4,2 mm bis 12,4 mm, weswegen man bei FR2 auch vom „Millimeterwellenbereich“ spricht. Die gegenüber dem Frequenzbereich FR1 wesentlich höheren Frequenzen sind mit einer deutlich geringeren Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen in Körpergewebe verbunden; die Eindringtiefe ist diejenige Tiefe im Gewebe, bei dem die elektrische Feldstärke auf ca. 37 % des Wertes an der Oberfläche abgefallen ist. ICNIRP (2020) beziffert die Eindringtiefe in menschliches Hautgewebe bei 6 GHz auf 8,1 mm, bei 30 GHz auf nur noch 0,92 mm und bei 60 GHz auf 0,49 mm. Auf den Umstand geringer Eindringtiefen im Millimeterwellenbereich wird in Abschnitt 3.2 noch detailliert eingegangen.

Der Frequenzbereich oberhalb von 20 GHz bis 100 GHz wird bereits heute von zahlreichen Funkanwendungen verwendet. Zu nennen sind hier beispielsweise Funkdienste über Satelliten, militärische Funkanwendungen, Richtfunkdienste, Funkanwendungen geringer Reichweite, Betriebsfunk und Amateurfunk. Relevanz für die Exposition der Allgemeinbevölkerung haben insbesondere Ganzkörperscanner an Flughäfen (oberhalb von 10 GHz, z. B. Geräte eines Herstellers bei 70-80 GHz) sowie Radaranwendungen im Verkehrs- und Automobilbereich (Frequenzbereiche um 24 GHz, 77 GHz und 96 GHz).

Im Frequenzbereich FR2 werden bei 5G dieselben Zugriffs- und Modulationsverfahren wie im Frequenzbereich FR1 verwendet (Mehrträgerverfahren OFDMA mit digitaler Trägermodulation) (SSK 2021).

Antennen und Abstrahlcharakteristik

Ähnlich wie beim Frequenzbereich FR1 oberhalb etwa 3 GHz können im Frequenzbereich FR2 so genannte Massive-MIMO-Antennen eingesetzt werden. Diese bestehen im FR2 aus bis zu mehreren Hundert Einzelelementen, die in Gruppen separat ansteuerbar sind und deswegen sowohl eine Strahlformung (Beamforming) bzw. Strahlbündelung, als auch eine Strahlschwenkung ermöglichen. Aufgrund der höheren Elementeanzahl erfolgt im FR2 eine sehr viel stärkere Bündelung als im FR1, was zumindest zur teilweisen Kompensation der höheren Freiraumdämpfung nötig ist. Während Beamforming im 3,6 GHz-Band typischerweise zu Antennengewinnen von 23 dBi bis 25 dBi führt, sind die Antennengewinne in FR2 mit bis zu 32 dBi (Törnevik 2023) deutlich größer. Dadurch ergeben sich schmalere Strahlbreiten der abgestrahlten Beams mit beispielsweise etwa 4° (horizontal) und 12° (vertikal) bei einer Antenne mit 32 dBi Gewinn (Törnevik 2023).

Ebenso wie bei Massive-MIMO-Antennen im FR1 wird das Abstrahldiagramm in einen Teil mit Signalisierungsdaten (Broadcast Beam) und einen Teil mit Verkehrsdaten (Traffic Beams) unterteilt. Während die Signalisierungsdaten in die gesamte Funkzelle abgestrahlt werden, um Endgeräten das Einbuchen ins Netz zu ermöglichen, werden die Traffic Beams dynamisch auf die Endgeräte ausgerichtet. Dabei können je nach Anzahl der Nutzer mehrere räumlich getrennte Beams gebildet werden. Derzeit sind beispielsweise von der Firma Ericsson Antennen im Einsatz (AIR 5322), die bis zu vier örtlich getrennte Beams mit jeweils zwei Polarisationen abstrahlen können (Törnevik 2023, Unger 2022).

Sofern am selben Standort eine FR2-5G-Antenne zusammen mit einer FR1-Antenne für dieselbe Funkzelle verwendet wird, kann die Signalisierungsinformation auch alleine über die FR1-Antenne abgestrahlt werden (Walther 2022); der Signalisierungsanteil über FR2 entfällt. Dies erschwert eine messtechnische Erfassung der maximal möglichen Immission basierend auf den Signalisierungsinformationen deutlich.

Sende- und Strahlungsleistungen

Massive-MIMO-Antennen für FR2 werden beispielsweise von den Systemtechnikherstellern Ericsson, Nokia und Huawei angeboten. Die Sendeleistung bei FR2 bewegt sich hierbei in einem Bereich von etwa 0,5 W bis 3 W entsprechend 27 dBm bis 35 dBm; die Gewinne erreichen je nach Konfiguration der Antenne bis zu 32 dBi. Die sich aus dem Produkt von Sendeleistung und Antennengewinn ergebende Strahlungsleistung (EIRP) liegt nach Aussagen der Hersteller maximal zwischen 52 dBm und 68 dBm (Törnevik 2023).

Aufgrund der wesentlich geringeren Sendeleistung (0,5 bis 3 W) im Vergleich zu Massive-MIMO-Antennen im Frequenzbereich FR1 (Sendeleistung bis zu 200 W) ergeben sich trotz der bis zu 7 dB höheren Gewinne (Faktor 5) deutlich geringere Strahlungsleistungen (EIRP, 78 dBm für FR1 mit einer Sendeleistung von 200 W und einem Gewinn von 25 dBi im Vergleich zu maximal 68 dBm in FR2).

Netzausbau

In Deutschland gibt es derzeit keine kommerziellen Mobilfunknetze bei 5G im FR2. Einzelne Netzbetreiber unterhalten kleinräumige Testnetze; ein Beispiel ist Vodafone mit der Red Bull Arena in Leipzig im Frequenzbereich zwischen 26,7 GHz und 27,5 GHz mit einer Bandbreite von 800 MHz.

Kommerzielle Netze im Frequenzbereich FR2 werden u. a. in Australien, Singapur, Japan, Indien, Italien und den USA betrieben.

3.1.4 Abschätzung von Immissionen und Expositionen (Messung, Simulation)

Informationen zur maximal möglichen Immission und sich daraus ergebenden Sicherheitsabständen können aus den Angaben zur maximalen Strahlungsleistung theoretisch abgeschätzt oder gemessen werden. Sie sind in Deutschland für eine immissionsrechtliche Überwachung der Anlagen bzw. für die Erteilung der Standortbescheinigung relevant.

Aus der oben abgeleiteten maximalen EIRP von 68 dBm und einem gesetzlichen Grenzwert von 61 $V\,m^{-1}$ (entsprechend 10 $W\,m^{-2}$) lassen sich unter Freiraumbedingungen maximale Sicherheitsabstände in Hauptstrahlrichtung von etwa 7 m berechnen. Dieser Wert gilt für eine maximale Auslastung der Anlage und unter der Voraussetzung, dass ein Beam oder mehrere Beams mit maximalem Gewinn direkt auf den Messpunkt ausgerichtet ist bzw. sind.

Für die Antenne des Herstellers Ericsson AIR 5322 sind im Internet Testberichte verfügbar, in denen der Sicherheitsabstand für die Allgemeinbevölkerung und für den Arbeitsschutz in verschiedene Richtungen von der Antenne auf Basis der Antennendiagramme berechnet wurde (Ericsson 2021). Für eine EIRP von 62 dBm (nominal) beträgt der angegebene Sicherheitsabstand für die Allgemeinbevölkerung maximal etwa 4 m. Eigentlich wären aufgrund der um 6 dB geringeren EIRP gegenüber obigen auf Freiraumausbreitung basierendem Beispiel nur etwa 3,5 m zu erwarten. Der Unterschied ist darin begründet, dass die Berechnung seitens Ericsson Toleranzen berücksichtigt. Obwohl Ericsson bei der Berechnung auch die Verringerung der maximalen zeitlich gemittelten Sendeleistung aufgrund von TDD in die Rechnung einfließen lässt (Faktor 0,75 entsprechend -1,25 dB), ergibt sich wegen der berücksichtigten Toleranzen (2,4 dB entsprechend Faktor 1,74) insgesamt ein etwa 15 % größerer Abstand.

In Colombi et al. (2022) werden Messungen der maximalen Immission an zwei Basisstationen bei 28 GHz und 39 GHz mit je 50 dBm Strahlungsleistung in einem Testnetz beschrieben. Die in 10 m gemessenen Maximalwerte lagen unterhalb von 0,03 $W\,m^{-2}$, was einer Grenzwertausschöpfung von 0,3 % bezüglich der Leistungsdichte bzw. 5,5 % bezüglich der elektrischen Feldstärke entspricht.

Die Deutsche Telekom hat für einen Testaufbau die Immission bei einer durch ein Endgerät provozierten maximalen Auslastung der Anlage mit einem Spektrumanalysator gemessen: Bei Horizontalabständen zwischen Sendeanlage und Messpunkt zwischen 4 und 27 m resultierten in einer Messhöhe von 3,6 m elektrische Feldstärkewerte von weniger als 5 V/m bis 25 V/m; dies entspricht Grenzwertausschöpfungen zwischen 8 % und 41 % bezüglich der elektrischen Feldstärke.

Im Gegensatz zur zulassungsrelevanten maximal möglichen Immission ist die zeitlich gemittelte tatsächliche Immission an einem definierten Immissionsort in hohem Maße davon abhängig,

- ob und wie lange innerhalb eines normativen Sechs-Minuten-Zeitraums ein oder mehrere Traffic Beams auf den Immissionsort ausgerichtet werden und wie viele funktechnische Ressourcen (d. h. Frequenzträger und Zeiteinheiten) diesem Beam zugewiesen sind und
- wie viele Traffic Beams gleichzeitig in andere Richtungen ausgebildet werden.

Messungen der zeitlich gemittelten tatsächlichen Immission (hier über 30 Minuten gemittelt) wurden beispielsweise in einem „5G Smart Apartment“ in Australien in drei Nutzerszenarien durchgeführt (Wood 2023). Hierbei wurden Grenzwertausschöpfungen zwischen 0,00003 % und 0,0015 % bezüglich der Leistungsdichte festgestellt; dies entspricht Grenzwertausschöpfungen zwischen 0,05 % und 0,4 % bezüglich der elektrischen Feldstärke. In Liu et al. (2024) werden Messungen der elektromagnetischen Felder an jeweils fünf Messpunkten im

Umfeld (bis zu einem Abstand von 45 m) von drei 5G-Basisstationen im 28 GHz-Band in Tokio vorgestellt. Pro Messpunkt wurde sowohl ein Höhenscan von 10 cm bis 200 cm ohne künstlich erzeugten Datenverkehr durchgeführt, als auch Messungen bei konstanter Höhe (Höhe der maximalen Feldstärke beim Höhenscan) während einer Zeit von einer Minute bei provoziertem Datenverkehr durch ein Endgerät vorgenommen. Das Endgerät befand sich dabei 50 cm von der Messantenne entfernt und lud während der Messung eine 10 GB-Datei herunter. Die über 3 s gemittelten Ergebnisse des Höhenscans ohne provozierten Datenverkehr variieren je nach Höhe und Art der Antenne (Hornantenne oder omnidirektionale Antenne) zwischen etwa 55 und 94 dB(µV/m); dies entspricht elektrischen Feldstärken zwischen 0,0006 und 0,05 V/m bzw. Grenzwertausschöpfungen zwischen 0,0009 % und 0,08 %. Die über einer Minute gemittelten Werte bei provozierter Verkehrsauslastung durch das Endgerät erreichen maximal Werte bis etwa 118 dB ($\mu V\ m^{-1}$) entsprechend 0,79 $V\ m^{-1}$ oder 1,3 % Grenzwertausschöpfung.

Zahlreiche weitere Ergebnisse von Immissionsmessungen in kommerziellen Netzen und Testnetzen zu 5G FR2 finden sich auf einer interaktiven Internetseite der GSMA (GSMA 2025).

Fazit

Insgesamt ist – ähnlich wie bei 5G in FR1 – festzustellen, dass aufgrund von Beamforming die verfügbare Sendeleistung deutlich selektiver und bedarfsorientierter auf bestimmte Bereiche konzentriert werden kann, als dies bei den früheren Mobilfunktechniken der Fall war. Dies bedeutet, dass eine Zunahme der Immission vor allem dort zu erwarten ist, wo eine große Dichte an aktiven Endgeräten besteht. In anderen örtlichen Bereichen, die nicht durch Beams erfasst werden, wird die mittlere Immission hingegen im Vergleich zur statischen Ausleuchtung geringer sein. Insgesamt kommt es hier also zu einer Verschiebung der Immission im Vergleich zu konventionellen Mobilfunktechniken. Weiterhin ist – wie auch bei 5G im FR1 – zu beachten, dass die vom 5G-System permanent in die Zelle abgestrahlte Always-on-Signalisierungsleistung, also der Anteil der Gesamtleistung, der u. a. zum Zweck der Signalisierung und Synchronisierung der Endgeräte permanent abgestrahlt wird, um etwa den Faktor 10 kleiner gegenüber 3G/4G ist (SSK 2021). Dies führt insbesondere in Zeiten geringer Auslastung der Station zu einer im Vergleich zur maximal möglichen Immission noch niedrigeren Momentanimmission als bei den Vorgängertechnologien.

3.2 Physikalische Wechselwirkungsmechanismen

Aufgrund der im Vergleich zu FR1 deutlich höheren genutzten Frequenzen in FR2 ergeben sich auch deutliche Unterschiede der Absorptionsverteilung im menschlichen Körper. Während die Eindringtiefen in den menschlichen Körper bei FR1-Frequenzen noch im Bereich einiger Zentimeter liegen können, wird die in FR2 zum Einsatz kommende elektromagnetische Strahlung im Millimeterwellenbereich praktisch vollständig in den obersten Gewebeschichten (innerhalb weniger mm) absorbiert. Wechselwirkungen mit Millimeterwellen betreffen somit vor allem die Haut und die vorderen Bereiche der Augen (Cornea, Sklera, Konjunktiva). Die in diese Gewebe durch Strahlungsabsorption eingetragene Wärme ist einer Routinemessung am Menschen nicht zugänglich, sondern muss durch Simulationen und Experimente mit Körperphantomen bestimmt werden (Kazemipour et al. 2016). Letztere können innerhalb gewisser Grenzen zur Validierung der elektromagnetischen Simulationen herangezogen werden. Die Berechnung des Wärmeeintrags auf Basis elektromagnetischer Simulationen erfordert ein Modell des menschlichen Gewebes, das sowohl valide elektromagnetische (elektrische Leitfähigkeit und Permittivität) als auch thermische Eigenschaften (thermische Leitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, metabolische Wärmeerzeugung und Durchblutungswärmetransport in den beteiligten Geweben, sowie einen repräsentativen Wärmeübergangskoeffizienten zur Umgebung) enthält.

Die geringe Eindringtiefe der elektromagnetischen Strahlung impliziert, dass vereinfachte Teilkörpermodelle z. B. von Haut und Auge verwendet werden können und nicht der vollständige menschliche Körper mit seinen zahlreichen unterschiedlichen Gewebetypen in einem detaillierten Voxelmodell diskretisiert werden muss. Die elektrischen und thermischen Parameter sind in Online-Datenbanken verfügbar (Andreuccetti et al. 1997, Hasgall et al. 2022), aber nicht frei von Unsicherheiten. Theoretische Arbeiten im Frequenzbereich 100 GHz bis 1 THz mit parametrischer Modellierung der natürlichen Variabilität in Struktur und Zusammensetzung des Gewebes zeigten für ein stark vereinfachtes planares Gewebeschichtmodell und unter Verwendung statistischer Methoden einen großen Einfluss der Gewebestruktur- und Zusammensetzung auf die resultierende Absorption und Gewebeerwärmung (Zilberti et al. 2014, Zilberti et al. 2015). Dieser grundlegende Befund wurde in neueren Arbeiten auch für den hier interessierenden Frequenzbereich (FR2) bestätigt. Insbesondere ist eine realistische Modellierung der unterschiedlichen Hautschichten in den Berechnungsmodellen erforderlich, um die Absorptionseigenschaften zuverlässig abbilden zu können. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass die Vernachlässigung der Hornschicht (Stratum Corneum) zu einer Unterschätzung der im Gewebe absorbierten Strahlungsleistung führen kann, da das Stratum Corneum als „Matching Layer“ für die einfallende Welle und damit zu einem deutlich höheren Transmissionsfaktor führen kann, als dies für ein Hautmodell ohne Hornschicht der Fall wäre (Christ et al. 2020b, Christ et al. 2021). Aufgrund des geringen Wassergehalts, dem dadurch begründeten geringen Verlustfaktor und der im Vergleich zur Eindringtiefe (ca. 0,4 – 0,5 mm) geringen Dicke des Stratum Corneum (typ. < 0,04 mm an > 95% der Körperoberfläche), wird im Stratum Corneum selbst nur vergleichsweise wenig Strahlung absorbiert. Der Hauptanteil der Strahlungsabsorption liegt in der Epidermis und Dermis.

Die numerische Berechnung der resultierenden Gewebeerwärmung gliedert sich in einen zweistufigen Prozess, der zum einen die Lösung des elektromagnetischen Feldproblems der Wellenausbreitung im Gewebe und des damit verbundenen Leistungseintrags und zum anderen die Lösung des thermischen Problems durch Berechnung des Temperaturanstiegs unter Berücksichtigung des zeitlichen und räumlichen Wärmetransports beinhaltet. Die heute gängige Simulationstechnik behandelt das elektromagnetische und das thermische Feldproblem separat. In einem ersten (elektromagnetischen) Simulationslauf wird die spezifische Absorptionsrate (SAR) in jedem Voxel berechnet. Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung der Temperaturentwicklung im Inneren des modellierten Körpers mittels numerischer Lösung der Pennes'schen Biowärmegleichung (Bioheat Transfer Equation, BHTE), die in ihrem allgemeinsten Fall fünf Terme zur Beschreibung der folgenden Prozesse enthält: Wärmeleitung, Blut-Perfusionseffekt, metabolische Erwärmung, elektromagnetische Erwärmung und Wärmespeicherung. Das Produkt aus der zuvor berechneten SAR und der spezifischen Wärmekapazität wird dabei als elektromagnetischer Wärmequellterm für jedes Voxel in der BHTE abgebildet.

Im Hinblick auf die resultierende expositionsassoziierte Gewebetemperaturerhöhung im Menschen kommt dabei der im Berechnungsmodell angesetzten metabolischen Wärmeproduktion und der Blut-Perfusion maßgebliche Bedeutung zu, wobei vor allem letztere in der Realität, zumindest bei hohen Expositionsintensitäten, als dynamisch veränderlich anzusehen ist, was in den gegenwärtigen Berechnungsmodellen typischerweise nicht abgebildet werden kann. Die dadurch verbleibenden Unsicherheiten können jedoch durch Variationsanalysen der genannten Parameter quantifiziert werden.

Darüber hinaus kommt dem Wärmetransferkoeffizienten zwischen Hautoberfläche und der umgebenden Luft (in den Berechnungsmodellen zumeist als Randbedingung für die BHTE formuliert) große Bedeutung zu (variiert in der Realität in Abhängigkeit von Hautfeuchte, Kleidung, Behaarung, Konvektion etc.).

In Zusammenhang mit der zunehmenden Nutzung von höheren Frequenzen und der dadurch an der Körperoberfläche konzentrierten Absorption rückte in jüngster Zeit auch die Absorptionsanalyse in der Haut auf einer mikroskopischen Skala ins Zentrum von Forschungsprojekten. Dabei wurde zunächst anhand eines Mehrschichtmodells die Absorption in unterschiedlichen Schichten der Epidermis analysiert und darauf aufbauend die Absorptionsverteilung innerhalb von Epidermiszellen (Jerbic et al. 2023, Jerbic 2024). Es zeigt sich dabei, dass die Modellierung der Zellorganellen deutlichen Einfluss auf die Absorptionsverteilung innerhalb der Zelle hat (bei Berücksichtigung der Zellorganellen verschiebt sich das Absorptionsmaximum deutlich nach außen in Richtung der Zellenmembran). Allerdings erscheint der Einfluss der Berücksichtigung der Zellorganellen auf das Berechnungsergebnis im FR2 wenig ausgeprägt. Anzumerken ist auch, dass bezüglich der in den Berechnungen verwendeten Materialeigenschaften der mikroskopischen Zellenstrukturen große Unsicherheiten anzunehmen sind.

Zur Illustration der physikalischen Mechanismen bei sehr kleinen Organismen sei erwähnt, dass es seit einigen Jahren auch Arbeiten gibt, die sich beispielsweise mit der Absorption von hochfrequenter Strahlung in Insekten befassen, da die Tiere oder Teile davon von der Größe her im Resonanzbereich der Wellen liegen, was grundsätzlich die Absorption erhöhen kann. Die Ergebnisse von Arbeiten basierend auf numerischen Berechnungen mit 3D-Modellen unterschiedlicher Insekten-Spezies zeigen übereinstimmend, dass die Ganzkörperabsorption im FR2, je nach Größe der Insekten, deutlich (um mehr als einen Faktor 10) größer sein kann, als im FR1 (Herssens et al. 2022, Jeladze et al. 2023, Thielens et al. 2020, Überbacher et al. 2011). Die neueren Arbeiten deuten allerdings darauf hin, dass die Absorption zu einem großen Teil im Chitinpanzer der Tiere stattfindet (Jeladze et al. 2023). Die biologische Bedeutung dieser Sachverhalte in der Praxis ist jedoch unklar.

Die bekannten physikalischen Wirkungen und das spezifische Absorptionsverhalten von Millimeterwellen eröffnen eine Reihe von potenziellen therapeutischen Applikationen. Im Vordergrund stehen dabei in der Forschung Anwendungen im Zusammenhang mit Schmerztherapie, Entzündungen, Arthritis, Krebserkrankungen und Zusatzbehandlung bei Infektionen wie COVID-19 (Radzievsky et al. 1999, Jing et al. 2024). Die Bewertung der Evidenz für solche therapeutischen Wirkungen ist nicht Teil des Beratungsauftrags für die vorliegende Stellungnahme. Es ist zu beachten, dass die Höhe der Expositionen in diesen Studien im Allgemeinen deutlich höher liegen als solche, die bei Anwendungen im Mobilfunk auftreten können. Im Gegensatz zu klassischer Hyperthermie mit dem Ziel, tiefliegende Gewebe oder Organe mit von außen eingestrahlten hochfrequenten (typischerweise 13,56 MHz bis 2,45 GHz) elektromagnetischen Felden zu erwärmen, stellt sich bei Millimeterwellen eine therapeutisch potenziell nutzbare Gewebetemperaturerhöhung aufgrund der geringen Eindringtiefe nur in den obersten Gewebeschichten ein. Direkte therapeutische Wirkungen von Millimeterwellen in tiefliegenden Geweben oder Organen könnten jedoch mit endoskopischen Verfahren erzielt werden, indem die abstrahlende Antenne im Zielgewebe bzw. Zielorgan platziert wird.

3.3 Aktuelle Empfehlungen der ICNIRP

In den aktuellen Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) werden erstmals auch sehr detaillierte Betrachtungen im Hinblick auf die Absorptionsmechanismen im Zentimeter- und Millimeterwellenbereich angestellt. Aufgrund der Tatsache der fast ausschließlich oberflächlich (d. h. in den oberen Hautschichten) stattfindenden Absorption im Frequenzbereich oberhalb einiger GHz, ist die von ICNIRP empfohlene Begrenzung der lokalen Exposition (sowohl für berufliche Exposition als auch für die Allgemeinbevölkerung) im Frequenzbereich oberhalb von 6 GHz nicht in Form der maximalen

über 10 g Körpergewebe und über 6 Minuten Zeitintervalle gemittelten spezifischen Absorptionsrate ($SAR_{10\,g}$, gemessen in $W\,kg^{-1}$), sondern in Form der über 6 Minuten gemittelten absorbierten Leistungsdichte S_{ab} (in $W\,m^{-2}$), gemittelt über 4 cm^2 bzw. 1 cm^2 der Oberfläche (für Frequenzen > 30 GHz), festgelegt[1]. Aufgrund der oberflächennahen Absorption korreliert S_{ab} deutlich besser mit der im Gewebe verursachten Temperaturerhöhung als $SAR_{10\,g}$. Für sehr kurze (gepulste) Expositionen wurden in ICNIRP (2020) für den Frequenzbereich oberhalb von 6 GHz zusätzliche Basisgrenzwerte in Form von expositionszeitabhängigen Werten für die absorbierte Energiedichte U_{ab} spezifiziert, um lokale Überhitzungen durch energiereiche Impulse mit Impulsdauern im Bereich der oder deutlich unterhalb der thermischen Zeitkonstanten im Gewebe zu verhindern.

Zur Erleichterung der routinemäßigen Überprüfung der Einhaltung der Basisgrenzwerte wurden in ICNIRP (2020) auch Referenzwerte für die einfallende Leistungsdichte S_{inc} und die einfallende Energiedichte U_{inc} für den Frequenzbereich oberhalb von 6 GHz festgelegt. In der Absicht, die Referenzwerte konservativ festzulegen, so dass bei einer Unterschreitung der Referenzwerte unmittelbar auch die Unterschreitung der Basisgrenzwerte gesichert ist, erfolgte die Festlegung der Referenzwerte auf Basis von Arbeiten, in denen versucht wurde, die Beziehung zwischen S_{inc} bzw. U_{inc} und der dadurch verursachten S_{ab} bzw. U_{ab} unter konservativen (worst case) Annahmen herzustellen. Seit Veröffentlichung der ICNIRP (2020) Empfehlungen herrscht rege Forschungstätigkeit bezüglich der Frage, ob die darin festgelegten Referenzwerte tatsächlich für alle denkbaren Expositionssituationen die Einhaltung der Basisgrenzwerte sicherstellen (Christ et al. 2020a, Christ et al. 2020b, Diao et al. 2020, Diao et al. 2021, Li et al. 2023b, Li et al. 2024, Miura et al. 2021, Morimoto und Hirata 2022, Taguchi et al. 2022). Tatsächlich konnten dabei spezielle Expositionssituationen identifiziert werden, bei denen eine Überschreitung der Basisgrenzwerte nicht ausgeschlossen werden kann, obwohl die Referenzwerte eingehalten werden. Situationen mit relevanten Diskrepanzen (bis zu Faktor 4 Überschreitung von S_{ab} obwohl S_{inc} am Referenzwert liegt) betreffen jedoch ausschließlich spezielle Situationen im Nahfeld der Quelle, wenn der Realteil des normal zur Haut stehenden Poynting-Vektors als S_{inc} für die Bewertung herangezogen wird (Christ et al. 2020a)[2]. In allen anderen und damit den meisten typischen Expositionssituationen kann auf Basis der vorliegenden Daten davon ausgegangen werden, dass die in ICNIRP (2020) festgelegten Referenzwerte die Einhaltung der Basisgrenzwerte sicherstellen.

3.4 Überprüfung von Endgeräten hinsichtlich der Übereinstimmung mit den Referenz- und Basisgrenzwerten

Die Überprüfung der Übereinstimmung mit den Basisgrenzwerten bei Exposition durch körpernah betriebene Funksendegeräte in FR2 stellt neue Anforderungen an die Dosimetrie. Die im FR1 für diese Zwecke etablierte SAR-Messtechnik, mit der eine messtechnische Bestimmung

---

[1] Die Basisgrenzwerte für „lokale Exposition“ dienen zur Vermeidung von schädlichen kleinräumigen Gewebetemperaturerhöhungen, beispielsweise verursacht in oberflächennahen Gewebeschichten durch ein körpernah betriebenes Endgerät. Im Unterschied dazu dienen die Basisgrenzwerte für Ganzkörperexposition zur Begrenzung der Expositions-assoziierten Zunahme der Körperkerntemperatur. Letzteres ist vor allem bei einer weitgehend gleichmäßigen Exposition des gesamten Körpers relevant. Für Ganzkörperexposition ist gemäß ICNIRP 2020 auch im Frequenzbereich oberhalb von 6 GHz zusätzlich ein Basisgrenzwert in Form der über die gesamte Körpermasse gemittelten SAR festgelegt (zeitlich über 30 Minuten gemittelt).

[2] Die Verwendung des Betrages des Poynting-Vektors als S_{inc} entschärft die Situation deutlich (Christ et al. 2020a).

der räumlichen Verteilung der induzierten elektrischen Feldstärke in einem mit gewebesimulierender Flüssigkeit gefüllten Körperphantom und daraus der Rückschluss auf die SAR-Verteilung möglich ist, stößt im FR2 vor allem aufgrund der geringen Eindringtiefe auf harte Grenzen. Abgesehen von Anpassungen an die höheren Sendefrequenzen und Messbandbreiten in FR2 sind daher auch konstruktive Anpassungen erforderlich, bzw. wurden dazu auch völlig neue Messkonzepte entwickelt. In IEC/IEEE TR 63572 (IEC 2024) sind die wichtigsten gegenwärtig in Entwicklung befindlichen Messverfahren zur Bestimmung von S_{ab} im Zuge von Endgerätetests zusammengefasst. Im Wesentlichen folgen alle Verfahren einem der drei folgenden Grundprinzipien (Hybride aus den Grundprinzipien sind dabei auch denkbar):

a) *Messungen der elektrischen Feldstärke mit speziellen Pseudo-Vektor-Feldsonden in einem Körperphantom mit gewebesimulierender Flüssigkeit*
   Wie bei der etablierten SAR-Messung in FR1 übernimmt das Körperphantom dabei einerseits die Aufgabe in realistischer Weise auf die Feldquelle zurückzuwirken und andererseits die Absorptionsverluste im Gewebe nachzubilden. Neben dem speziellen Aufbau der Phantomschale und der Zusammensetzung der gewebesimulierenden Flüssigkeit unterscheidet sich auch der Aufbau der eingesetzten Feldsonden grundlegend von den entsprechenden Komponenten der etablierten SAR-Messtechnik. Die Feldsonde besteht aus zwei orthogonal zueinander angeordneten (in einer Ebene orthogonal zum Feldsondenschaft liegenden) Miniatur-E-Feldsensoren. Während der Messung wird in jedem untersuchten Messpunkt die Feldsensor-Ebene parallel zur Phantomoberfläche angeordnet und um die Sondenachse (Normalachse zur Phantomoberfläche) schrittweise gedreht, wobei in jeder Winkelstellung eine Messung der von den beiden E-Feldsensoren aufgenommenen Signale erfolgt. Diese Prozedur wird in mehreren Messpunkten entlang eines typischerweise matrixartigen Messpunktgitters wiederholt. Aus den auf diese Weise in den einzelnen Messpunkten gewonnenen Polarisationsellipsen lässt sich unter Anwendung mathematischer Algorithmen eine vollständige Rekonstruktion des Nahfeldes annähern (Pfeifer et al. 2019) und damit S_{ab} aus den von der Sonde aufgenommenen Messwerten mit einer räumlichen Auflösung von feiner als 0,5 mm bestimmen.

b) *Messungen der elektrischen Feldstärke in Luft hinter einer in realistischem Ausmaß reflektierenden Oberfläche einer dünnen Materialschicht*
   Die reflektierende Oberfläche übernimmt dabei nur die Rolle einer realistischen Rückwirkung auf die Quelle (Reflexion an der Körperoberfläche), die durch die Materialschicht dringende Strahlung wird jedoch nur in geringem Ausmaß abgeschwächt, so dass in mehreren Zentimetern Entfernung hinter der Oberfläche eine Messung der elektrischen Feldstärke in Luft erfolgen kann. Aus den Messungen der elektrischen Feldstärkeverteilung hinter der Oberfläche kann, unter Einbeziehung der Eigenschaften der Materialschicht, auf S_{ab} rückgeschlossen werden.

c) *Oberflächentemperaturmessung auf der Rückseite einer dünnen Hautphantomschicht*
   Bei dieser Methode dient die Hautphantomschicht einerseits dazu, die Rückwirkung auf die Quelle realistisch zu simulieren und andererseits die Strahlungsabsorption und Temperaturverteilung in der Hautphantomschicht möglichst identisch zu den entsprechenden in einer realen Haut auftretenden Prozessen nachzubilden. Aus der mittels Infrarotkamera auf der Rückseite der Hautphantomschicht gemessenen Temperaturverteilung kann wieder auf S_{ab} rückgeschlossen werden.

Die grundlegenden normativen Anforderungen an die messtechnische bzw. simulations- und rechentechnische Bestimmung von S_{inc} im Nahfeld von Antennen zum Zweck der Prüfung, ob

Übereinstimmung mit dem entsprechenden Referenzwert bei lokaler Exposition durch körpernah betriebene Funksendegeräte in FR2 besteht, sind in IEC/IEEE 63195-1 (IEC 2022a) und IEC/IEEE 63195-2 (IEC 2022b) festgelegt.

Sofern S_{inc} den anzuwendenden Referenzwert nicht überschreitet, kann von der Einhaltung des Basisgrenzwertes für die lokal absorbierte Leistungsdichte S_{ab} ausgegangen werden. Internationale Standardisierungsarbeiten für Mess- und numerische Berechnungsmethoden zur Bestimmung der im Gewebe absorbierten Leistungsdichte S_{ab} zum Zwecke des direkten Vergleichs mit dem entsprechenden Basisgrenzwert laufen gegenwärtig.

3.5 Rechtliche Regelungen zum Schutz vor Hochfrequenzimmissionen durch Mobilfunkbasisstationen

3.5.1 Relevante Rechtsvorschriften für Anlagen ab 10 W EIRP

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG 2013) enthält die Ermächtigungsgrundlage für die Sechsundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - BImSchV 2013) und liefert damit die rechtliche Grundlage für die Festlegung von Grenzwerten für elektromagnetische Felder.

Die Verordnung enthält unter anderem Vorgaben für die Errichtung und den Betrieb von ortsfesten Hochfrequenzanlagen (Frequenzbereich: 9 kHz bis 300 GHz), zu denen grundsätzlich auch ortsfeste Funkanlagen, und damit auch 5G-Basisstationen in den Frequenzbereichen FR1 und FR2 zählen. Die 26. BImSchV greift, sofern an einem Anlagenstandort durch die vorhandenen Antennen eine Strahlungsleistung von 10 W EIRP erreicht oder überschritten wird.

In der Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder (BEMFV 2002) werden die Vorgehensweisen zur Prüfung der Einhaltung der Grenzwerte der 26. BImSchV (BImSchV 2013) für ortsfeste Funkanlagen im Detail geregelt. Zur Konkretisierung der 26. BImSchV existieren ferner Durchführungshinweise der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI 2014).

3.5.2 Grenzwertvorgaben der 26. BImSchV

Für den hier relevanten Hochfrequenzbereich (FR2) werden in der 26. BImSchV (BImSchV 2013) die Referenzwerte und Summationsvorschriften aus den ICNIRP-Empfehlungen von 1998 (ICNIRP 1998) übernommen, auf denen auch die EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG (EU 1999) für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder basiert (Deutscher Bundestag 2013).

Die Grenzwerte für ortsfeste Hochfrequenzanlagen sind gemäß den Vorgaben der 26. BImSchV bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung der verursachenden Anlagen unter Einbezug der Hochfrequenz-Vorbelastung durch andere ortsfeste Hochfrequenzanlagen an allen Orten einzuhalten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind.

Die 26. BImSchV nennt zur Bewertung ausschließlich Grenzwerte für die Feldgrößen (Referenzwerte) und keine Grenzwerte für die äquivalente Leistungsdichte sowie keine Basisgrenzwerte. Zudem findet sich in § 5 der Verordnung ein starrer (datierter) Verweis auf die DIN EN 50413 Ausgabe 2009 (DIN EN 50413:2009-08) zu Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Feldstärke- und Flussdichtewerte, in der keine Aussagen zu einer möglichen räumlichen Mittelung der Felder getroffen werden, so dass diese auch nicht zur Anwendung kommen kann.

3.5.3 Regelungen für Anlagen unter 10 W EIRP

Bei Sendeanlagen mit weniger als 10 W EIRP, um die es sich häufig bei Anlagen zur Funkversorgung innerhalb von Gebäuden handelt, kommen die Vorgaben der 26. BImSchV (BImSchV 2013) nicht zur Anwendung, so dass der Betreiber für diese Anlagen auch keine Standortbescheinigung bei der BNetzA beantragen muss. (Gegebenenfalls ist einzig die Anzeige der In- und Außerbetriebnahme notwendig.)

In diesem Fall befindet man sich jedoch nicht im rechtsfreien Raum, vielmehr greift in Deutschland insbesondere zusätzlich das Gesetz über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt (Funkanlagengesetz - FuAG 2017), durch das die Funkanlagenrichtlinie 2014/53/EU („Radio Equipment Directive“ – RED, EU 2014) über die Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt in nationales Recht umgesetzt wurde. Das Funkanlagengesetz bezieht sich insofern also auf die Vorgaben des Personenschutzes bei hochfrequenten Feldern der Europäischen Union. Unter anderem schreibt das Funkanlagengesetz in § 4 Absatz 1 Nummer 1 vor, dass Funkanlagen (egal welcher Leistung) grundsätzlich so zu betreiben sind, dass Personen nicht gefährdet werden.

Die in der RED (EU 2014) geforderte Sicherheit von Funkanlagen wird in der Regel nachgewiesen durch Einhaltung der relevanten unter der RED im offiziellen Journal der EU gelisteten harmonisierten Normen. Im Journal ist aktuell für Mobilfunkbasisstationen, die Funksignale im Frequenzbereich von 110 MHz bis 100 GHz abstrahlen, die Produktnorm EN 50401 (EN 50401:2017) gelistet. Diese Norm schreibt für die Bewertung der Sicherheit von Personen der Allgemeinbevölkerung die Einhaltung der Grenzwerte der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG (EU 1999) vor (siehe EN 50401:2017, Kapitel 5). Für die praktische Durchführung der Konformitätsbewertung wird unter anderem auf die EN (IEC) 62232 (DIN EN 62232:2017) verwiesen.

Zum Nachweis der Sicherheit für 5G-Basisstationen im Frequenzbereich FR 2 mit weniger als 10 W EIRP können vom Betreiber letztlich dieselben Feldstärkegrenzwerte zugrunde gelegt werden, wie sie durch die 26. BImSchV (BImSchV 2013) für ortsfeste Sendeanlagen ab 10 W EIRP vorgegeben werden, da der 26. BImSchV dieselben Referenzwerte zugrunde liegen, wie der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG (EU 1999).

Aufgrund des Bezugs der RED (EU 2014) auf die EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG (EU 1999) sollte es bei Anlagen mit weniger als 10 W EIRP zusätzlich möglich sein, anstatt einer Konformitätsbewertung über die Referenzwerte (Feldstärke) alternativ eine Prüfung der Einhaltung der Basisgrenzwerte vorzunehmen. Da die EU-Ratsempfehlung für Frequenzen oberhalb von 10 GHz als Basisgrenzwert – anstatt der SAR – die einfallende Leistungsdichte S_{inc} verwendet, könnte aus fachlicher Sicht der Betreiber einer im FR2 betriebenen Anlage die Konformität auch mittels geeigneter Leistungsdichtemessungen oder -berechnungen im Umfeld der Antennen nachweisen.

3.5.4 Genehmigung und Kontrolle von ortsfesten Funkanlagen

Die Überprüfung der Einhaltung der BEMFV (BEMFV 2002) erfolgt für ortsfeste Funkanlagen ab 10 W EIRP durch die Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA).

Die Inbetriebnahme oder wesentliche Änderung einer derartigen ortsfesten Funkanlage muss vom Betreiber bei der BNetzA mindestens zwei Wochen vor Inbetriebnahme angezeigt werden. Die Außerbetriebnahme ist unverzüglich anzuzeigen.

Der Zeitpunkt der Inbetriebnahme bzw. der Außerbetriebnahme einer ortsfesten Funkanlage in öffentlichen Funknetzen, die eine EIRP von mehr als 0,1 W und weniger als 10 W aufweist (z. B. eine Kleinzellen-Basisstation oder eine Anlage zur Funkversorgung im Gebäudeinneren), ist der BNetzA innerhalb von vier Wochen nach der In- oder Außerbetriebnahme zu melden.

Die Überprüfung der Grenzwerteinhaltung von Funkanlagen ab 10 W EIRP durch die BNetzA findet im Regelfall bereits vor Inbetriebnahme der Anlage statt. Zusätzliche Kontrollen bei bereits in Betrieb befindlichen Anlagen sind in gewissem Umfang sowie bei Mitteilung Dritter oder bei erkannten Auffälligkeiten vorgesehen.

Die Einhaltung der Vorgaben der 26. BImSchV (BImSchV 2013) wird bei ortsfesten Funkanlagen ab 10 W EIRP (also auch bei 5G-Basisstationen in den Frequenzbereichen FR1 und FR2) durch das „Standortbescheinigungsverfahren“ der BNetzA sichergestellt. Bei Neuerrichtung oder wesentlicher Änderung einer Funkanlage muss der Betreiber der BNetzA alle für die Berechnung der in der Umgebung der Anlage auftretenden elektromagnetischen Felder notwendigen technischen und sonstigen Anlagendaten (z. B. Werkpläne) zur Verfügung stellen. Die BNetzA errechnet anschließend aus diesen Daten unter Einbeziehung aller weiteren am Standort vorhandenen Anlagen und unter Berücksichtigung der Hochfrequenz-Hintergrundimmission, die durch in der näheren Umgebung befindliche Funkanlagenstandorte verursacht werden, horizontale und vertikale Sicherheitsabstände für die höchste betriebliche Anlagenauslastung.

Die Standortbescheinigung wird erteilt, wenn nur innerhalb des „kontrollierbaren Bereichs“ (d. h. der Bereich, bei dem der Zugang nicht allgemein, sondern nur unterwiesenen Personen möglich ist) Grenzwertüberschreitungen festgestellt wurden, außerhalb jedoch nicht. Die Anlage darf also nur dann betrieben werden, wenn sich innerhalb des kontrollierbaren Bereichs keine Personen aufhalten können, es sei denn, es handelt sich um bezüglich der Exposition durch Hochfrequenzfelder unterwiesene Personen, die sich z. B. aufgrund beruflicher Tätigkeiten (z. B. Wartungspersonal, Dachdecker) innerhalb des kontrollierbaren Bereichs aufhalten müssen.

Es ist auch möglich, die endgültige Standortbescheinigung erst aufgrund von vor Ort durchgeführten Messungen zu erteilen. In diesem Fall wird durch die Messungen überprüft, ob an allen für die Allgemeinbevölkerung unkontrolliert zugänglichen Orten um die Anlage die Vorgaben der 26. BImSchV (BImSchV 2013) eingehalten werden. Daher werden in Standortbescheinigungen, die auf messtechnischen Untersuchungen basieren, keine Sicherheitsabstände explizit ausgewiesen. Das Gleiche gilt seit einiger Zeit für Standorte, bei denen von der BNetzA zur rechnerischen Konformitätsprüfung ein neues, auf feldtheoretischen Berechnungsmethoden basierendes Programm („Wattwächter“) verwendet wurde.

Die Standortbescheinigung wird für die vom Betreiber beantragte Anlagenkonfiguration erteilt. Sofern durch technische Veränderungen an den Anlagen des Standortes von dieser beantragten Betriebsweise wesentlich abgewichen wird (insbesondere dann, wenn die vorgesehenen Änderungen zu einer Vergrößerung der Sicherheitsabstände führen könnten), ist für den weiteren Betrieb zunächst notwendig, dass der Betreiber bei der BNetzA eine neue Standortbescheinigung beantragt. Ohne diese ist der Betrieb des Standortes mit den veränderten Parametern nicht zulässig.

Aufgrund der in Deutschland aktuell geltenden Durchführungspraxis kann also davon ausgegangen werden, dass an Funkanlagenstandorten ab 10 W EIRP, die mit 5G-Basisstationsantennen im Frequenzbereich FR1 und / oder FR2 ausgestattet beziehungsweise erweitert werden, die Einhaltung der Schutzvorgaben der 26. BImSchV (BImSchV 2013) für die Allgemeinbevölkerung durch das Standortbescheinigungsverfahren der BNetzA sichergestellt ist.

Bei Standorten unter 10 W EIRP liegt die Sicherstellung des Personenschutzes in der Verantwortung des Anlagenbetreibers. Die BEMFV (BEMFV 2002) enthält hierzu keine Vorgaben.

Er hat dazu die in Abschnitt 3.5.3 bereits erläuterten Vorgaben des FuAG (FuAG 2017) beziehungsweise der RED (EU 2014) einzuhalten.

Im Juni 2023 haben die vier deutschen Mobilfunknetzbetreiber (Deutsche Telekom Technik GmbH, Vodafone GmbH, Telefónica Germany GmbH & Co. OHG, 1&1 Mobilfunk GmbH) in einer freiwilligen Selbstverpflichtung (Mobilfunknetzbetreiber 2023) erklärt, dass

- für Kleinzellen mit Leistungen von 2 W bis 10 W EIRP jeglicher Bauform im In- und Outdoor-Bereich Regeln für ein gleichermaßen geltendes Schutzkonzept angewendet werden und
- Kleinzellen mit einer Antennenunterkante höher 2,30 Meter über Grund bzw. dem bestimmungsgemäß betretbaren Bereich montiert werden. Für diese Anlagen sagen die Betreiber zu, sie so zu errichten und zu betreiben, dass an allen Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt bestimmt sind, die Grenzwerte der 26. BImSchV (BImSchV 2013) sicher eingehalten werden.
- Ist in Ausnahmefällen eine geringere Montagehöhe durch die örtlichen Gegebenheiten erforderlich, zum Beispiel durch nicht ausreichende Deckenhöhe in Tiefgaragen, Kellerräumen und -gängen, so sagen die Betreiber zu, die Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass die Grenzwerte der ICNIRP-Leitlinien (ICNIRP 2020) an allen Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt bestimmt sind, sicher unterschritten werden. Wenn erforderlich, kann auch eine unmittelbare Berührungssicherheit durch die Einhaltung der Basisgrenzwerte nachgewiesen werden.
- Die Bewertung erfolgt nach den Grenzwerten der 26. BImSchV bzw. in den oben genannten Ausnahmefällen nach den ICNIRP-Leitlinien 2020. Es werden die jeweils aktuellen Normen zu Mess- und Berechnungsverfahren berücksichtigt.

Die vier großen deutschen Mobilfunknetzbetreiber verpflichten sich also, dafür zu sorgen, dass auch bei ihren Anlagen mit weniger als 10 W EIRP analog die Vorgaben der 26. BImSchV (BImSchV 2013) beziehungsweise alternativ die Basisgrenzwerte nach EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG (EU 1999) beziehungsweise die Empfehlungen der aktuellen ICNIRP-Leitlinien aus dem Jahr 2020 (ICNIRP 2020) eingehalten werden.

Nicht eingeschlossen in diese Selbstverpflichtung sind allerdings die Betreiber von privaten „Campusnetzen“ (Universitäten, Forschungsinstitute, Industrie, Landwirtschaft, Logistikbranche etc.), die ebenfalls 5G-Netze (FR1 oder FR2) im Bereich ihrer Liegenschaften aufbauen und betreiben können.

Es ist abzusehen, dass zusätzlicher Aufklärungsbedarf bei den Campusnetzbetreibern bezüglich der Verpflichtung zur Sicherstellung des Schutzes von Personen bei Funkanlagen notwendig wird, denn diese betreiben häufig zum ersten Mal ein derartiges Mobilkommunikationsnetz. Daher sind sie in der Regel nicht so gut über die geltenden gesetzlichen Vorgaben informiert, wie es bei den auf diesem Gebiet sehr erfahrenen Betreibern der landesweiten öffentlichen Funknetze der Fall ist.

Zudem besteht nach BEMFV (BImSchV 2013) für Funkanlagen mit einer EIRP von weniger als 10 W nur dann eine Pflicht zur Anzeige der Inbetriebnahme bei der BNetzA, wenn es sich um eine Anlage in einem öffentlichen Telekommunikationsnetz handelt. Die Antennenstandorte von Betreibern privater 5G-Campusnetze mit weniger als 10 W EIRP sind somit der BNetzA im Detail nicht bekannt, sie kennt einzig aufgrund der Lizenzvergabe für die Frequenznutzung den Betreiber des Netzes.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass in Deutschland bei 5G-Basisstationen im Frequenzbereich FR2 grundsätzlich die gleichen rechtlichen Regelungen und Durchführungsvorschriften gelten, wie es bei den bereits seit vielen Jahren in Betrieb befindlichen Mobilfunkanlagen im Frequenzbereich FR1 der Fall ist. Dies gilt sowohl für Anlagen mit mehr als 10 W EIRP als auch für leistungsschwächere Varianten mit weniger als 10 W EIRP.

Allerdings besteht sowohl im Frequenzbereich FR1 als auch im Frequenzbereich FR2 die Möglichkeit des Betriebs von privaten 5G-Campusnetzen. Bei derartigen Netzen ist abzusehen, dass zusätzlicher Aufklärungsbedarf bei den Betreibern bezüglich der Verpflichtung zur Sicherstellung des Schutzes von Personen im Umfeld von Funkantennen notwendig ist, da diese auf dem Gebiet des Personenschutzes bei Funkanlagen meist wenig erfahren sind.

3.6 Zusammenfassende Beurteilung der technischen und regulatorischen Aspekte der 5G-Technologie im Frequenzbereich FR2

Die Ergebnisse des technischen Teils dieser Stellungnahme können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der FR2 weist grundsätzlich tendenziell stärkere Übertragungsdämpfungen auf als der FR1. Dadurch sinkt die maximal mögliche Übertragungsdistanz, und eine gerichtete Abstrahlung der verwendeten Antennen ist zwingend erforderlich. Daher wird der FR2 vorwiegend für die Innenraumkommunikation oder für fest installierte bzw. Line-of-Sight (LoS)-Übertragungsstrecken im Außenbereich mit zum Teil hohen Datenraten verwendet.
- Noch deutlicher als im Frequenzbereich FR1 kann mittels Beamforming-Antennen im Frequenzbereich FR2 die verfügbare Sendeleistung selektiv und bedarfsorientiert auf bestimmte Bereiche konzentriert werden. Dies bedeutet, dass eine Zunahme der Immission vor allem dort zu erwarten ist, wo eine große Dichte an aktiven Endgeräten besteht. In anderen örtlichen Bereichen, die nicht durch Beams erfasst werden, wird die mittlere Immission hingegen im Vergleich zu einer statischen Ausleuchtung geringer sein.
- Wie bei 5G im FR1 ist auch im FR2 die vom 5G-System permanent in die Funkzelle abgestrahlte Always-on-Signalisierungsleistung, also der Anteil der Gesamtleistung, der u. a. zum Zweck der Signalisierung und zur Synchronisierung der Endgeräte permanent abgestrahlt wird, deutlich kleiner als bei 2G/3G/4G. Dies führt insbesondere in Zeiten geringer Auslastung der Anlage zu einer im Vergleich zur maximal möglichen Immission noch niedrigeren Immission als bei den Vorgängertechnologien.
- Aufgrund der höheren in FR2 genutzten Frequenzen erfolgt die Strahlungsabsorption an der Körperoberfläche, sodass vor allem die Haut und die Cornea des Auges als potenzielle Zielgewebe für Schadwirkungen in Frage kommen. Die bekannten messtechnischen Verfahren zum Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte zum Schutz vor negativen gesundheitlichen Folgen von körpernah betriebenen Funksendegeräten müssen für Geräte mit Aussendungen in FR2 entsprechend erweitert bzw. angepasst werden. Dies erfolgt gegenwärtig bereits in internationalen Standardisierungsgremien.
- Grundsätzlich gelten in Deutschland bei 5G-Basisstationen im Frequenzbereich FR2 die gleichen rechtlichen Regelungen und Durchführungsvorschriften, wie es bei den bereits seit vielen Jahren in Betrieb befindlichen Mobilfunkanlagen im Frequenzbereich FR1 der Fall ist. Dies gilt sowohl für Anlagen mit mehr als 10 W EIRP als auch für leistungsschwächere Varianten mit weniger als 10 W EIRP.

– Allerdings besteht sowohl im Frequenzbereich FR1 als auch im Frequenzbereich FR2 die Möglichkeit des Betriebs von privaten 5G-Campusnetzen. Bei derartigen Netzen ist abzusehen, dass zusätzlicher Aufklärungsbedarf bei den Betreibern bezüglich der Verpflichtung zur Sicherstellung des Schutzes von Personen im Umfeld von Funkantennen notwendig ist, da diese Betreiber auf dem Gebiet der Sicherstellung des Gesundheitsschutzes bei Funkanlagen meist wenig erfahren sind.

3.7 Offene Fragen und Forschungsbedarf

– Aufgrund der in FR2 vorliegenden örtlichen Konzentration der Strahlungsabsorption in der Haut und der Cornea des Auges kommt der Detailkenntnis der Absorptionsvorgänge besondere Bedeutung zu. Wenngleich zu diesem Fragenkomplex bereits Forschungsergebnisse vorliegen, erscheinen viele Detailfragen gegenwärtig noch offen. Die Beantwortung dieser Fragen erscheint insbesondere wegen der großen biologischen Variabilität der Haut entlang des menschlichen Körpers und Veränderungen aufgrund des Alterungsprozesses als sehr komplex. Gegenwärtige Grenzwertempfehlungen beruhen, unter Berücksichtigung von mehr oder weniger gut fundierten Sicherheitsfaktoren, auf numerischen Berechnungen unter Verwendung sehr einfacher planarer Schichtmodelle der Haut, ausschließlich in Hinblick auf thermische Effekte. Weitere systematische Untersuchungen unter Berücksichtigung der anatomisch-makroskopischen Feinstruktur der menschlichen Haut, z. B. Schweißdrüsen oder Haarfollikel (inkl. deren Variabilität und altersbedingten Veränderungen), zur Etablierung anatomisch ausreichend differenzierter Absorptionsmodelle könnten hier zu einer Weiterentwicklung der Grenzwertempfehlungen beitragen.
– Da derzeit in Deutschland lediglich einige wenige 5G-Testinstallationen im FR2-Frequenzbereich vorliegen, stammen die derzeit verfügbaren Immissionsdaten aus simulationsbasierten Abschätzungen oder aus Messungen in anderen Ländern. Es wird empfohlen, im Falle eines operativen Netzaufbaus von 5G-Sendeanlagen im Frequenzbereich FR2 in Deutschland diesen immissionsmesstechnisch zu begleiten und dabei z. B. auch die immissionsrelevanten Besonderheiten von strahlschwenkenden Antennen zu berücksichtigen.
– Bezüglich einer zuverlässigen Bestimmung von S_{ab} und S_{inc} zur strahlenschutztechnischen Bewertung von körpernah betriebenen Funksendegeräten in FR2 sind gegenwärtig international rege Forschungstätigkeiten beobachtbar, und parallel dazu entstehen zurzeit auch entsprechende internationale Standards. Nach gegenwärtiger Einschätzung kann daher davon ausgegangen werden, dass die derzeit in diesem Zusammenhang noch offenen Fragen innerhalb der nächsten ein bis zwei Jahre zumindest soweit beantwortet werden können, dass einer verlässlichen strahlenschutztechnischen Bewertung künftiger Endgeräte in FR2 bei ihrer Einführung bzw. Verbreitung in Deutschland nichts im Wege steht.
– Betreiber von 5G-Campusnetzen sollten im Rahmen des Lizenzierungsverfahrens eingehend über ihre Pflichten zur Sicherstellung des Schutzes von Personen vor elektromagnetischen Feldern (Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierte Personen) informiert werden.

Derzeit wird an der Definition der 6. Mobilfunkgeneration 6G gearbeitet; die Einführung wird zu Beginn der 2030er Jahre erwartet. Nach derzeitigem Stand wird 6G in denselben Frequenzbereichen arbeiten, die heute durch GSM, LTE und 5G belegt sind. Darüber hinaus ist ein

sogenannter Frequenzbereich FR3 in Planung, der sich von etwa 7 bis 24 GHz erstrecken wird und damit die Lücke zwischen FR1 und FR2 schließen soll. Diskutiert wird auch eine Erschließung der Sub-THz-Bereiche von 100 GHz bis 300 GHz. Dies wird sowohl die Expositionserfassung, die Expositionsbewertung als auch die biologische Bewertung vor neue Herausforderungen stellen.

Auf Basis der derzeit vorliegenden Informationen ist es nicht möglich, eine fundierte strahlenschutztechnische Bewertung von 6G vorzunehmen, da wichtige technische Parameter noch nicht definiert sind. Sofern 6G in den derzeit etablierten Frequenzbereichen arbeiten wird, ist davon auszugehen, dass die in den diesbezüglichen Stellungnahmen der SSK gemachten Aussagen hinsichtlich der biologischen Wirkungen grundsätzlich übertragbar sind.

4 Wissenschaftliche Begründung zu biologischen und gesundheitlichen Wirkungen

Im zweiten Teil der vorliegenden Stellungnahme soll der wissenschaftliche Kenntnisstand bezüglich biologischer und gesundheitlicher Auswirkungen von Hochfrequenzfeldern im Frequenzbereich FR2 zusammengetragen und diskutiert werden. Im EMF-Portal **(**https://www.emf-portal.org/de) sind mit Abfrage vom 08.05.2025 insgesamt 372 Studien für den Millimeterwellenfrequenzbereich (MMW) gelistet, die dem Themenbereich Medizin/Biologie zuzuordnen sind. Da der MMW-Bereich Frequenzen von 30 GHz bis 300 GHz umfasst, wurden für den Frequenzbereich 20 GHz bis 30 GHz dreißig zusätzliche Studien identifiziert. Von den insgesamt 402 im EMF-Portal für den Frequenzbereich 20 GHz bis 300 GHz gelisteten Studien für den Bereich Medizin/Biologie wurden 54 % (n = 216) in diesem Zusammenhang als nicht relevant eingestuft, da sie (a) als Konferenz-, Symposiums- oder Buchbeitrag publiziert wurden, (b) Frequenzen untersucht haben, die außerhalb des FR2 liegen, (c) Effekte an Pflanzen, Bakterien, Hefen, Pilzen oder Vesikeln untersuchten, (d) biophysikalische oder technische Effekte untersuchten und/oder (e) Simulationen ohne Messungen durchgeführt haben. Ferner wurden therapierelevante tierexperimentelle Studien sowie Studien an Patientinnen und Patienten als nicht relevant eingestuft.

Insgesamt gibt es im Vergleich zum Frequenzbereich FR1 bisher vergleichsweise wenige Studien zu biologischen Wirkungen von Exposition im FR2-Frequenzbereich, dies gilt insbesondere für epidemiologische und experimentelle Humanstudien. Letztere werden daher im Abschnitt 4.3 alle kurz beschrieben. Im EMF-Portal wurden lediglich zwei epidemiologische Studien identifiziert, die jedoch keine separate Auswertung für den FR2 vorgenommen haben. Sie sind daher für diese Stellungnahme nicht informativ. Für tierexperimentelle In-vivo-Studien (im Folgenden nur „In-vivo-Studien“ genannt) und In-vitro-Studien ist die Datenlage etwas anders, hier liegen auch bereits Reviews vor (siehe Abschnitt 4.1.1). Eine weitere bis zum 12. Mai 2025 durchgeführte Literatursuche im EMF-Portal zu Reviews ergab 209 Publikationen. Für Reviews galten dieselben Kriterien wie für die Originalliteratur. Zusätzlich wurden nur Reviews berücksichtigt, die zugänglich waren, in den letzten 25 Jahren publiziert wurden, in denen die Literaturauswahl nachvollziehbar beschrieben wurde und die eine Qualitätsbewertung der Studien vorgenommen haben. In den Abschnitten 4.4 und 4.5 werden die Originalstudien vorgestellt, die ab 2019 publiziert wurden.

Ebenso wie der technische Teil, beschränkt sich auch der zweite Abschnitt dieser Stellungnahme ausschließlich auf den aktuell in Deutschland noch nicht nennenswert für Mobilfunk genutzten Frequenzbereich FR2 (d. h. 24.25 GHz bis 71 GHz). Die technische, biologische und gesundheitliche Bewertung von 5G-Anwendungen im bereits genutzten Frequenzbereich bis etwa 7 GHz (FR1) wurde in einer separaten Stellungnahme der SSK vorgenommen (SSK 2021).

Für die Bewertung des aktuellen Standes der Forschung im Bereich biologischer und gesundheitlicher Auswirkungen erfolgte im ersten Schritt eine Zusammenstellung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen von bereits vorliegenden Reviews (Abschnitt 4.1.1). Im zweiten Schritt werden Stellungnahmen von nationalen Beratungsgremien und Behörden für den FR2 dargestellt (Abschnitt 4.1.2). In den Abschnitten 4.2 bis 4.5 werden für die verschiedenen Forschungsdisziplinen (Epidemiologie, experimentelle Humanstudien, In-vivo-Studien und In-vitro-Studien) Resultate aus Originalstudien dargestellt. Damit ist in der Gesamtschau der hier identifizierte, aktuell verfügbare wissenschaftliche Kenntnisstand in die Betrachtungen eingeflossen.

4.1 Stellungnahmen und Reviews zum Thema

Insgesamt wurden zwei Reviews, eine Meta-Analyse und eine Literaturstudie mit Fokus auf Effekte einer Exposition durch elektromagnetische Felder des FR2-Frequenzbereichs (> ca. 24 GHz) identifiziert (siehe Abschnitt 4.1.1).

Darüber hinaus liegen von den nationalen Behörden aus den Niederlanden und Frankreich Stellungnahmen zu gesundheitlichen Auswirkungen von 5G vor, in denen der Frequenzbereich FR2 gesondert diskutiert wird (siehe Abschnitt 4.1.2).

4.1.1 Reviews zu biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von Expositionen im FR2-Frequenzbereich

Die folgenden vier in diesem Abschnitt näher vorgestellten Arbeiten erfüllen die oben benannten Auswahlkriterien:

In einer Literaturrecherche in den Datenbanken PubMed database[3] und EMF-Portal[4] sowie relevanter Literatur aus anderen Dokumenten, wie ICNIRP, SCENIHR, WHO, IARC, IEEE etc. haben Simko und Mattsson (2019) englischsprachige Publikationen identifiziert, die bis Ende 2018 publiziert wurden und welche die gesundheitlichen Auswirkungen einer Exposition im Frequenzbereich 6 GHz bis 100 GHz untersuchten. In dem Review wurden 94 Studien identifiziert und analysiert. Berücksichtigt wurden 45 In-vivo-Studien, die hauptsächlich an Säugetieren (Maus, Ratte, Kaninchen) und in wenigen Fällen an Menschen durchgeführt wurden. In den 53 In-vitro-Studien wurden Primärzellen (n = 24) oder Zelllinien (n = 29) verwendet. In einigen nicht berücksichtigten Studien wurden Bakterien, Pilze und anderes lebendes Material für die Versuche verwendet.

Jede Studie wurde neben dem Studientyp (in vivo, in vitro) charakterisiert nach: biologischem Material (Spezies, Zelltyp usw.), biologischem Endpunkt, Exposition (Frequenz, Expositionsdauer, Leistungsdichte), Ergebnissen und bestimmten Qualitätskriterien. Achtzig Prozent der In-vivo-Studien zeigten Reaktionen auf die Exposition, während 58 % der In-vitro-Studien Wirkungen zeigten. Die Reaktionen betrafen alle untersuchten biologischen Endpunkte. Es gab keine konsistente Beziehung zwischen der Leistungsdichte, der Expositionsdauer oder -häufigkeit und den Expositionswirkungen. Die verfügbaren Studien liefern keine angemessenen und ausreichenden Informationen für eine sinnvolle Risikobewertung oder für die Frage nach nicht-thermischen Wirkungen. Es besteht Forschungsbedarf in Bezug auf die lokale Wärmeentwicklung auf kleinen Oberflächen, z. B. der Haut oder dem Auge, und zu etwaigen Auswirkungen auf die Umwelt. In diesem Review wurde zudem eine systematische Qualitätsbewertung der Studien unter Berücksichtigung der Kriterien Temperaturkontrolle, Verblindung, Dosimetrie, Scheinexposition und Positivkontrolle vorgenommen. Von den 45 In-vivo-Studien zeigten 78 % (35) biologische Reaktionen nach der Exposition durch MMW. Von allen Studien wurden 73 % mit einer Scheinexposition bzw. Kontrollen durchgeführt, 76 % verwendeten eine angemessene Dosimetrie, 44 % verwendeten Positivkontrolle und 67 % wurden unter temperaturkontrollierten Bedingungen durchgeführt. Leider wurden nur 16 % der Studien nach Protokollen durchgeführt, die eine Verblindung gewährleisteten, und es wurden nur drei Publikationen identifiziert, die alle fünf Kriterien erfüllten. Wenn das Kriterium der Verblindung ausgeschlossen wurde, konnten 13 Studien identifiziert werden, die die übrigen vier Kri-

[3] https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/

[4] https://www.emf-portal.org/de

terien erfüllten. Wenn man nur drei Kriterien berücksichtigt, nämlich Scheinexposition, Dosimetrie und Temperaturkontrolle, wurden 40 % (20 Arbeiten) identifiziert, womit die Qualität der In-vivo-Studien insgesamt als unzureichend eingestuft werden muss. Von den 53 In-vitro-Studien erfüllten lediglich 13 (42 %) drei der fünf Qualitätskriterien (Temperaturkontrolle, Dosimetrie und Berücksichtigung einer Scheinexposition bzw. Kontrollgruppe). Positivkontrollen wurden in 47 % der Studien berücksichtigt und nur eine Studie wurde mit einem verblindeten Protokoll durchgeführt. Das Autorenteam schließt daraus, dass Design und Durchführung künftiger Studien deutlich verbessert werden müssen, wenn sie für die Sicherheitsbewertung nützlich sein sollen. Außerdem weisen Simkó und Mattsson darauf hin, dass es bis zum betrachteten Stichtag keine epidemiologischen Studien zu Expositionen im 5G-Frequenzbereich FR2 gibt.

Karipidis et al. (2021) haben einen Review zu biologischen und Gesundheitseffekten einer Exposition durch Hochfrequenzfelder > 6 GHz durchgeführt, wobei nur Publikationen mit Expositionen unterhalb der von der ICNIRP empfohlenen Begrenzung für berufliche Exposition berücksichtigt wurden. Dazu wurde in den Datenbanken PubMed, EMF-Portal, Google Scholar, Embase und Web of Science eine Literatursuche durchgeführt, die bis Dezember 2019 publizierte englischsprachige Studien einschloss. Darüber hinaus wurden die Literaturlisten aller eingeschlossenen Studien herangezogen. Der Review umfasste 107 experimentelle Studien (91 In-vitro-, 15 In-vivo- und eine Humanstudie), in denen verschiedene biologische Endpunkte untersucht wurden, darunter Gentoxizität, Zellproliferation, Genexpression, zelluläre Signaltransduktion, Membranfunktion und andere Wirkungen. Zudem wurden 31 epidemiologische Studien eingeschlossen, in denen die Personen einer Exposition durch Radarsignale > 6 GHz ausgesetzt waren.

Da die MMW hauptsächlich im Bereich der Haut absorbiert werden, waren Epithel- und Hautzellen ein gängiges Untersuchungsmodell für mögliche gentoxische Wirkungen. Die Gentoxizität wurde in 22 Arbeiten mit verschiedenen Methoden (hauptsächlich Komet-Assay, Mikronukleus-Assay, Chromosomenaberrationen und Spindelstörungen) an exponierten Zellen untersucht. Die hierfür angewandten Methoden waren im Allgemeinen sehr genau, allerdings wurden in den Studien widersprüchliche Ergebnisse berichtet, insbesondere wenn Chromosomenaberration oder Spindelstörungen untersucht wurden. Einige Assays (wie der Komet-Assay) zeigten jedoch übereinstimmend keine Anzeichen für DNA-Schäden in Hautzellen. In Tierstudien, die von einer Forschungsgruppe durchgeführt wurden, fanden sich jedoch DNA-Strangbrüche und Veränderungen bei Enzymen, die den Aufbau von ROS kontrollieren, wobei anzumerken ist, dass diese Studien nur eine geringe Anzahl von Tieren umfasste (z. B. in einer Studie nur sechs exponierte Tiere). Zwei Studien einer russischen Forschergruppe haben über Indikatoren für DNA-Schäden in Bakterien berichtet, aber auch diese Ergebnisse wurden nicht von anderen Forschern unabhängig voneinander repliziert. Insgesamt lag das Hauptproblem der genannten Studien im Fehlen einer angemessenen Dosimetrie, einer Verblindung und einer ausreichenden Temperaturkontrolle.

Die Studien zur Wirkung von MMW auf die Zellproliferation konzentrierten sich in 23 Studien in erster Linie auf Bakterien, Hefezellen und Tumorzellen, wobei viele der Studien eine unzureichende Dosimetrie und Temperaturkontrolle aufwiesen. Die Studien berichteten über widersprüchliche Ergebnisse, die möglicherweise auf thermische Effekte in einigen der Studien zurückzuführen sind. Eine italienische Forschergruppe, die die meisten Studien an Tumorzellen durchgeführt hat, berichtete entweder über eine Verringerung oder keine Veränderung der Proliferation der exponierten Zellen; allerdings wiesen auch diese Studien eine unzureichende Dosimetrie und Temperaturkontrolle auf.

In den 18 Studien zur Genexpression wurden hauptsächlich zwei verschiedene Indikatoren untersucht: die Expression von stressempfindlichen Genen und Chaperonproteinen sowie das Auftreten eines Resonanzeffekts in den Zellen zur Erklärung von Veränderungen im DNA-Konformationszustand. Die meisten Studien fanden keine Auswirkungen schwacher MMW auf die Expression von stressempfindlichen Genen oder Chaperonproteinen, wobei eine Reihe experimenteller Methoden zur Bestätigung dieser Ergebnisse eingesetzt wurde. Auch bei diesen Studien gab es keine Verblindung, so dass eine Verzerrung der Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden kann.

Die 10 Studien zur Signalübertragung in den Zellen und zur elektrischen Aktivität berichteten über eine Reihe unterschiedlicher Ergebnisse, darunter Erhöhungen oder Verminderungen der Signalamplitude und Veränderungen des Signalrhythmus. Dabei wurden in den meisten Studien keine einheitlichen Wirkungen festgestellt, und auch hier waren die Untersuchungen nicht verblindet. Karipidis et al. (2021) kamen zu dem Schluss, dass insgesamt die berichteten Auswirkungen auf die elektrische Aktivität nicht als innerhalb der normalen Variabilität liegend abgetan werden können. Allerdings deuten die Studien darauf hin, dass selbst bei anhaltender Exposition die normale Funktion nach kurzer Zeit wiederhergestellt wird. In diesem Fall liefern diese Studien nach Ansicht des Autorenteams keine Anzeichen für eine zu erwartende negative Auswirkung auf die Gesundheit.

Bei den Analysen zu den Membraneffekten wurden Veränderungen der Membraneigenschaften und der Permeabilität in 20 Studien untersucht. In einigen Studien wurden Veränderungen beim Übergang von der Flüssig- in die Gelphase oder umgekehrt beobachtet, und das Autorenteam deutet an, dass MMW die Zellhydratation beeinflussen. Allerdings wurden die in diesen Studien verwendeten statistischen Methoden nicht beschrieben, so dass es schwierig ist, die Gültigkeit dieser Ergebnisse zu überprüfen. Insgesamt wurde zwar über eine Vielzahl von Bioeffekten der Membranen berichtet, diese wurden jedoch nicht unabhängig voneinander repliziert, und die Studien wiesen eine unzureichende Dosimetrie und Temperaturkontrolle sowie eine unzureichende statistische Analyse auf.

Die begrenzte Anzahl von Studien (20) zu einer Reihe so genannter „anderer Wirkungen“ der Exposition durch MMW unterhalb der von ICNIRP empfohlenen Begrenzung der Exposition ergab im Allgemeinen wenige bis keine konsistenten Wirkungen. In der einzigen In-vivo-Studie zur Krebsentwicklung, allerdings ohne Scheinexposition, wurde keine Wirkung der MMW festgestellt. Die Auswirkungen auf die Fortpflanzung waren widersprüchlich, was möglicherweise durch die gegensätzlichen Ziele der Untersuchung gesundheitsschädlicher Auswirkungen oder der Unfruchtbarkeitsbehandlung beeinflusst wurde. Darüber hinaus wurden in der einzigen Studie über menschliche Spermien keine Auswirkungen von schwachen MMW festgestellt.

Karipidis et al. (2021) weisen darauf hin, dass obwohl in vielen experimentellen Studien eine Reihe von Bioeffekten berichtet wurden, die Ergebnisse im Allgemeinen nicht unabhängig reproduziert wurden. Auch hier wurde, wie bereits bei Simko und Mattsson (2019), darauf hingewiesen, dass ungefähr die Hälfte der Studien aus nur fünf Laboratorien stammten und mehrere Studien in Zusammenarbeit zwischen einem oder mehreren Laboren durchgeführt wurden. Die Expositionsmerkmale variierten erheblich zwischen den verschiedenen Studien, wobei die Studien, welche die größte Wirkung zeigten, sich um eine Leistungsdichte von etwa 1 W m^{-2} gruppierten.

Wie bei Simko und Mattsson (2019) wurde in diesem Review die Studienqualität bewertet. Karipidis et al. (2021) kommen dabei zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Die meisten Studien weisen Mängel in einer Reihe von Qualitätskriterien auf, u. a. in der Dosimetrie, der fehlenden Einbeziehung von Positivkontrollen, der Verblindung oder der genauen Messung oder

Kontrolle der Temperatur des getesteten biologischen Systems. Die zugehörige Metaanalyse (Wood et al. 2021) zeigte, dass der Großteil der Studien eine Qualitätsbewertung mit weniger als zwei von fünf möglichen Punkten aufwies, wobei nur eine Studie die maximale Qualitätsbewertung erreichte.

Die Metaanalyse von Wood et al. (2021), die auf den bei Karipidis et al. (2021) beschriebenen experimentellen Daten basiert, zeigte darüber hinaus, dass keine Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Exposition (entweder Leistungsdichte-basierend auf 84 Studien oder SAR-basierend auf 31 Studien) und dem Ausmaß der Wirkung besteht. Vielmehr zeigten Studien mit einer höheren Exposition tendenziell eine geringere Effektgröße. Eine negative Korrelation ließ sich auch zwischen der Effektgröße und der Qualitätsbewertung beobachten. Die meisten Studien, die einen großen Effekt zeigten, wurden im Frequenzbereich um 40 GHz bis 55 GHz durchgeführt und repräsentieren Untersuchungen zur Verwendung von MMWs für therapeutische Zwecke.

Unter Berücksichtigung aller untersuchten Outcomes der insgesamt 107 experimentellen Studien kamen Karipidis et al. (2021) zu dem Schluss, dass es keine bestätigten Hinweise auf eine gesundheitsgefährdende Wirkung von Exposition durch Hochfrequenzfelder im Frequenzbereich > 6 GHz bei Einhaltung der von ICNIRP empfohlenen Begrenzung für berufliche Exposition gibt.

Karipidis et al. (2021) weisen darüber hinaus darauf hin, dass es keine epidemiologischen Studien gibt, die direkt 5G-Signale im Zusammenhang mit möglichen gesundheitlichen Auswirkungen untersucht haben. Es gibt jedoch epidemiologische Studien, die sich mit den Auswirkungen einer beruflichen Radarexposition beschäftigt haben, die potenziell den FR2-Frequenzbereich von ca. 24 GHz bis 71 GHz umfassen könnten. In den Review wurden entsprechende epidemiologische Studien einbezogen, da sie eine berufliche Exposition unterhalb der ICNIRP-Richtlinien darstellen. Dabei fehlten jedoch häufig Angaben zur Frequenz der Radarsignale. Falls Frequenzen angegeben wurden, lagen sie meist deutlich unterhalb des FR2. Dies war zu erwarten, denn die meisten Radarsysteme nutzen Frequenzen unterhalb von ca. 10 GHz. Der Review umfasste 31 epidemiologische Studien (acht Kohorten-, dreizehn Fall-Kontroll-Studien, neun Querschnittsstudien und eine Meta-Analyse), welche die Radarexposition und verschiedene Gesundheitsauswirkungen einschließlich Krebs an verschiedenen Stellen, Auswirkungen auf die Reproduktion und andere Krankheiten untersuchten. In diesen epidemiologischen Studien lag das Expositionsniveau laut Aussage des Autorenteams in den meisten Situationen unterhalb der von ICNIRP empfohlenen Begrenzung der Exposition. Sie erbrachten kaum Hinweise auf einen Zusammenhang mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen. Nur eine kleine Anzahl von Studien berichteten über Zusammenhänge, wobei verschiedene methodische Probleme bestanden. So war das Hauptproblem der Kohortenstudien, dass die Größe der Exposition nicht erhoben wurden und die Analyse nur auf der Berufsbezeichnung („job title“) als Expositionssurrogat beruhten. Das führt einerseits zu erheblichen Fehlern in der Expositionsabschätzung, andererseits werden damit verschiedene Berufsgruppen miteinander verglichen, die sich auch in Bezug auf andere Risikofaktoren unterscheiden. So haben mehrere Studien Radar-exponierte Militärangehörige mit der allgemeinen Bevölkerung verglichen. Dabei ist zu erwarten, dass Militärdienstleistende im Durchschnitt gesünder als die Allgemeinbevölkerung sind („healthy worker effect“).

Karipidis et al. (2021) diskutieren auch eine Reihe von Fall-Kontrollstudien, die den Zusammenhang zwischen Exposition durch Radar und Hodenkrebs oder Tumoren in den Augen untersucht haben. Teilweise sind erhöhte Risiken beobachtet worden, aber da die Exposition retrospektiv selbst berichtet war und nicht quantifiziert, könnten die Ergebnisse durch Recall-

Bias verfälscht sein. Fall-Kontrollstudien zu anderen Tumoren wie Hirntumore, Hodgkin-Lymphome sowie Krebs allgemein fanden meistens keine Zusammenhänge.

In zwei von drei Querschnittsstudien zu Spermienqualität wurden Unterschiede zwischen Radar-Exponierten und Nicht-Exponierten gefunden. Weitere Studien zur männlichen Fertilität und Schwangerschafts-bezogene Auswirkungen waren ebenfalls inkonsistent.

Epidemiologische Studien zu anderen Erkrankungen waren selten. Einige wenige beobachtende Studien haben Unterschiede bei physiologischen Parametern gefunden. Diese Studien hatten aber ein hohes Risiko für Bias.

In einer im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Umwelt (BAFU) erstellten und im Mai 2025 veröffentlichten Literaturstudie haben Mevissen et al. (2025) Studienergebnisse zu biologischen Effekten elektromagnetischer Felder im Frequenzbereich 5,8 GHz bis 200 GHz und Konsequenzen für die Gesundheit zusammengefasst. Ziel der Studie war es, die Auswirkungen einer solchen Exposition bei Labortieren, Menschen und Zellkulturen systematisch zu erfassen und zu bewerten. Dabei beziehen sich die relevanten biologischen Wirkungen in erster Linie auf Krebsentstehung, neurologische Erkrankungen sowie Hautkrankheiten. Sie umfassen aber auch andere biologische Funktionen, wie Reproduktion und Fertilität, entwicklungsbezogene, kognitive und physiologische Aspekte, sowie Mechanismen, die bei verschiedenen Prozessen eine Rolle spielen, wie oxidativer Stress und Zelltod. Die Methodik des Berichts folgt im Wesentlichen der eines systematischen Reviews. Die Studien wurden durch systematische Abfragen in den Datenbanken MEDLINE (PubMed), „Science Citation Index Expanded und Emerging Sources Citation Index“ (Web of Science), und dem EMF-Portal ermittelt. Unter Berücksichtigung der PECO-Kriterien („Population, Exposure, Comparison, Outcome“, vgl. Kapitel 7) für systematische Reviews wurden Artikel aus wissenschaftlichen Zeitschriften und öffentlich verfügbare Berichte von Regierungsbehörden einbezogen, die Originaldaten zu Tier- und Zelluntersuchungen mit Exposition durch HF-EMF im Frequenzbereich von 5,8-200 GHz enthielten. Für den Bericht hat das Autorenteam Studien berücksichtigt, die ab dem Jahr 2019 bis August 2024 veröffentlicht wurden. Für die Diskussion möglicher gesundheitlicher Auswirkungen wurden auch die Ergebnisse von Studien, die vor 2019 veröffentlicht wurden, einbezogen. Die Methoden und Ergebnisse der in Frage kommenden Studien wurden entsprechend der PRISMA-Richtlinien dargestellt. Die Studienbewertung erfolgte nach der vom „Office of Health Assessment and Translation“ (OHAT) des amerikanischen National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS) entwickelten Risikoanalyse „Risk of Bias“ (RoB). Die Autorinnen und Autoren bemerken:

> „Die abschließende Bewertung der Konfidenz in die experimentellen Evidenzen und somit die Verlässlichkeit der Risikoabschätzung der jeweiligen biologischen Wirkung der HF-EMF-Exposition im MMW-Bereich wurde anhand des sogenannten GRADE-Ansatzes („Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation“)[5], wiederum nach OHAT, mit entsprechenden Überlegungen durchgeführt“.

In die qualitative Analyse wurden 56 Studien eingeschlossen (29 In-vivo-Studien und 28 In-vitro-Studien), wobei die meisten Studien im Frequenzbereich 5,8 GHz bis 29 GHz (n = 16 in vivo, n = 10 in vitro) untersucht haben, gefolgt von 50 GHz bis 100 GHz (n = 5 in vivo, n = 13 in vitro), 101 GHz bis 200 GHz (n = 3 in vivo, n = 6 in vitro) und 30 GHz bis 49 GHz (n = 3 in vivo, n = 3 in vitro). Bei genauerer Betrachtung haben von den 29 In-vivo-Studien neun ausschließlich Frequenzen außerhalb des FR2 untersucht. Weitere sechs Studien wurden nicht

[5] https://www.gradeworkinggroup.org

an Säugetieren durchgeführt. Von den 28 In-vitro-Studien haben 12 Effekte von Expositionen durch Frequenzen außerhalb des FR2 untersucht.

Die Autorinnen und Autoren nehmen folgende RoB-Bewertung vor:

> „In 20 In-vivo-Studien wurden signifikante Einschränkungen hinsichtlich der Exposition und der Dosimetrie festgestellt; für 19 Studien wurde der „RoB“ als „wahrscheinlich hoch“ und in einer Studie sogar als „definitiv hoch“ eingestuft“.

Vierzehn In-vivo-Studien weisen auch Einschränkungen bei der Temperaturbewertung auf. In zehn Studien wurde der Expositionskontrast, also zwischen HF-EMF-exponierten und scheinexponierten Tieren als wahrscheinlich unzureichend oder unzureichend bewertet. Laut den Autorinnen und Autoren ergaben sich ähnliche Bewertungen mit Einschränkungen in verschiedenen Domänen auch für die In-vitro-Studien.

Im Hinblick auf gesundheitsrelevante Effekte wurden Studienergebnisse in folgenden acht Bereichen diskutiert:

- Karzinogenese, neurodegenerative und andere neurologische Erkrankungen,
- Krankheiten/Auswirkungen auf die am stärksten exponierten Organe wie Haut und Augen, einschließlich thermischer Wirkungen,
- Kardiovaskuläre und immunologische Erkrankungen,
- Fruchtbarkeit, Fortpflanzung und Entwicklungsprozesse,
- Zelluläre Vitalität, Proliferation und Seneszenz,
- Stressreaktion und (zelluläre) Homöostase,
- Genetische und epigenetische Integrität (Transkriptomik/Proteomik),
- Studien am Menschen, die neben Merkmalen der Gesundheit auch die Wahrnehmung einschließen.

Zusammenfassend kamen Mevissen et al. (2025, S. 45/46) bei Berücksichtigung aller Studien, also auch derer, die Frequenzen außerhalb des FR2 untersucht haben, zu folgender Bewertung:

> „Die Studien zu thermischen Wirkungen von MMW zeigen einen Anstieg der Temperatur bei den Labortieren in Abhängigkeit der Frequenz sowie der Intensität. Die Datenlage erlaubt keine Aussagen zu möglichen Schwellenwerten, es gibt jedoch Hinweise, dass ein lokaler Temperaturanstieg von 1°C von Probanden (Menschen) detektiert werden kann. Die Daten einiger Studien zeigen auch, dass insbesondere gepulste HF-EMF-Exposition ein interessantes Instrument für die Krebstherapie bei oberflächlichen Hauttumoren sein könnte.
>
> Einige der In-vivo-Studien geben Hinweise auf Beeinträchtigung des Lernverhaltens sowie strukturelle Veränderungen im Gehirn, die teilweise auch mit oxidativem Stress einhergehen, wie bereits bei niedrigeren Frequenzen (< 5.8 GHz) beobachtet wurde. Bei höheren Frequenzen im MMW-Bereich (< 60 GHz) gab es Hinweise für eine veränderte Aktivität von Neuronen, welche allerdings in beide Richtungen ging. Hinweise aus In-vitro-Studien zeigten eine erhöhte Permeabilität von Zellmembranen nach Exposition bei > 60 GHz, welche durch oxidativen Stress bedingt sein könnte. Genanalysen stützen teilweise die beobachteten Veränderungen von neuronaler sowie metabolischer Funktionen von Zellen.
>
> Effekte von MMW auf die Krebsentstehung sind aufgrund der Daten aus In-vitro-Studien zur Gentoxizität unwahrscheinlich, wobei dahingehend nur eine Tierstudie zu

Tumoren der Unterhaut publiziert wurde, die aber erhebliche Mängel in der Studienqualität (in drei RoB Domänen) aufweist. Es gibt erste Hinweise auf Beeinträchtigung der Reproduktion aus einer Mehrgenerationen-Studie mit Fadenwürmern, die wahrscheinlich auf oxidativen Stress zurückzuführen ist. Allerdings fehlen dazu Studien in Säugetieren.

Eine Aussage zur Dosisabhängigkeit kann nicht getroffen werden, da einerseits Studien dazu fehlen und selten vergleichbare experimentelle Endpunkte evaluiert wurden und andererseits die Dosimetrie und Expositionscharakterisierung vieler Studien zu mangelhaft ist, um daraus verlässliche Dosis-Wirkung-Korrelationen abzuleiten. Insgesamt sind sehr viele der publizierten Studien mit erheblichen Mängeln, 46 insbesondere der Exposition sowie der Dosimetrie, behaftet, deren Ergebnisse keine kausalen Schlussfolgerungen zulassen."

4.1.2 Stellungnahmen von Expertengremien mit offiziellem Mandat und von Behörden zu biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von Expositionen im FR2-Frequenzbereich

Expertengremien mit offiziellem Mandat und von Behörden aus den Niederlanden und Frankreich haben Stellungnahmen zu biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von Expositionen im FR2-Frequenzbereich erarbeitet.

Der in der Stellungnahme der SSK (SSK 2021) zum Thema *Elektromagnetische Felder des Mobilfunks im Zuge des aktuellen 5G-Netzausbaus – Technische Aspekte und biologische Wirkungen im unteren Frequenzbereich (FR1, bis ca. 7 GHz)* bereits ausführlich diskutierte Bericht zu gesundheitlichen Effekten von 5G des Health Council of the Netherlands (2020a, 2020b) hat auch den Frequenzbereich 40 GHz bis 60 GHz berücksichtigt. Für den Report hat der Ausschuss Daten aus Studien über den Zusammenhang zwischen gesundheitlichen Folgen und der Exposition durch elektromagnetische Felder in drei Frequenzbändern analysiert, darunter der Frequenzbereich 20 GHz bis 40 GHz. Studien mit Expositionen oberhalb des geltenden Grenzwertes, bei denen es zur Erwärmung des Körpers oder von Körperteilen kommen kann, wurden nicht berücksichtigt. Dies gilt auch für Studien zu therapeutischen Wirkungen. Die Literatursuche ergab, dass für die Frequenz von 26 GHz keine experimentellen Daten vorliegen. Da einige Radarsysteme auch Frequenzen von etwa 26 GHz verwenden (z. B. 24 GHz ist eine Frequenz, die von Radar-Geschwindigkeitsmessgeräten der Polizei verwendet wird), hat der Ausschuss eine Bestandsaufnahme von Studien mit Personen gemacht, die mit solchen Radarsystemen arbeiten oder sich in deren Nähe aufhalten. Viele dieser Studien können jedoch nicht verwendet werden, weil die Radarsysteme Frequenzen außerhalb des Bereichs von 20 GHz bis 40 GHz verwendeten oder weil in den Studien nicht angegeben wurde, welche Radarsysteme oder Frequenzen verwendet wurden. Insgesamt kommt der Health Council of the Netherlands (2020b) zu dem Schluss, dass die Auswirkungen der Exposition durch elektromagnetische Felder mit Frequenzen um 26 GHz bei Werten unterhalb der von ICNIRP empfohlenen Begrenzung der Exposition in experimentellen Studien erforscht werden sollten. Aufgrund der geringen Eindringtiefe sollte die Forschung sich auf die Wirkungen konzentrieren, die von der Haut ausgehen, einschließlich der Auswirkungen auf Komponenten des Immunsystems und des Nervensystems, die sich in der Haut befinden. Da so gut wie nichts über die Auswirkungen der Exposition bei 26 GHz bekannt ist, empfiehlt der Ausschuss, die Nutzung dieses Frequenzbandes für 5G zu verschieben, bis die Forschungsergebnisse vorliegen.

Die französische Behörde für Lebensmittelsicherheit, Umweltschutz und Arbeitsschutz ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) hat auf eine Anfrage der Ministerien für Gesundheit, Umwelt und Wirtschaft (ANSES Opinion

Request No 2019-SA-0006) im Februar 2022 ein umfassendes Update ihrer Bewertung der *Exposition aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie „5G“* (Exposition durch Felder elektromagnetischer Strahlung im Zusammenhang mit der Einführung der „5G“-Technologie) vorgelegt (ANSES 2022a). Dieser Report in französischer Sprache basiert auf einer umfassenden Analyse von Originalarbeiten. Ein 25 Seiten umfassendes englisches Summary der Stellungnahme liegt vor (ANSES 2022b).

Neben einer Beschreibung der Merkmale und der Art der ausgesendeten Signale waren eine Bewertung der Exposition der Bevölkerung im Zusammenhang mit der 5G-Mobilfunktechnologie sowie eine Überprüfung des vorhandenen Wissens über die gesundheitlichen Auswirkungen im Zusammenhang mit der Exposition durch elektromagnetische Felder in den Frequenzbändern 3,5 GHz und 26 GHz beauftragt. Gemeinsam mit der French National Frequency Agency (ANFR) wurden einige Dokumente publiziert (ANSES 2019, ANSES 2021a, ANSES 2021b).

Die Literaturrecherche zu Studien für die Frequenzbereiche erstreckte sich auf den Zeitraum zwischen Januar 2012 und Juli 2020. Eine Reihe von Studien, die zwischen Juli 2020 und März 2021 veröffentlicht wurden, wurden ebenfalls einbezogen, wenn sie relevant und von zufriedenstellender Qualität waren. Die für diese Expertenbewertung verwendeten Suchmaschinen waren Scopus und PubMed. Einige interessante Referenzen, die später in der öffentlichen Konsultation genannt wurden, wurden ebenfalls berücksichtigt. Bei den für die Bewertung durch die Sachverständigen herangezogenen Publikationen handelte es sich um wissenschaftliche Artikel und Fachzeitschriften, die in englischer oder französischer Sprache in Fachzeitschriften mit Peer-Review veröffentlicht wurden. Die beiden für die Literaturrecherche berücksichtigten Frequenzbänder waren 3 GHz bis 4 GHz und 18 GHz bis 100 GHz, wobei in dieser Stellungnahme lediglich die Ergebnisse für den höheren Frequenzbereich berücksichtigt wurden.

Für den Frequenzbereich um 26 GHz hat die Arbeitsgruppe alle identifizierten Veröffentlichungen zu Frequenzen zwischen 18 GHz und 100 GHz berücksichtigt. Die in der Literatur verfügbaren Daten sind begrenzt. Dennoch wurden diese für die Bewertung der möglichen gesundheitlichen Auswirkungen einer Exposition im 26-GHz-Frequenzband herangezogen. Sie beziehen sich hauptsächlich auf Radaranwendungen oder Geräte, die zu therapeutischen Zwecken eingesetzt werden. Diese Informationen wurden durch biophysikalische Daten über die Besonderheiten der Wechselwirkungen dieser Frequenzbänder mit dem menschlichen Körper ergänzt.

Die für den Frequenzbereich 18 GHz bis 100 GHz identifizierte wissenschaftliche Literatur untersucht hauptsächlich die Wirkungen auf die Haut, die Augen, die Membranen, das zentrale Nervensystem und die Zellen verschiedener menschlicher oder tierischer Gewebe (Haut, Neuronen, Hornhaut usw.). Die Ergebnisse werden von ANSES (2022b) wie folgt kurz zusammengefasst, wobei hier die Anzahl der Studien sowie zum Teil Angaben zur Stärke der Exposition aus ANSES (2022a) soweit möglich ergänzt wurden:

> *Haut*
> Die für den Frequenzbereich 18 GHz bis 100 GHz verfügbaren Studien sind methodisch vielfältig und in ihrer Anzahl sehr klein. Insgesamt basieren die Schlussfolgerungen auf neun Studien an menschlicher Haut, wobei die Mehrzahl der Studien von derselben Forschungsgruppe stammt. In sieben dieser Studien wurden Leistungsdichten von 1,8 mW cm^{-2} bis 20 mW cm^{-2} angegeben. Es wurden keine gentoxischen Wirkungen berichtet, obwohl in einer Studie eine Aneuploidie beobachtet wurde. Es wurde keine allgemeine Wirkung auf das Transkriptom festgestellt, abgesehen von einer vorübergehenden Wirkung (die etwa einige Stunden anhielt) auf die Menge der Transkripte einiger Gene, die an der zellulären Stressreaktion beteiligt sind. Aus diesen Ergebnissen

können keine Schlussfolgerungen darüber gezogen werden, ob die Exposition durch elektromagnetische Felder mit Frequenzen von 18 GHz bis 100 GHz schädliche Wirkungen auf die menschliche Haut hat oder nicht.

Augen
Basierend auf den Ergebnissen von insgesamt fünf Veröffentlichungen kam ANSES (2022b) zu dem Ergebnis, dass die an Hornhaut- und Linsenzelllinien durchgeführten Studien keine gesundheitlichen Auswirkungen der Exposition durch Hochfrequenzfelder bei 40 GHz und 60 GHz zeigen. Eine In-vivo-Studie an Kaninchen zeigte thermische Wirkungen auf die Hornhaut bei einer Exposition mit sehr hoher Leistungsdichte (10 mW cm^{-2} bis 600 mW cm^{-2}).

Zentrales Nervensystem
Insgesamt sechs Studien konzentrieren sich in erster Linie auf die mögliche schmerzlindernde Wirkung von Hochfrequenzfeldern (42 GHz, 60 GHz und 94 GHz und Leistungsdichten < 17 mW cm^{-2}) und deren Mechanismen. Aus den verfügbaren Daten (nur eine Studie am Menschen; Partyla et al. (2017), siehe Abschnitt 4.3.2) können keine Schlussfolgerungen darüber gezogen werden, ob es eine Wirkung auf die Nozizeption, d. h. die Wahrnehmung von Schmerzen oder Analgesie, d. h. die Aufhebung der Schmerzempfindung, gibt. Darüber hinaus können In-vitro-Daten von Neuronen in Kulturen verschiedener Tierarten nicht verwendet werden, um Rückschlüsse auf einen bestimmten Mechanismus zu ziehen. In ANSES (2022b) wurde angemerkt, dass die Arbeitsgruppe keine Artikel über die möglichen Wirkungen von Millimeterwellen auf die Aktivität von Nervenenden in der Haut gefunden hat, obwohl es sehr sinnvoll erscheine, diese Art von Wirkung zu untersuchen.

Gentoxische Wirkungen
In vier Ex-vivo- oder In-vitro-Studien an menschlichen Zelllinien (Fibroblasten, d. h. spezielle Zellen des Bindegewebes, sowie Hornhaut- und Linsenzellen des Auges) und Rattenleukozyten wurde keine gentoxische Wirkung der Exposition durch elektromagnetische Felder mit Frequenzen zwischen 25 GHz und 60 GHz und Leistungsdichten zwischen 100 µW cm^{-2} bis 1 mW cm^{-2} festgestellt. Allerdings wurden in einer bereits im Abschnitt „Haut“ zitierten Studie Aneuploidien (d. h. Abweichung von einem Chromosomensatz) in exponierten Fibroblasten festgestellt. Es ist nicht möglich, aus den vorliegenden Erkenntnissen auf eine gentoxische Wirkung zu schließen.

Wirkungen auf Membranen
Die Anzahl der Studien über Zellmembranen ist laut ANSES (2022b) gering und sie sind sehr unterschiedlich. Es wurden 17 Publikationen mit ausreichender Qualität identifiziert. Eine dieser Studien zeigte eine Erhöhung der Membranpermeabilität in einer Zelllinie. Darüber hinaus haben Studien an künstlichen Membranen gezeigt, dass die Exposition durch elektromagnetische Felder bei Frequenzen zwischen 52 GHz und 78 GHz sowohl zu strukturellen als auch zu funktionellen Veränderungen führt (strukturelle Veränderung der Phospholipide und der Anordnung der an die Grenzfläche gebundenen Wassermoleküle; Verschiebung der Phasenübergangstemperatur). Angesichts der Ergebnisse dieser Studien gibt es einen begrenzten Grad an Evidenz für die Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Zellmembranen.

ANSES (2022b) weist noch einmal explizit darauf hin, dass *gesundheitliche* Auswirkungen von *biologischen* Wirkungen zu unterscheiden sind. Biologische Wirkungen sind molekulare, zelluläre oder physiologische Veränderungen als Reaktion auf einen Stimulus. Eine biologische Wirkung liegt innerhalb der Grenzen der Fähigkeit eines Organismus, das Gleichgewicht seiner inneren Umwelt (Homöostase) als Reaktion auf äußere Belastungen aufrechtzuerhalten, und ist

in der Regel reversibel. Das Vorhandensein einer biologischen Wirkung, insbesondere unter experimentellen Bedingungen, bedeutet nicht unbedingt, dass eine Schädigung folgt, und noch weniger, dass sie zu einer gesundheitlichen Beeinträchtigung führt.

Vor diesem Hintergrund fasst ANSES (ANSES 2022b, 2022a) zusammen, dass die derzeit verfügbaren Daten nicht ausreichen, um belastbare Schlussfolgerungen über das Vorhandensein gesundheitsschädlicher Auswirkungen im Zusammenhang mit der Exposition durch elektromagnetische Felder im Frequenzband um 26 GHz (10 GHz bis 100 GHz) zu ziehen.

Da für den Frequenzbereich um die 26 GHz (18 GHz bis 100 GHz) wenige Studien vorliegen, die Eindringtiefe der Felder in den Körper sehr gering ist und die Energiedeposition an der Oberfläche erfolgt, werden folgende Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen gegeben (ANSES 2022b, 2022a):

- Durchführung weiterer Studien im 26 GHz-Frequenzband in chronischen oder akuten Expositionssituationen;
- Analyse der biologischen Wirkungen und der Gesundheitsrisiken bei Tieren, wobei die am stärksten exponierten Organe, insbesondere die Haut und die Augen, untersucht werden sollen;
- Förderung von Studien zu Wirkungen von Millimeterwellen auf die Hautflora: Mikroorganismen, die Teil des Immunsystems sind und zur Gesundheit der Haut und des Körpers beitragen, indem sie eine Schutzbarriere gegen pathogene Keime bilden; Untersuchung der adaptiven Immunantwort; Untersuchung der Wirkungen auf die zelluläre Mikroumgebung;
- Durchführung vertiefter Studien, um die an künstlichen Membranen gemachten Beobachtungen mit denen an natürlichen Membranen ganzer Zellen zu verknüpfen;
- Förderung von Studien an In-vitro-Modellen (Haut, Hornhaut, Bindehaut usw.) zur Messung von Parametern wie Lebensfähigkeit der Zellen und Gentoxizität. Es wäre sinnvoll, globale „Omics“-Ansätze ohne gezielte Annahmen umzusetzen (Transcriptomics, Proteomics, Metabolomics, Lipodomics, Epigenomics) und letztlich
- Analyse der langfristigen Auswirkungen von Hochfrequenzen auf das Nervensystem (Verhalten, Neurophysiologie, Nozizeption) beim Menschen und/oder in Tiermodellen.

ANSES (ANSES 2022b, 2022a) weist darauf hin, dass weitere Studien strengen Qualitätskriterien folgen sollten (z. B. einschließlich einer Kontrollgruppe für den thermischen Effekt), um die möglichen biologischen Wirkungen der intermittierenden Signale einiger drahtloser Technologien zu untersuchen. Darüber hinaus wird die Durchführung von Studien empfohlen, in denen die gleichzeitige Exposition durch elektromagnetische Felder und anderen physikalischen oder chemischen Einwirkungen berücksichtigt wird.

4.2 Epidemiologie

Seit dem Review der epidemiologischen Studien im Millimeterwellenbereich von Karipidis et al. (2021) sind nur zwei weitere Studien im relevanten Frequenzbereich publiziert worden. Sie wurden mittels einer Suche nach epidemiologischen Studien im EMF-Portal identifiziert, die

auch das Stichwort „Radar“ umfasste.[6] Beide untersuchten Krebsraten bei Militärdienstleistenden in Israel, welche durch Radaranlagen exponiert wurden. Shapira et al. (2023) führten eine retrospektive Kohortenstudie zwischen 2009 und 2018 durch. Dabei wurde die Krebsinzidenz für alle Ursachen sowie für verschiedene Tumorarten zwischen Angehörigen der Flugabwehr mit einer ähnlichen soziodemografischen Gruppe von Soldaten ohne Exposition verglichen. In Bezug auf die Millimeterwellen-Exposition wurde nur beschrieben, dass die Angehörigen der Flugabwehr durch Radarsysteme unterhalb von 25 W m^{-2} (50 % der ICNIRP-Empfehlung für berufliche Exposition) exponiert worden seien. Alle weiteren Informationen unterliegen laut Angaben der Autorinnen und Autoren der militärischen Geheimhaltung. Während einer mittleren Nachbeobachtungszeit von 4,8 Jahren wurden bei den 3 825 exponierten Personen 13 Tumore und bei den 11 049 nicht-exponierten Personen 28 Tumore identifiziert. Damit ergab sich eine Odds Ratio (OR) von 1,34 (95 % KI: 0,70-2,60), welche nicht statistisch signifikant ist (p-Wert = 0,38). Adjustierung der Analysen für Geschlecht, Alter bei der Einschreibung, Dienstdauer, sozioökonomischen Status und militärischen Beruf ergab praktisch dieselben Resultate. Jüngeres Alter bei Dienstantritt war unabhängig von der Exposition mit einer höheren Krebsinzidenz assoziiert (OR=1,13 [95 % KI: 1,04-1,23]), während eine längere Dauer der Nachbeobachtung negativ assoziiert war (OR = 0,87 [95 % KI: 0,77-0,99]). Tumorspezifische Analysen ergaben für die exponierte Gruppe einen Trend zu höheren Inzidenzen für hämatologische Tumoren und Hodenkrebs (OR = 2,76 [95 % KI: 0,62-12,19 bei je vier Fällen in beiden Gruppen] und OR = 7,2 [95 % KI: 0,71-73,8] basierend auf drei exponierten und einem nicht-exponierten Fall), welche aber aufgrund der geringen Fallzahlen nicht signifikant waren.

Peleg et al. (2023) publizierten einen Bericht über 46 Patienten und Patientinnen, welche zwischen 2002 und 2021 eine Krebsdiagnose erhielten, in der israelischen Armee dienten und berichteten, dass sie an einem Radar oder anderen drahtlosen Kommunikationseinrichtungen arbeiteten bzw. in der Nähe davon Dienst hatten. Sie wurden identifiziert, weil sie sich an eine ehrenamtliche NGO wandten, deren Aufgabe es ist, Krebspatienten bei administrativen sowie rechtlichen und sozialen Belangen zu helfen. 19 von den 46 Patienten und Patientinnen hatten einen hämatologischen Tumor. Dies entspricht einem Anteil von 41,3 %, 95 % KI (27 % bis 57 %), gegenüber einem erwarteten Anteil von 22,7 % für ein Kollektiv mit dieser Alters- und Geschlechtsverteilung. Dabei war die relative Häufigkeit für das Hodgkin-Lymphom (21,7 % beobachtet vs. 11,6 %) und Sarkom (15,2 % beobachtet vs. 7,0 % erwartet) statistisch signifikant erhöht. Zusätzlich wurde eine separate Analyse von einer Gruppe von 250 Soldaten und Soldatinnen gemacht, welche 2011 rekrutiert wurden. Bis 2014 traten in dieser Gruppe fünf Krebsfälle gegenüber 0,22 erwarteten Fällen auf, was statistisch signifikant erhöht ist. Es lagen keine Messungen zur Exposition vor und auch keine Angaben, inwiefern Millimeterwellen bei den selbstberichteten Expositionen eine Rolle spielten. Diese Studie mit einem selbstselektierten Kollektiv hat ein hohes Risiko für Selektionsbias, was die Abweichungen von den erwarteten Zahlen plausibel erklären kann.

Bei beiden israelischen Studien sind die Angaben zur Exposition im Millimeterwellenbereich so dürftig, dass die Studien zum diesbezüglichen potenziellen Risiko nicht informativ sind. Zudem erzeugen leistungsstarke bzw. ältere Radargeräte neben nichtionisierender Strahlung auch Röntgenstrahlung (Radarkommission 2003), was bei beiden Studien ein nicht berücksichtigter Confounder sein könnte.

[6] Suchterm: topic=epidemiological AND frequencyRange=radio_frequency AND year=2020-2024 AND (radar OR millimeter)

4.3 Experimentelle Humanstudien

Da es im Vergleich zum Frequenzbereich FR1 bisher nur sehr wenige experimentelle Humanstudien zu biologischen Wirkungen einer Exposition im FR2-Frequenzbereich gibt, werden deren Ergebnisse im Folgenden im Detail vorgestellt. Nicht berücksichtigt werden klinische Studien an Patienten, in denen Millimeterwellen zu therapeutischen Zwecken eingesetzt wurden. Aufgrund der geringen Eindringtiefe elektromagnetischer Felder des Frequenzbereichs FR2 sind in erster Linie Effekte, die über die Haut bzw. die Augen vermittelt werden, von Interesse. Humanexperimentelle Studien, in denen das menschliche Auge exponiert wird, sind allerdings aus ethischen Gründen nicht vertretbar. Die vorliegenden Studien beschäftigen sich mit der Wahrnehmung entsprechender Felder (Abschnitt 4.3.1), Schwellenwerten für thermischen Schmerz (Abschnitt 4.3.2) sowie kardiovaskulären Effekten (Abschnitt 4.3.3).

Eine tabellarische Zusammenstellung der experimentellen Humanstudien findet sich im Anhang A-1.

4.3.1 Studien zur Wahrnehmung von Feldern

Zur Wahrnehmung von Feldern des FR2 liegen insgesamt drei humanexperimentelle Studien vor (Pakhomov et al. 1998, Blick et al. 1997 und Yuasa et al. 2024). Pakhomov et al. (1998) fassen die Ergebnisse von drei in russischer Sprache veröffentlichten Studien (Lebedeva 1993, Lebedeva 1995, Kotrovskaia 1994) zur Wahrnehmung schwacher Millimeterwellen unter doppelblinden Versuchsbedingungen wie folgt zusammen. Die Versuchsperson befand sich in einem isolierten Raum ohne Kontakt zum Versuchsleiter. Die Außenfläche der Hand wurde 20-mal jeweils für eine Minute exponiert, wobei die Expositionen in einminütigen Abständen durchgeführt und zufällig mit Scheinexpositionen gemischt wurden. Der Beginn und das Ende jeder Verum- und Schein-Befeldung wurden durch Töne signalisiert. Die Versuchsperson musste einen Knopf drücken, wenn sie das Feld spürte. Weder die Versuchsperson noch der Versuchsleiter kannten die Reihenfolge der Verum- und Scheinexpositionen. Richtige und falsche Reaktionen wurden automatisch aufgezeichnet. Die Feldwahrnehmung wurde durch die Reaktionszuverlässigkeit (der Prozentsatz der richtig erkannten Verum-Expositionen) und das Falschalarmniveau (der Prozentsatz der fälschlicherweise als Verum-Exposition erkannten Befeldungen) charakterisiert. Eine Versuchsperson wurde als fähig eingestuft, das Feld zu erkennen, wenn die Reaktionszuverlässigkeit konstant und statistisch signifikant über dem Fehlalarmwert lag. Bei verschiedenen Frequenzen (37,7 GHz, 42,25 GHz und 53,57 GHz), Intensitäten (von 5 mW cm^{-2} bis 15 mW cm^{-2}) und Bandbreiten wurde die Strahlung von 30 % bis 80 % der Versuchspersonen erkannt. Die 37,7-GHz-Strahlung bei 15 mW cm^{-2} wurde von weit weniger Personen erkannt als die bei 42,25 GHz und 5 mW cm^{-2}. Die Reaktionslatenz lag in der Regel zwischen 40 s und 50 s. Es wurde vermutet, dass einige Arten von Mechanorezeptoren und Nozizeptoren an der Wahrnehmung der Felder beteiligt sein könnten.

In der Studie von Blick et al. (1997) wurden die Intensitäten, bei der eine Exposition durch 2,45 GHz, 7,5 GHz, 10,0 GHz, 35 GHz und 94 GHz wahrgenommen wurde, an 15 gesunden Teilnehmenden (keine Angaben zum Geschlecht) im mittleren Alter von 45,2 ± 6,0 Jahren untersucht. Zur Ermittlung des Schwellenwertes für die Wahrnehmung wurde ein modifiziertes Staircase-Verfahren verwendet: Für jede Frequenz wurden 20 gleichmäßig verteilte Stimulus-Intensitätsstufen ausgewählt, so dass die niedrigste Intensität für die empfindlichste Testperson unterhalb der Schwelle und die höchste Intensität für die am wenigsten empfindliche Testperson oberhalb der Schwelle lag. Stimuliert wurde in der Mitte des Rückens aus einer Entfernung von 20 cm bis 70 cm. Zum Vergleich wurde eine Stimulation mit Infrarotstrahlung durchgeführt. Für den FR2 (hier 35 GHz) ließ sich folgende Wahrnehmungsschwelle beobachten: 8,8 mW cm^{-2} (± 1,3 mW cm^{-2}; Standardfehler). Für niedrigere Frequenzen (2,45 GHz, 7,5 GHz

und 10 GHz) variierte die Wahrnehmungsschwelle von 63,1 mW cm^{-2} ± 6,7 mW cm^{-2} (2,45 GHz) über 19,5 mW cm^{-2} ± 2,9 mW cm^{-2} (7,5 GHz) bis 19,6 mW cm^{-2} ± 2,9 mW cm^{-2} (10 GHz). Bei einer Exposition bei 94 GHz sank die Wahrnehmungsschwelle auf 4,5 mW cm^{-2} ± 1,1 mW cm^{-2} und war mit der von Infrarotstrahlung vergleichbar (5,34 mW cm^{-2} ± 1,1 mW cm^{-2}). Die Ergebnisse zeigten, dass die Sensitivität über den getesteten Frequenzbereich monoton stieg. Der Schwellenwert bei 94 GHz war um mehr als eine Größenordnung niedriger als bei 2,45 GHz.

Eine Studie von Yuasa et al. (2024) untersuchte die Zuverlässigkeit der Bestimmung der Schwelle für thermische Empfindung. Dazu wurden 20 gesunde Versuchsteilnehmer und -teilnehmerinnen (16 Männer und 4 Frauen) im Alter von 35,2 ± 3,0 Jahren (Mittelwert ± Standardabweichung) an der Fingerspitze des linken Zeigefingers durch elektromagnetische Felder (28 GHz) bei variierender Exposition (Leistungsdichte: 27 mW cm^{-2}, 126 mW cm^{-2}, 191 mW cm^{-2}, 252 mW cm^{-2} und 399 mW cm^{-2}) exponiert. Vor den experimentellen Durchgängen wurde im Rahmen einer Eingewöhnung die Fingerspitze des linken Zeigefingers bei einer Leistungsdichte von 191 mW cm^{-2} exponiert. Wenn keine Wärmeempfindung berichtet wurde, wurde der Versuch mit einer Leistungsdichte von 252 mW cm^{-2} wiederholt. Eine Minute vor der Exposition wurde die Hauttemperatur als Ausgangswert gemessen. Durch Drücken einer Computermaus mit der rechten Hand wurde vom Versuchsteilnehmer bzw. der Versuchsteilnehmerin eine Empfindung protokolliert, was zur Beendigung der Exposition führte. Nach spätestens drei Minuten ohne Wahrnehmung wurde der Durchgang vom Versuchsleiter beendet. Nach Beendigung der Exposition wurde die Temperatur an der Fingerspitze in Abständen von einer Minute gemessen. Der nächste Versuch wurde gestartet, wenn die die Hauttemperatur wieder auf den Ausgangswert (± 1 °C) gesunken war. Ein Testdurchgang bestand aus fünf Versuchen, in denen die Leistungsdichte randomisiert zugeordnet wurde. Nach einer kurzen Pause von 60 Sekunden wurde der gesamte Testdurchgang wiederholt. Zur Bewertung der Zuverlässigkeit der Schwellen für eine Wärmewahrnehmung wurden für die zwei Durchgänge für jede Exposition der Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) berechnet. Für die Expositionen bei 126 mW cm^{-2} bis 399 mW cm^{-2} lag die mittlere Schwelle zur Wahrnehmung nahezu konstant bei 0,9 °C bis 1,0 °C, während sie für die 27-mW cm^{-2}-Expositionsbedingung bei 0,2 °C lag. Die Geschwindigkeit des Temperaturanstiegs nahm mit steigendem Expositionsniveau zu, außerdem war die Reaktionszeit kürzer, je höher das Expositionsniveau war. Die ICCs für den Schwellenwert bei 27 mW cm^{-2} und 126 mW cm^{-2} wurden als schlecht bis ausreichend interpretiert, während die Werte bei höheren Expositionsniveaus mittelmäßig bis beachtlich waren. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Schwellenwert für das Wärmeempfinden bei etwa 1,0 °C liegt und über alle Expositionsniveaus hinweg konsistent ist, während seine Zuverlässigkeit mit höheren Expositionsniveaus zunimmt.

4.3.2 Studien zu Schwellenwerten für thermischen Schmerz

Insgesamt wurde die Wirkung der Exposition durch elektromagnetische Felder des Frequenzbereichs FR2 in drei Studien untersucht, wobei alle drei auch Effekte auf das kardiovaskuläre System berücksichtigten.

Radzievsky et al. (1999) führten eine prospektive doppelblinde, randomisierte Cross-over-Studie zur Bewertung der schmerzlindernden Wirkung von Millimeterwellen (42,25 GHz, 25,5 mW cm^{-2}) unter experimentellen Bedingungen durch. Als Modell für tonische Schmerzen wurde der Kaltwassertest (Cold Pressure Test, CPT) verwendet. Dabei wurde nach anfänglicher Messung des Blutdrucks und der Herzfrequenz die nichtdominante Hand zum Ausgleich der anfänglichen Handtemperatur zunächst für zwei Minuten in warmes Wasser (37,0 ± 1,0° C) getaucht. Anschließend tauchten die Teilnehmer ihre geöffnete Hand bis zum Handgelenk in ein Wasserbad (1,0 ± 0,5° C) mit Eis.

Die Teilnehmenden wurden angewiesen, ihre Empfindungen auf einer vor ihnen liegenden Skala zu bewerten, die von der versuchsleitenden Person elektronisch mit Zeitstempel protokolliert wurden. Die Zeit des Eintauchens der Hand in das kalte Wasser wurde als Anfangspunkt (0) registriert. Danach wurden die Zeiten bis zum Auftreten der folgenden Empfindungen aufgezeichnet: kühl, kalt, sehr kalt, Schmerz 1 (der Beginn des Schmerzes) und Schmerz 2 bis Schmerz 10 (unerträglicher Schmerz, Hand-Entzug). Ausgewertet wurden die Zeiten bis zum Erreichen der Stadien Schmerz 1 (Schmerzschwelle) und Schmerz 10 (Schmerztoleranz). Die Schmerzempfindlichkeit wurde als Differenz zwischen den Werten der Schmerztoleranz und der Schmerzschwelle definiert. Nach dem Rückzug der Hand aus dem Wasser wurde mit einem digitalen Thermoelement-Thermometer die niedrigste Temperatur der Handfläche (die in der Regel innerhalb von 5–7 Sekunden angezeigt wurde) und die Temperatur der Handfläche 30 Sekunden nach der Entnahme bestimmt. Gleichzeitig wurden der arterielle Blutdruck und die Herzfrequenz erneut gemessen. An dem Experiment nahmen 12 gesunde männliche Freiwillige teil. Sie wurden durch einen aktiven medizinischen Millimeterwellen-Generator bzw. einen deaktivierten Scheingenerator für 30 Minuten exponiert und sechsmal in einem Abstand von mindestens 24 Stunden zwischen den Expositionen getestet. Zu Beginn wurden drei Baseline-Tests ohne Exposition durchgeführt wobei der erste dieser Tests dazu diente, die Probanden zu trainieren. Die in diesem Test erzielten Ergebnisse wurden nicht in die Datenanalyse einbezogen. Nach den drei Baseline-Tests wurden die Experimente mit Schein- oder Millimeterwellen-Exposition durchgeführt, wobei die Expositionen zufällig zugeordnet wurden. Der letzte Test wurde durchgeführt, um festzustellen, ob die Versuchsteilnehmer eine geringere Empfindlichkeit gegenüber dem Kältereiz als Folge der mehrfachen Tests entwickelt hatten.

Die Exposition durch Millimeterwellen führte zu einer signifikanten ($p < 0,05$) Unterdrückung der Schmerzempfindung. Im Durchschnitt stieg die Schmerztoleranz um 37,7 % und der Schmerzempfindlichkeitsbereich um 49,3 %. Von den 12 Probanden zeigten sieben (58,3 %) eine Erhöhung der Schmerztoleranz unter Verum-Exposition, zwei eine Reduktion und drei keine nennenswerte Veränderung.

Bei den zusätzlich untersuchten Parametern Blutdruck, Herzfrequenz und Temperatur der Handfläche nach dem Entzug der Hand aus dem Wasser wurden keine expositionsbedingten Unterschiede festgestellt. Das Autorenteam schließt aus seinen Ergebnissen, dass die MMW-Therapie möglicherweise als ergänzende oder alternative Behandlung zur Schmerzlinderung eingesetzt werden kann.

Partyla et al. (2017) untersuchten ebenfalls die herabgesetzte Schmerzempfindung (Hypoalgesie) während einer 30-minütigen Exposition durch Millimeterwellen im Frequenzbereich 50 GHz bis 75 GHz. Ähnlich wie Radzievsky et al. (1999) nutzten sie den CPT, um die Wirkung von Millimeterwellen verschiedener Frequenzbereiche auf die Schmerzwahrnehmung zu analysieren. Der Test wurde gemäß den Leitlinien zur Testdurchführung bei Kindern (von Baeyer et al. 2005) durchgeführt. Für die Studie wurden 23 gesunde rechtshändige Männer im Alter von 20 bis 40 Jahren rekrutiert, von denen drei aufgrund ihrer zu langen Responsezeit im CPT (> 2 min) ausgeschlossen werden mussten. Es wurden sechs Versuchsdurchgänge im Abstand von jeweils 24 Stunden durchgeführt. Die Versuchsdurchgänge eins, zwei und sechs waren ohne Exposition. In den Durchgängen drei, vier und fünf wurde die Haut des unteren Teils des Brustbeins randomisiert entweder einer MMW mit einer festen Frequenz von 42,25 GHz (aktiver Generator); einem Signal im Frequenzbereich von 50 GHz bis 75 GHz (Rauschgenerator) oder einem inaktiven Gerät (Placebo-Generator) in einer Crossover-Doppelblindstudie ausgesetzt. Die Generatoren wurden zur Verblindung in einer Metallbox untergebracht und für eine optimale Exposition der Haut bei < 17,2 mW cm^{-2} in einer Entfernung von < 1 cm zur Hautoberfläche ausgerichtet. Die Zeiten bis zum Erreichen der oben bereits genannten Schmerzstufen (ohne die Kategorie: kühl) wurden anhand der verbalen Berichte der

Teilnehmenden mit einer Stoppuhr erfasst. Als primärer Endpunkt wurde die Schmerzschwelle herangezogen. Weitere gemessene Parameter umfassten die CPT-Werte, Herzfrequenz, Blutdruck, das Auftreten subjektiver Empfindungen (Parästhesien) während der Exposition sowie die Qualität der Verblindung der Probanden. Die Ergebnisse unter Exposition bei 42,25 GHz wurden mit den Ausgangswerten, den Ergebnissen bei Exposition bei 50 GHz bis 75 GHz und denen bei Placebo-Exposition verglichen. Während der Exposition durch den 42,25 GHz-Generator stieg die Schmerzschwelle im Vergleich zum Ausgangswert an, mit einer medianen Differenz von 1,97 Sekunden (95 % Konfidenzintervall [CI] = [0,35-3,73], p = 0,064). Für den Rauschgenerator betrug die entsprechende mediane Differenz 1,27 Sekunden (95 % CI = [0,05-2,33], p = 0,092). Die Ergebnisse für den Placebo-Generator zeigten keine Abweichung vom Ausgangswert. Die Zeit bis zum Auftreten von Kälte- und zunehmenden Schmerzempfindungen verlängerten sich unter der Exposition durch den 42,25-GHz-Generator im Vergleich zur Baseline und zum Rauschgenerator. Der diastolische Blutdruck stieg unter Exposition an. Andere Ergebnisgrößen waren zwischen den Studienbedingungen vergleichbar. Das Autorenteam schlussfolgert, dass seine Untersuchungen die Erhöhung des Schwellenwertes zur Schmerzempfindung bei Exposition durch Millimeterwellen niedriger Intensität bestätigen konnten. Allerdings war die Wirkung statistisch nicht von der Placebo-Bedingung zu unterscheiden.

Eine weitere humanexperimentelle Studie zur Wirkung von elektromagnetischen Feldern im Millimeterwellenbereich auf die Schmerzempfindung wurde von Minier et al. (2023) an zehn gesunden Versuchspersonen (sieben Männer und drei Frauen) im Alter von 21 bis 54 Jahren (Mittelwert ± Standardabweichung: 35,2 ± 12,9 Jahre) durchgeführt. Exponiert wurde auf der palmaren Seite des rechten Handgelenks bei einer Frequenz von 61,25 GHz (17 mW cm^{-2}) für 30, 60 und 90 Minuten, zusätzlich erfolgte eine 30-minütige Scheinexposition. Die Studie wurde im Cross-over Design durchgeführt. Die vier Experimente wurden randomisiert im Abstand von jeweils mindesten 24 Stunden durchgeführt. Da die Scheinexposition 30 Minuten dauerte, war eine Verblindung nicht komplett gewährleistet. Die Schmerzschwelle und Schmerztoleranz wurden wie bei Radzievsky et al. (1999) und Partyla et al. (2017) mit dem Cold Pressor Test (CPT) ermittelt, der 20 Minuten nach Ende der Exposition mit der linken Hand durchgeführt wurde. Die Probanden nutzten ihre rechte Hand, um auf einer computerisierten visuellen Analogskala das Ausmaßes des Schmerzes kontinuierlich zu registrieren. Die Herzfrequenz, der Blutdruck und die Hauttemperatur der Versuchspersonen wurden vor und nach der Exposition gemessen. Zur Auswertung wurden die Schmerzschwelle (Zeit bis zum Erreichen eines von Null verschiedenen Wertes auf der visuellen Analogskala) und die Schmerztoleranz (Zeit bis zum Erreichen eines Wertes von 100/Entzug der Hand) herangezogen. Beim paarweisen Vergleich der Verum-Expositionen mit der Scheinexposition ließen sich ausschließlich für die 30-minütige Exposition eine statistisch signifikante Erhöhung der Schmerzschwelle sowie eine Verringerung der Herzfrequenz beobachten. Die Schmerztoleranz, der Blutdruck und die Hauttemperatur waren durch keine der Verum-Expositionen im Vergleich zur Scheinexposition signifikant verändert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in zwei von drei Studien eine statistisch signifikante Erhöhung der Schmerzschwelle bei einer 30-minütigen Expositionen durch elektromagnetische Felder im Millimeterwellenbereich (42,25 GHz, 25,5 mW cm^{-2}; 61,25 GHz, 17 mW cm^{-2}) beobachtet werden konnte. Insgesamt wurden bisher nur sehr kleine Stichproben (n = 10 bis n = 21) mit variierenden Expositionen untersucht. In weiteren Studien (Nelson et al. 2003, Walters et al. 2004, Alekseev et al. 2005) zeigte sich zudem eine Abhängigkeit des resultierenden Temperaturanstiegs in der Haut von der lokalen Durchblutung.

4.3.3 (Weitere) Studien zu kardiovaskulären Effekten

Wirkungen einer Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder des Frequenzbereichs FR2 auf das kardiovaskuläre (Herz-Kreislauf-) System wurden außer von Radzievsky et al. (1999), Partyla et al. (2017) und Minier et al. (2023) (siehe Abschnitt 4.3.2) auch in zwei weiteren Studien aus derselben Arbeitsgruppen (Müller et al. 2004 und Kantz et al. 2005) untersucht.

In beiden Studien wurden die Effekte einer 15-minütigen Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder (Müller et al. 2004: 77 GHz, 3 μW cm^{-2}, Kantz et al. 2005: 5,8 GHz bis 110 GHz, 59,7 μW cm^{-2}) auf das kardiovaskuläre System an jeweils 50 Versuchspersonen untersucht: (Müller et al. 2004: 12 Frauen und 38 Männer im Alter von 18 bis 36 Jahren, die keine kardiovaskulären Erkrankungen aufwiesen; Kantz et al. 2005: 18 Frauen und 32 Männer im Alter von 15 bis 78 Jahren). Das Studiendesign sah eine 30-minütige Vorlaufphase zum Einpendeln eines Gleichgewichts vor, gefolgt von einer 15-minütigen Expositionsphase, einer 15-minütigen Ruhephase ohne Exposition sowie einer weiteren 15-minütigen Expositionsphase mit anschließender weiterer Erholungsphase. Da die Expositionen am selben Tag stattfanden, kann ein Carry-over-Effekt (d. h. die Beeinflussung der Ergebnisse einer experimentellen Intervention durch die davorliegende Intervention – insbesondere bei Scheinexposition nach einer tatsächlichen Exposition) nicht ausgeschlossen werden. Die Stichprobe wurde in zwei Gruppen unterteilt, eine Gruppe begann mit der Verum-Exposition, die andere mit der Scheinexposition.

Über die gesamte Versuchsdauer wurden ein Elektrokardiogramm (EKG) abgeleitet, um die Herzfrequenz sowie verschiedene aus dem EKG abgeleitete Parameter zu bestimmen. Die Atmungsaktivität wurde mithilfe eines leitfähigen Dehnungsbandes um den Brustkorb registriert und als Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit des Dehnungsbandes aufgezeichnet. Die Hauttemperatur wurde mit einem Thermoelement an der rechten Hand gemessen. Zur Messung der Hautleitfähigkeit wurden Ag/AgCl-Elektroden verwendet, die auf zwei Fingerspitzen der linken Hand angebracht waren. Der systolische und diastolische Blutdruck wurde mit einer automatischen Manschette am linken Oberarm gemessen. Alle Messungen wurden während des gesamten Experiments kontinuierlich durchgeführt und automatisch an einen PC für die weitere Analyse übertragen. Alle Experimente wurden in einem Raum mit kontrollierter Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Die Exposition erfolgte durch ein kommerzielles Kfz-Radarsystem. Bei Kantz et al. (2005) bestand die Exposition aus sechs sequentiell angewendeten Frequenzen (5,8 GHz, 12 GHz, 24 GHz, 60 GHz, 77 GHz und 110 GHz), wobei jede Frequenz für 5 ms aktiv war. Die gesamte Sequenz wurde 35mal wiederholt.

Um zu überprüfen, ob ein statistisch signifikanter Expositionseffekt vorlag, wurde eine multivariate Varianzanalyse (MANOVA) durchgeführt. Während der Faktor Zeit (erste und zweite Testhälfte) einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hatte, waren in keinem der untersuchten kardiovaskulären Parameter (die Herzfrequenz, die elektrokardiographischen Parameter, die Atemfrequenz, die Hauttemperatur und die Hautleitfähigkeit sowie für den systolischen und diastolischen Blutdruck) statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen zu beobachten. Die Autorenteams schlossen in beiden Studien aus ihren Ergebnissen, dass die im Experiment verwendeten Millimeterwellen keine physiologisch relevanten Veränderungen der autonomen Nervenaktivität und der kardiovaskulären Funktion verursachen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in zwei der vier oben genannten Studien zu Wirkungen auf das kardiovaskuläre System isolierte Effekte beobachtet wurden, die in den anderen Studien nicht repliziert werden konnten. Insgesamt variieren die Studien hinsichtlich der Exposition (42,25 GHz, 25,5 mW cm^{-2}; 42,25 GHz, 17,2 mW cm^{-2}; 61,25 GHz,

17 mW cm^{-2}; 77 GHz, 3 µW cm^{-2}), der Expositionsdauer (15 min bis 90 min) sowie der Stichprobengröße (n = 10 bis n = 50). Zu beachten ist, dass beobachtete biologische Wirkungen nicht notwendigerweise gesundheitliche Auswirkungen implizieren.

4.4 In-vivo-Studien

In-vivo-Studien sind nützlich, um Informationen über die möglichen Wirkungsmechanismen, die biologische Plausibilität, die Dosisreaktion und die Wirkung einer Exposition zu erhalten. Es wurden viele In-vivo-Studien zu den Auswirkungen von HF-EMF-Expositionen durchgeführt, wobei die Zahl der Studien in dem für 5G FR2 relevanten Frequenzbereich sehr begrenzt ist. Die vorhandenen Studien befassen sich mit Wirkungen auf die Körper- und Hauttemperatur, auf den Augenstatus, auf das Verhalten und auf die Funktion des Immunsystems.

Eine tabellarische Zusammenstellung der im Folgenden erwähnten In-vivo-Studien findet sich im Anhang A-2.

4.4.1 Thermische Wirkungen, insbesondere auf Haut und Auge

Eine Studie von Ijima et al. (2023a) zielte darauf ab, die Beziehung zwischen der absorbierten Leistungsdichte und dem Anstieg der Hauttemperatur in vivo zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde die dorsale Haut von Ratten (männliche Sprague-Dawley-Ratten; n = 6-15 für jede Bedingung) 18 Minuten lang einer kontinuierlichen 26-GHz-Welle mit 0 W m^{-2} bis 500 W m^{-2} (0 W m^{-2}, 125 W m^{-2}, 250 W m^{-2}, 370 W m^{-2}, 500 W m^{-2}) ausgesetzt. Die Haut- (an drei Stellen) und Rektaltemperatur wurde mit einem faseroptischen Thermometer gemessen. Temperaturdaten wurden insgesamt 30 Minuten lang gesammelt (6 Minuten vor, 18 Minuten während und 6 Minuten lang nach der Exposition). Die Hauttemperatur stieg dosisabhängig gleich zu Beginn der Exposition an, mit einem maximalen Anstieg von 11,3°C bei 500 W m^{-2}. Die Beziehung wurde mit einem linearen Regressionsmodell untersucht, welches einen geschätzten Temperaturanstieg von weniger als 5 °C bei einer Exposition bei 200 W m^{-2} ergab. Der Temperaturanstieg hörte sofort auf, als die Exposition beendet wurde. Die Rektaltemperatur stieg nach 4-minütiger Exposition nur bei 370 W m^{-2} und 500 W m^{-2} um 0,6° C an.

In einer zweiten Studie derselben Gruppe (Ijima et al. 2023b) wurde die Beziehung zwischen der Expositionsintensität und der erhöhten Körpertemperatur an Ratten bestimmt und außerdem untersucht, ob die Thermoregulation, einschließlich der Veränderungen des Blutflusses in der Haut, während der Ganzkörperexposition durch MMW verringert wird. Insgesamt wurden 31 männliche Sprague-Dawley-Ratten in der Studie verwendet, wobei die Temperatur mit faseroptischen Thermometern und der Blutfluss mit Doppler-Blutflussmessgeräten gemessen wurde. Die Rücken der nicht betäubten Ratten wurden einzeln in einer Acrylhalterung 50 cm unterhalb einer Linsenantenne 40 Minuten lang mit einer kontinuierlichen 28-GHz-Welle bei 0 W m^{-2}, 8,5 W m^{-2}, 122 W m^{-2} und 237 W m^{-2} bestrahlt. Die entsprechenden berechneten Ganzkörper-SAR-Werte betrugen 0,26 W kg^{-1}, 3,7 W kg^{-1} bzw. 7,2 W kg^{-1}. Sowohl Temperatur- als auch Blutflussmessungen wurden an der Rücken- und Schwanzhaut durchgeführt, mit zusätzlichen Temperaturmessungen im Rektum.

Die Exposition verursachte bei allen Intensitäten einen sofortigen Temperaturanstieg in der Haut, während die rektale Temperatur nach 46 s Exposition zu steigen begann. Der Temperatur-Anstieg blieb während der gesamten Expositionszeit bestehen. Der Blutfluss blieb in der Rückenhaut während der Exposition auf dem gleichen Niveau, stieg aber in der Schwanzhaut linear an, mit einem Faktor von drei bei 237 W m^{-2}. Der Temperaturanstieg in der Rückenhaut betrug 2,7° C und 3,9° C bei 122 W m^{-2} bzw. 237 W m^{-2}. Die entsprechenden Erhöhungen betrugen 4,4° C und 7,4° C für die Schwanzhaut und 0,9° C und 1,3° C im Rektum.

Das Autorenteam schlussfolgerte, dass die Exposition einen anfänglichen Temperaturanstieg in der Rückenhaut verursachte, gefolgt von einem erhöhten Blutfluss in der Schwanzhaut, der die weiteren thermoregulatorischen Systeme aktivierte.

Eine Reihe von Studien von Foroughimehr et al. hat sich mit den Temperatureffekten von HF-EMF-Strahlung in verschiedenen biologischen Modellen beschäftigt. In Foroughimehr et al. (2023) entwickelte das Autorenteam eine mathematische Simulation für die Absorption von MMW durch die Hornhaut, sowohl unter normalen als auch unter pathologischen Bedingungen. Für die Simulationen verwendete es ein 3D-Modell des menschlichen Auges, wobei es einen Tränenfilm auf der Hornhaut mit einer Dicke von 8 µm für den Normalzustand und einen 2 µm dicken Film für den Zustand des trockenen Auges und den pathologischen Zustand annahm. Außerdem wurde der Wassergehalt der normalen Hornhaut auf 80 % und der des trockenen Auges auf 40 % festgelegt. In der Studie wurde dann die Temperaturänderung in den beiden Hornhautmodellen im Frequenzbereich von 30 GHz bis 0,5 THz (ebene Welle; 20 W m^{-2} und 100 W m^{-2}) berechnet. Die 30-GHz-Exposition verursachte laut dem Autorenteam beim normalen Auge einen Temperaturanstieg von 0,02557 °C bei 20 W m^{-2} und einen Anstieg von 0,1278 °C bei 100 W m^{-2}. Für das trockene Auge betrugen die entsprechenden Erhöhungen 0,02575 °C bzw. 0,1288 °C. Die Modellierung zeigte auch eine E-Feld-Verteilung in der Hornhaut mit „Strahlungs-Hotspots“, insbesondere beim trockenen Auge.

In einer anderen Studie derselben Gruppe (Foroughimehr et al. 2024) wurde die Fluoreszenz-Lebensdauer-Imaging-Mikroskopie verwendet (fluorescence lifetime imaging microscopy FLIM), die potenzielle Schäden an zellulären Atmungsprozessen aufdeckt, um die Wirkungen einer 26-GHz-Exposition (5,1 kW m^{-2}) für eine Dauer von 5 Minuten, 10 Minuten, 20 Minuten und 30 Minuten auf die Haut von Schweinen zu untersuchen. Die untersuchten Endpunkte waren Veränderungen der Gewebstemperatur und die Autofluoreszenz von Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD). Frische Ex-vivo-Hautproben (n = 6) wurden entnommen, bei 21 °C gelagert und in einer Absorberkammer exponiert. Zusätzlich zur FLIM-Mikroskopie wurde mit einer Infrarot-Wärmebildkamera das Temperaturniveau gemessen (3 Messungen/Minute). Der Temperaturanstieg war in den ersten 5 Minuten am stärksten, verlangsamte sich dann und erreichte nach 30 Minuten ein Plateau. Der maximale gemessene Temperaturanstieg betrug 7° C. Die Lebensdauer von FAD, als Indikator für einen intakten Stoffwechsel, nahm mit der Zeit ab (statistisch nicht signifikant), sowohl bei den Kontroll- als auch bei den exponierten Proben.

Parker et al. (2024) führten eine Studie über Verbrennungsschwellen in Schweinehaut durch oberflächlich eindringende Hochfrequenzfelder bei 8,2 GHz und 95 GHz durch. In der Studie wurden die Schwellenwerte für oberflächliche, partielle und vollflächige Verbrennungen nach 5 Sekunden Exposition bei Leistungsdichten von 4-30 W cm^{-2} und 2-15 W cm^{-2} bei 8,2 GHz bzw. 95 GHz bestimmt. Weibliche Schweine (n = 8 für jede Frequenz) wurden in einer Absorberkammer an vier Stellen an jeder Flanke des Tieres bei 8 W cm^{-2}, 20 W cm^{-2}, 25 W cm^{-2} und 30 W cm^{-2} exponiert. Mit einer Infrarot-Kamera wurden Wärmebilder erstellt und digitale Farbfotos von den Stellen vor der Exposition sowie 1 h, 24 h, 72 h und 7 Tage nach der Exposition aufgenommen. Darüber hinaus wurden 1 h, 24 h, 72 h und 168 h nach der Exposition Biopsien für histologische Untersuchungen des Verbrennungsgrades (20 histologische Faktoren) entnommen.

Die Ergebnisse zeigten, dass Verbrennungsschäden dosisabhängig auftreten, wobei der Schweregrad der Verbrennung mit zunehmender Energieeinbringung zunimmt. Es wurden Schwellenwerte gefunden, bei denen der Übergang von oberflächlichen Verbrennungen zu schwerwiegenderen Verbrennungen in Teilen oder in der gesamten Tiefe der Hautschicht erfolgt. Die Wirkungen bei 8,2 GHz zeigten sich als deutliche Veränderungen und Verbrennungen in Teilen

der Hautschichten ab ca. 10 W cm^{-2}. Verbrennungen der gesamten Haut wurden ab ca. 20 W cm^{-2} beobachtet. Bei 95 GHz wurden Verbrennungen in Teilen der Hautschicht ab ca. 4 W cm^{-2} und Verbrennungen der gesamten Haut ab ca. 15 W cm^{-2} gefunden.

Die Haut von männlichen Sprague-Dawley-Ratten wurde für die Analyse von stationären Temperaturerhöhungen aufgrund von Expositionen im Frequenzbereich 6 GHz bis 100 GHz untersucht (Li et al. 2023a). Das Autorenteam analysierte die Hautdicke der Kopf- und Rückenhaut an jeweils vier Stellen bei vier Tieren mit Hilfe von histologischen Untersuchungen und CT-Messungen. Anschließend wurde ein Modell mit einer ebenen Welle konstruiert, die aus der Luft auf die Hautoberfläche eingestrahlt wird. Die stationäre Temperatur, die auf die Leistungsabsorption des eingespeisten EMF zurückzuführen ist, wurde durch Lösung der Pennes'schen Biowärmeübertragungsgleichung berechnet. Die Ergebnisse zeigten eine lineare Beziehung zwischen der absorbierten Leistungsdichte an der Hautoberfläche und der Leistungsdichte außerhalb des Körpers bei Frequenzen von 6 GHz, 30 GHz, 60 GHz und 100 GHz. Der Erwärmungsfaktor für die Kopfhaut der Ratte variierte zwischen 0,0083 °C und 0,0118 °C pro W cm^{-2} Leistungsdichte über den Bereich von 6 GHz bis 100 GHz. Für die Rattenrückenhaut reichte der Erwärmungsfaktor von 0,0172 °C pro W cm^{-2} bis 0,0186 °C pro W cm^{-2} zwischen 30 GHz und 100 GHz. Die Ergebnisse zeigen, dass oberhalb von 30 GHz die äquivalente absorbierte Leistungsdichte eine um 70 % höhere Temperatur in der Rattenrückenhaut im Vergleich zur Rattenkopfhaut verursachen könnte. Die Erhöhung der Oberflächentemperatur in der Kopf- bzw. Rückenhaut der Ratte variierte zwischen 6 GHz und 100 GHz frequenzabhängig von 55,6 % bis 32,2 % bzw. von 83,3 % bis 58,8 % im Vergleich zu durchschnittlichen menschlichen Modellen aus anderen Studien. Die größeren prozentualen Anstiege traten bei den niedrigeren Frequenzen auf. Das Autorenteam schlussfolgerte, dass die Temperaturänderung an der Hautoberfläche der Ratte durch thermische Parameter, die Gewebedicke und die Durchblutungsrate in den tieferen Gewebeschichten beeinflusst werden könnte.

Kojima et al. (2024) veröffentlichten eine Studie, in der sie die Schädigung des Kaninchenauges bei kontinuierlicher 60-GHz-Exposition (200 mW cm^{-2} oder 300 mW cm^{-2} für 6 min) unter verschiedenen Umweltbedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) untersuchten. Dieselben Autorinnen und Autoren hatten zuvor mehrere Studien zum gleichen Thema veröffentlicht, in denen verschiedene Frequenzen (40 GHz, 60 GHz, 75 GHz, 95 GHz, 162 GHz) verwendet wurden. Ziel der vorliegenden Studie war es, den Einfluss von Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit als Umweltfaktoren auf die Schwellenwerte für die Entwicklung von MMW-induzierten Augenschäden zu untersuchen. „Augenschäden“ wurden als abnormale Befunde definiert und basieren auf früheren Studien, einschließlich Hornhautepithelschäden, Hornhautödemen und Hornhauttrübungen.

Die 60-GHz-Welle wurde durch eine konische Hornantenne übertragen, die auf das Auge des Kaninchens gerichtet war. Bei den Tieren handelte es sich um betäubte männliche, pigmentierte Kaninchen (Dutch-belted, Kbl Dutch), die am linken Auge bestrahlt wurden, während das rechte Auge als Kontrolle diente. Die Spaltlampenmikroskopie mit Fluorescein-Färbung wurde verwendet, um die anfängliche Gesundheit des Auges zu untersuchen, einschließlich des Epithel-Zustandes und der Hornhaut- und Linsentransparenz. Zur Messung der Hornhautdicke wurde die optische Kohärenztomographie des vorderen Augenabschnitts verwendet. Vor der Exposition wurden (vorgewärmte) physiologische Kochsalztropfen in die Augen gegeben, um dem Austrocknen der Augen entgegenzuwirken. Die Umgebungsbedingungen waren entweder die „Standard“-Bedingung (25 °C, 50 % relative Luftfeuchtigkeit) oder 45 °C mit 20 %, 50 % oder 80 % relativer Luftfeuchtigkeit. Die Tiere wurden vor der Exposition für 10 Minuten an die jeweiligen Bedingungen akklimatisiert. Die Schädigung der Augen wurde unmittelbar vor

der Exposition und dann 10 Minuten und ein Tag nach der Exposition beobachtet. Die Messungen der Gewebetemperatur wurden mit einem fluoroptischen Thermometer durchgeführt, das auf dem Hornhaut-Stroma, der vorderen kortikalen Linse und dem subkutanen Gewebe auf der Rückseite des Tieres angebracht wurde.

In früheren Studien wurden Schwellenwerte für die Leistungsdichte ermittelt, ab denen Augenschäden auftreten. Unter Standardbedingungen wurde der Bereich dieser Schwellenwerte mit 200 mW cm^{-2} bis 300 mW cm^{-2} angegeben. In der vorliegenden Studie traten unter Bedingungen mit hoher Temperatur und hoher Luftfeuchtigkeit (45 °C, 80 % relative Luftfeuchtigkeit) bei allen untersuchten Tieren (n = 5) Hornhauttrübungen, Hornhautödeme und Schädigungen des Hornhautepithels auf, wenn sie bei 200 mW cm^{-2} exponiert worden waren. Bei gleicher Temperatur, aber 50 % relativer Luftfeuchtigkeit, lag die entsprechende Inzidenz bei 67 % (zwei von drei Tieren). Bei 20 % relativer Luftfeuchtigkeit lag die Inzidenz bei 0 (n = 5). Das Auftreten von Schäden wurde auch bei einer Exposition bei 300 mW cm^{-2} untersucht, allerdings nur bei 25 °C. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % wurden bei 85,7 % der Tiere (sechs von sieben Tieren) Schäden festgestellt, bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 20 % waren es 100 % (n = 5). Das Autorenteam beobachtete, dass die Leistungsdichte am engsten mit der Entwicklung von Augenschäden zusammenhängt, und außerdem, dass eine relative Luftfeuchtigkeit von 80 % die Augenschäden deutlich begünstigt. Es wies auch darauf hin, dass nur wenige Tiere untersucht wurden und dass die statistische Aussagekraft in vielen Fällen gering war.

Was die Temperaturveränderungen betrifft, so wurde ein Muster eines allmählichen Temperaturanstiegs im Auge und im Unterhautgewebe nach einem Übergang von 24°C und 50 % relativer Luftfeuchtigkeit auf 45 °C und 20 % oder 80 % relativer Luftfeuchtigkeit festgestellt. Der Anstieg erfolgte an allen drei Stellen (Hornhaut, Linse, Unterhaut) mit der gleichen Geschwindigkeit. Während der Exposition bei 200 mW cm^{-2} bei 45 °C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit wurde ein sofortiger Temperaturanstieg in der Hornhaut beobachtet, gefolgt von einem Anstieg in der Linse. Eine Exposition bei 200 mW cm^{-2} bei 45 °C und 20 % relativer Luftfeuchtigkeit verursachte einen raschen Anstieg in der Hornhaut, gefolgt vom Anstieg in der Linse, jedoch in geringerem Maße.

Als Schlussfolgerung stellten das Autorenteam fest, dass der Schwellenwert für Augenschäden direkt von der Leistungsdichte beeinflusst wird und dass eine hohe Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit eine sekundäre, verschlimmernde Wirkung auf Augenschäden ausüben. Darüber hinaus kam es zu dem Schluss, dass eine Umgebung mit niedriger Luftfeuchtigkeit die Entwicklung von Augenerkrankungen durch MMW-Exposition nicht unbedingt verhindert.

Die jüngste Studie dieser Gruppe (Kojima et al. 2025) untersuchte die Auswirkungen einer Augenexposition durch eine „Quasi-MMW“ bei 28 GHz und verglich die Ergebnisse mit denen, die zuvor für andere Frequenzen veröffentlicht worden waren, wobei dieselbe Expositionsanlage und dieselben Verfahren für die Behandlung der Tiere, die Temperaturkontrolle und die Gewebeuntersuchungen verwendet wurden. Die Exposition dauerte 6 Minuten bei verschiedenen einfallenden Leistungsdichten (200-750 mW cm^{-2}) in einem Abstand von 135 mm von der Antennenöffnung der Linse bis zum Hornhaut-Apex. Bei 400 mW cm^{-2} wurde eine Schädigung des Hornhautepithels, ein Hornhautödem und eine Linsentrübung (Katarakt) beobachtet. Das Autorenteam bestimmte auch den Schwellenwert der Leistungsdichte (unter Verwendung der Probit-Analyse), der eine 10-prozentige, 50-prozentige bzw. 90-prozentige Wahrscheinlichkeit (DD_{10}, DD_{50} bzw. DD_{90}) einer Augenschädigung durch die 6-minütige Exposition angibt. Diese Werte beliefen sich auf 327 mW cm^{-2}, 359 mW cm^{-2} und 394 mW cm^{-2}, die höher sind als die Werte, die die Autorinnen und Autoren bei MMW-Exposition bei höheren Frequenzen (40 GHz, 60 GHz, 75 GHz, 95 GHz und 162 GHz) in ihren früheren Studien gefunden haben.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Mehrzahl der verfügbaren In-vivo-Studien, die sich mit der Erwärmung der Haut und des Auges beschäftigten, biologische Reaktionen gezeigt haben. Da die Studien sehr heterogen sind und keine angemessenen und ausreichenden Informationen liefern, kann daraus jedoch keine sinnvolle und verlässliche Gefahreneinschätzung abgeleitet werden.

4.4.2 Andere Endpunkte

In einer Studie an männlichen Wistar-Ratten von Perov et al. (2022) wurde eine chronische Multifrequenz-Exposition in verschiedenen 5G-Frequenzbändern verwendet. Die Tiere wurden in vier Gruppen 1, 2, 3 oder 4 Monate lang 24 Stunden pro Tag, 7 Tage pro Woche, chronisch exponiert. Außerdem wurde die fünfte Gruppe nach 4-monatiger Expositionszeit und anschließend einem Monat ohne Exposition untersucht. Zu jeder exponierten Gruppe wurde eine scheinexponierte Kontrollgruppe mitgeführt. Die Scheinexposition wurde genannt, aber ihre Bedingungen nicht beschrieben. Die Exposition erfolgte gleichzeitig bei 3,6 GHz, 28 GHz und 37 GHz (5G/IMT-2020 Basisstation), bei 250 µW cm^{-2}. Zu den untersuchten Endpunkten gehörten die Erkundungs- und Orientierungs-Aktivität (Freifeld-Test, wobei die Details nicht erläutert werden) und die Serum-Konzentrationen der Hormone ACTH (Adrenocorticotropes Hormon) und Kortikosteron (ELISA-Assays). Alle Parameter wurden am Ende eines jeden Monats und einen Monat nach der 4-monatigen Exposition untersucht. Zwölf Ratten wurden in jede Expositions- und Kontrollgruppe aufgenommen.

Die Orientierungs- und Erkundungsaktivität nahm bei den exponierten Tieren im Vergleich zu den Kontrolltieren ab, mit einer maximalen Wirkung nach drei Monaten, obwohl diese meist statistisch nicht signifikant war. Nur ein Verhaltensparameter („hole reflex“) zeigte eine statistisch signifikante Abnahme nach zwei Monaten der Exposition. Die Werte waren einen Monat nach der Exposition gleich wie bei den Kontrollen. Was die Hormonspiegel betrifft, so waren die ACTH-Spiegel nach drei Monaten im Vergleich zur Kontrolle signifikant erhöht, während die Kortikosteron-Spiegel nur bei den beiden Gruppen, die nach einem bzw. zwei Monaten analysiert wurden, statistisch signifikant erhöht waren.

Das Autorenteam kommt zu dem Schluss, dass die Ergebnisse auf einen moderaten Stress-Effekt der Exposition auf die Hypothalamus-Hypophysen-Nebennieren-Achse hinweisen. Dies basiert jedoch darauf, dass nur einige Zeitpunkte der Exposition statistisch signifikante Wirkungen zeigen und dass die Daten aus dem Verhaltenstest nur genannt, die Ergebnisse aber nicht gezeigt wurden. Außerdem fehlen in der Arbeit Angaben zur Dosimetrie und zu den Bedingungen der Kontrolltiere.

Yao et al. (2022) untersuchten die Reaktion des Immunsystems von Ratten auf kombinierte Einzel- und Multifrequenz-Expositionen bei 2,8 GHz und 9,3 GHz. Das Autorenteam verwendete erwachsene männliche Wistar-Ratten und exponierte sie unter Scheinbedingungen oder bei den beiden Frequenzen allein oder in Kombination (nacheinander) bei einer Leistungsdichte von 10 mW cm^{-2}. Die Expositionsdauer betrug 6 min oder 6 plus 6 min (kombinierte Exposition). Die Organ-Pathologie (Thymus, Milz) wurde 6 h sowie 7 Tage, 14 Tage und 28 Tage nach der Exposition untersucht. Die zelluläre Ultrastruktur wurde mit Hilfe der Transmissions-Elektronenmikroskopie untersucht, und eine Reihe von zellulären und molekularen Endpunkten mit Assays wie Hämogramm, Durchflusszytometrie, Immunoassays, Transkriptomik, Proteomik und Massenspektrometrie analysiert.

Das Autorenteam berichtet, dass pathologische Veränderungen sowohl im Thymus als auch in der Milz auftraten, beginnend am Tag 7 nach der Exposition, mit stärkeren Wirkungen unter den Bedingungen der Multifrequenz-Exposition. Insbesondere zeigten die Lymphozyten in

diesen beiden Organen eine Stauung und Kernfragmentierung, die am 28. Tag nach der Exposition nicht mehr vorhanden war. Die Einzelfrequenz-Expositionen hatten keinen Einfluss auf die Anzahl der weißen Blutkörperchen. Dagegen veränderten die Multifrequenz-Expositionen die Anzahl und den Anteil sowohl der T- als auch der B-Lymphozyten, wobei die Anzahl der B-Zellen zunahm. Hier ist nicht zu unterscheiden, ob der Effekt durch die längere Dauer der Exposition oder die Kombination der Frequenzen verursacht wurde. Diese Wirkungen waren am Tag 28 nach der Exposition nicht mehr vorhanden. Mehrere Zytokine im Serum (IL-1alpha, IL-1beta, IL-4, TNF-alpha, IL-12) stiegen zu den Messzeitpunkten 6 h und 7 Tage an, kehrten aber bis Tag 28 auf den Normalwert zurück. Die IFN-gamma-Spiegel (Interferon-gamma, ebenfalls ein Zytokin) waren zu allen Zeitpunkten unverändert. Wirkungen auf die Genexpression wurden auf der mRNA-Ebene (durch Transkriptomik) gefunden, was zeigte, dass 373 untersuchte Gene hochreguliert und 254 Gene herunterreguliert wurden, und zwar stärker unter der Bedingung der Multifrequenz-Exposition. Die Gene repräsentieren die Immunregulation und den Zellstoffwechsel. Es wurde auch eine unterschiedliche Expression von Proteinen festgestellt, wobei 16 Proteine hochreguliert und 80 herunterreguliert wurden, vor allem bei den Tieren, die nur bei 9,3 GHz exponiert worden waren. Zusätzlich zu diesen Untersuchungen von Vollblut und Serum führte das Autorenteam Omics-Studien an der Milz durch. In diesem Organ wurden mehr unterschiedlich exprimierte Gene als im Blut gefunden, wobei 475 Gene hochreguliert und 477 Gene herunterreguliert wurden. Viele dieser Gene spielen eine Rolle bei der Immunaktivität. Die Proteomanalyse der Milz zeigte auch eine unterschiedliche Expression von Proteinen (79 erhöht, 65 vermindert), die mit dem Stoffwechsel und immunassoziierten Prozessen zusammenhängen.

Insgesamt betrachtet sind die Studien zu anderen Endpunkten sehr heterogen und zeigen keinen konsistenten Zusammenhang zwischen Leistungsdichte, Expositionsdauer oder -frequenz und den Auswirkungen der Exposition.

4.5 In-vitro-Studien

In-vitro-Tests untersuchen toxikologische, mechanistische und andere relevante Effekte, indem sie die Entwicklung von Krankheiten oder zellulären Veränderungen anhand einer Vielzahl biologischer Endpunkte nachweisen und möglicherweise zu ihrem Verständnis beitragen. In-vitro-Tests können zur Identifizierung von Gefahrstoffen verwendet werden, ihre Nützlichkeit für die Bewertung eines biologischen Effektes ist jedoch begrenzt (SCENIHR 2009). Im Jahr 2019 überarbeitete die IARC allerdings ihre Verfahren zur Festlegung von Gefahrenklassifizierungen, um den Erkenntnissen über Mechanismen aus In-vitro-Studien, die zur Vorhersage der Karzinogenität beim Menschen beitragen können, mehr Gewicht zu verleihen (IARC 2019). Diese Änderung bei der Einstufung von Stoffen könnte für die Bewertung der Karzinogenität der Exposition durch HF-EMF von Bedeutung sein, zumal diese von der IARC unter Verwendung ihrer Methodik, die stark auf epidemiologische und In-vivo-Studien ausgerichtet war, als „2B - möglicherweise krebserregend“ eingestuft wurde (IARC 2013).

Eine tabellarische Zusammenstellung der im Folgenden erwähnten In-vitro-Studien findet sich im Anhang A-3.

4.5.1 Genexpression

Rampazzo et al. (2024) untersuchten die Wirkung einer 30,5-GHz-Exposition (kontinuierliche Millimeterwellen) auf Glioblastom-Organoide. Trotz des therapeutischen Ansatzes der Studie sind die Ergebnisse zur thermischen Wirkung der eingesetzten Felder für die vorliegende Stellungnahme relevant. Dem experimentellen Teil ging ein umfassender dosimetrischer Ansatz voraus, der mit numerischen und experimentellen Methoden kombiniert wurde, um

einen Temperaturanstieg während der Exposition zu begrenzen. Im biologischen Teil wurde eine globale Transkriptionsprofilanalyse, die Analyse zellmorphologischer Veränderungen und die phänotypische Charakterisierung von Zellen vorgenommen. Das Autorenteam verwendete zwei Expositionsbedingungen: eine mit doppelt so viel Leistung über die Hälfte der Zeit als die andere (d. h. 0,2 W mittlere Leistung für 10 Minuten oder 0,1 W mittlere Leistung für 20 Minuten). Es wurden in beiden Fällen im Vergleich zur nicht-exponierten Kontrollgruppe statistisch signifikante Wirkungen durch die EMF-Exposition auf die Zellproliferation und die Apoptose beobachtet, ohne jedoch den Differenzierungsstatus der Glioblastom-Zellen zu beeinträchtigen. In Kombination mit dem Chemotherapeutikum Temozolomid wurde bei einer mittleren Leistung von 0,1 W sogar eine statistisch signifikante therapeutische Wirkung beobachtet, die zu einem verstärkten Absterben von Glioblastom-Zellen führte. Es fehlen jedoch Angaben über die Anzahl der durchgeführten unabhängigen Experimente sowie darüber, ob die Untersuchungen verblindet durchgeführt wurden.

In einer Studie (Martin et al. 2024) wurden zelluläre Reaktionen auf molekularer Ebene untersucht (Transkription bestimmter Gene), wobei zwei primären Keratinozytenkulturen (HEK und NHEK) und eine von einer Keratinozyten abgeleiteten Zelllinie (HaCaT), bei 60 GHz (für 3 h oder 14 h) exponiert wurden. Es wurden drei Bedingungen verwendet: Scheinexponierte Zellen, MMW-exponierte Zellen und Hitzeschockkontrolle. Das Autorenteam fand lediglich Veränderungen, die von der Wärmewirkung der MMW mit hoher Leistungsdichte (über 10 mW cm^{-2}) verursacht wurden.

Ein Dosiseffekt wurde durch die Erhöhung der Leistungsdichte von 5 mW cm^{-2} auf 20 mW cm^{-2} untersucht. Die letztgenannte Leistungsdichte entspricht dem früher empfohlenen Maximalwert für die Allgemeinbevölkerung für eine Hautoberfläche von 1 cm^2 (ICNIRP 1998) Es wurde jedoch auch die neue von ICNIRP empfohlene Begrenzung der Exposition (10 mW cm^{-2}) getestet (ICNIRP 2020). Das Autorenteam fasst seine Ergebnisse so zusammen, dass abgesehen von einer mit der akuten 60-GHz-Exposition mit hoher Leistungsdichte verbundenen Wärmewirkung offenbar keine weitere Wirkung auftritt.

In eine frühere Studie hat das Autorenteam (Martin et al. 2020) die Expressionsveränderungen von drei Genen (ADAMTS6, IL7R und NOG) in Primärkulturen menschlicher Keratinozyten und in einer Zelllinie (HaKaT) untersucht, wobei die gleichen Expositionsbedingungen verwendet wurden. Hier wurden statistisch signifikante Veränderung zwar erfasst, die Autorinnen und Autoren führten die Schwankungen jedoch auf zufällige Fluktuationen zurück und brachten sie nicht mit der Exposition in Zusammenhang.

Lawler et al. (2022) untersuchten die Wirkungen der MMW-Exposition auf primäre humane Hautfibroblasten und fanden heraus, dass hohe Dosen von MMW gleichzeitig nicht-thermische Veränderungen im Transkriptom sowie in der Dynamik der DNA-Struktur hervorrufen, jedoch keine DNA-Schäden verursachen. Das Autorenteam verwendete eine wiederholte, 60 GHz-Exposition (2,6 mW cm^{-2}, 46,8 J cm^{-2} d^{-1}) (vom MMW-Strahl pro Flächeneinheit pro Tag abgegebene Energie) und fand eine einzigartige physiologische Reaktion nach Exposition. Für die Exposition wurde ein Rasterscan-Setup verwendet, um fokussierte Erwärmungseffekte zu vermeiden. Die Fibroblasten wurden 4 Tage lang 5 Stunden pro Tag bei 60 GHz und einer Bestrahlung von 46,8 J cm^{-2} d^{-1} exponiert. Die Kontrollen wurden den gleichen Bedingungen ausgesetzt aber ohne MMW gerastert. Für die Exposition der Fibroblasten wurden die 6-Well-Platten weniger als 2 mm über dem WR12-Wellenleiter aufgehängt und mit dem 100-mW-MMW-Strahl gerastert, wobei der Strahl durch den Kunststoffboden des Wells ging, um die Zellen zu bestrahlen, was zu einer durchschnittlichen Leistungsdichte von 2,6 mW cm^{-2} führte.

Die Quantifizierung von extrazellulärem Kollagen wurde immunzytochemisch untersucht, welches ein gängiger Marker für die Stimulation von Fibroblasten darstellt. Nach der Exposition wurde eine statistisch signifikant erhöhte Kollagen-Ablagerung mikroskopisch beobachtet (n = 3). Es wurde keine Positivkontrolle verwendet, und die Experimente wurden nicht blind durchgeführt.

Die Analyse der Genexpression ergab 255 signifikant unterschiedlich exprimierte Gene (DEGs) zwischen Kontroll- und MMW-exponierten Proben mit einer Falschentdeckungsrate (FDR) < 0,05 in beiden biologischen Replikaten. Von diesen DEGs wurden 126 Gene hochreguliert und 129 Gene herunterreguliert. Die meisten Gene sind von MMW- und TGF-β-Behandlungen unterschiedlich betroffen, was nach Meinung des Autorenteams darauf hindeutet, dass sich die beobachteten MMW-induzierten Veränderungen von der traditionellen zytokininduzierten Reaktion (TGF-ß) unterscheiden.

Ferner fasst das Autorenteam zusammen, dass die charakteristischen transkriptomischen und genomischen Veränderungen nicht mit einer typischen zellulären thermischen Reaktion assoziiert sind, sondern vielmehr mit Veränderungen der DNA-Strukturdynamik in Zusammenhang stehen könnten. Diese Veränderungen deuten auf eine einzigartige Wechselwirkung von MMWs mit biologischem Material hin und unterstreichen die Relevanz sowohl der Leistungsdichte als auch der Gesamtdauer bei der Festlegung von Sicherheitsgrenzwerten für längere Expositionszeiträume.

4.5.2 Andere Endpunkte

Kim et al. (2022) untersuchten die Wirkungen einer 28-GHz-Exposition auf die Hautpigmentierung in einer Maus-Melanom-Zelllinie (B16F10) und einem 3D-Modell der pigmentierten Epidermis (Melanoderm). Die Exposition erfolgte für 4 h/Tag für 4 Tage (B16-Zellen) oder jeden zweiten Tag für 14 Tage (Melanoderm), in Anwesenheit oder Abwesenheit des Hormons alpha-MSH (Positivkontrolle, die Melanozyten aktiviert). Die Temperatur wurde mit einer Infrarot-Kamera überwacht. Die Zellmorphologie wurde mit der Fontana-Masson-Färbung überwacht, die eine Untersuchung der aktivierten Zellen sowie der Form und Länge der Melanozytendendriten ermöglichte. Die Erzeugung von ROS wurde mit DCF-DA, der Melaningehalt durch Messung der Absorption bei 405 nm und die Zytotoxizität mit dem MTT-Assay untersucht. Außerdem wurde die Genexpression der wichtigsten Melaninsyntheseenzyme (Tyrosinase, TRP-1, TRP-2, Rab27a, Mlph, MyoVa) mit der qRT-PCR-Methode gemessen. Die Beobachtungen wurden 4 h, 18 h und 24 h nach der Exposition durchgeführt.

Lediglich 24 h nach der Exposition waren die mRNA-Gehalte in alpha-MSH-aktivierten B16F10-Zellen reduziert, ebenso wie die Mengen an ROS und Melanin. Die mikroskopischen Beobachtungen bestätigten die geringeren Melaninwerte. Es wurden keine Wirkungen auf die Zytotoxizität und die Dendritenlängen beobachtet. Einige der festgestellten Wirkungen wurden nicht zu allen untersuchten Zeitpunkten konsistent gefunden.

Die Melanoderm-Modelle wurden 14 Tage lang jeden zweiten Tag exponiert. An den letzten Tagen des Experiments wurde das Gewebe für die Morphologie und Immunhistochemie von Melanin vorbereitet. Die Ergebnisse zeigten, in Übereinstimmung mit den Experimenten an B16F12-Zellen, dass die 28-GHz-Exposition den Melanozyten-Phänotyp reduzierte, mit weniger Melanosom-Akkumulation und Melanozyten-Dendriten-Bildung.

Der Artikel enthält keine ausreichende Beschreibung des Expositions-Aufbaus und der Dosimetrie und enthält widersprüchliche Informationen im Hauptteil des Textes sowie in den Ergebnis-Abbildungen.

Zhao et al. (2020) untersuchten die potenzielle Apoptose fördernde Wirkung von MMW auf menschliche A375-Melanom-Tumorzellen in vitro.

Die Exposition erfolgte bei 35,2 GHz (0,16 mW cm^{-2}) für 15 Minuten, 30 Minuten, 60 Minuten und 90 Minuten sowohl für die exponierten wie auch für die scheinexponierten Zellproben. Die Lebensfähigkeit und die Apoptose der Zellen wurden nach der Exposition bestimmt. Außerdem wurden die Veränderungen in der Expression von Apoptose-bezogenen Proteinen, wie die Caspase-3 und -8 untersucht. Die Studie zeigte, dass die Lebensfähigkeit der Zellen statisch signifikant gehemmt war, während die Anzahl der apoptotischen Zellen, mit zunehmender Expositionsdauer anstieg. Parallel dazu wurde festgestellt, dass die Expression von Caspase-3 und -8 statistisch signifikant hochreguliert war. Zusammenfassend wurde darauf hingewiesen, dass die Exposition bei 35,2 GHz eine Apoptose fördernde Wirkung auf die A375-Zellen hat, die über die Aktivierung von Caspase-8 und -3 vermittelt wird.

Auch in dieser Studie gibt es keine Angaben zur Anzahl der unabhängigen Experimente und ob sie verblindet durchgeführt wurden. Zudem fehlen die positiven Kontrollen.

Das Ziel der Studie von Ploskonos et al. (2022) war es, den Einfluss von MMW auf normale und pathologische menschliche Spermien durch die Detektion von Polyaminen (PA) in vitro zu untersuchen. Die Stabilität der Spermien-Membranen, die Anzahl der apoptischen Gameten und der Gehalt an PA im Samen-Plasma in den Ejakulationen von fruchtbaren und unfruchtbaren Männern wurden vor und nach kurzzeitiger Exposition in vitro verglichen. Die Ejakulat-Proben wurden von gesunden Spendern [n = 25, Alter 22-38 Jahre, Durchschnittsalter 30,6±1,1 Jahre (Mittelwert ± SEM)] und von subfertilen Männern (n = 78, Alter 25-48 Jahre, Durchschnittsalter 34,1±0,8 Jahre) entnommen und durch MMW (42,194 GHz) für 20 Minuten exponiert. Die Zerbrechlichkeit der Spermienmembranen, apoptotische Zellen, sowie der PA-Gehalt wurden bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass keine Veränderungen bezüglich der Morphologie und praktisch keine Wirkungen auf die Motilität der Spermien in gesunden Proben beobachtet wurden. Das Autorenteam identifizierte vielmehr die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Spermienmembranen, die Abnahme der Acrosin-Aktivität (die Bestimmung der enzymatischen Aktivität von Acrosin wird als diagnostischer Test zur Bewertung der Befruchtungsfähigkeit von Spermatozoen in vitro verwendet), die Abnahme der Anzahl apoptotischer Gameten und die Abnahme der PA-Konzentrationen im Samenplasma in nativen menschlichen Spermien nach der Exposition. Bei den subfertilen Proben wurden positive Reaktionen festgestellt, nämlich der Anstieg der Motilität der Gameten von Männern mit beeinträchtigter Fruchtbarkeit.

Auch diese Studie weist eine unzureichende methodische Qualität auf, was die Aussagekraft deutlich einschränkt (fehlende Kontrollen, keine Verblindung, unklare Dosimetrie).

Mikrotubuli sind hochpolar und können eine Länge von mehreren Mikrometern erreichen. Es wurde davon ausgegangen, dass sie empfindlich auf nichtionisierende Strahlung reagieren. Daher haben Hammarin et al. (Hammarin et al. 2024a, Hammarin et al. 2024b) das Wachstumsverhalten von Mikrotubuli von eukaryotischen Zellen nach Exposition von 3.5 GHz, 20 GHz and 29 GHz studiert. Die genauen Parameter der Exposition können der Publikation nicht entnommen werden. Das Autorenteam fand einen starken Einfluss auf die Kinetik des Mikrotubuli-Wachstums und konnte diesen Effekt eindeutig mit einem Temperaturanstieg in Verbindung bringen. Die sehr aufwändigen Temperaturkontroll-Versuche, wie der Vergleich der Wachstumskurven von Mikrotubuli bei verschiedenen Temperaturen, erzeugt durch MMW mit unterschiedlichen Frequenzen, Bestrahlung mit Infrarotlaser oder Luftstromerwärmung, bestätigen diese Ergebnisse. Sie wurden so zusammengefasst, dass keine messbaren Effekte auf das Wachstum von Mikrotubuli nachgewiesen werden konnten, die sich nicht als rein thermisch induziert erklären lassen.

4.6 Zusammenfassende Beurteilung der biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen der 5G-Technologie im Frequenzbereich FR2

Die Ergebnisse des biologischen Teils dieser Stellungnahme können wie folgt zusammengefasst werden:

- Im Vergleich zum Frequenzbereich FR1 ist die Zahl der experimentellen Studien für den Frequenzbereich FR2 gering. Dies gilt insbesondere für humanexperimentelle Studien.
- Epidemiologische Studien im FR2 haben hauptsächlich die berufliche Radarexposition untersucht, zum Beispiel im Militär oder bei der Polizei. Dabei haben die meisten Studien unter besonderer Berücksichtigung der EMF-Exposition keine erhöhten Risiken für Erkrankungen wie Krebs gefunden. Die Studien sind aber wenig belastbar. Beispielsweise ist die Exposition in den meisten Studien nur unzureichend quantifiziert worden, oder mögliche Störgrößen (Confounder) wurden nur rudimentär oder gar nicht berücksichtigt.
- Humanexperimentelle Studien zeigen, dass die Wahrnehmungsschwelle für durch die hochfrequenten elektromagnetischen Felder (HF-EMF) verursachte Temperaturerhöhung an der Hautoberfläche im Frequenzbereich FR2 bei um etwa 1 °C liegt.
- In zwei von drei verfügbaren Studien zum Schwellenwert für thermischen Schmerz wurde eine statistisch signifikant erhöhte Schmerzschwelle während einer 30-minütigen Exposition durch Millimeterwellen bei Feldstärken zum Teil oberhalb der Grenzwerte beobachtet. Insgesamt wurden bisher nur sehr kleine Stichproben mit innerhalb und zwischen den Studien variierenden Expositionsparametern untersucht.
- Die Mehrzahl der In-vitro-Studien und der tierexperimentellen In-vivo-Studien mit Expositionen im Millimeterwellenbereich haben biologische Reaktionen (meist als Folge der thermischen Einwirkungen) gezeigt. Daraus können jedoch keine Schlussfolgerungen hinsichtlich der biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen von Expositionen im Frequenzbereich FR2 gezogen werden, da die Studien sehr heterogen sind und ihre Anzahl gering ist. Es gab keinen konsistenten Zusammenhang zwischen Leistungsdichte, Expositionsdauer oder -frequenz und den Auswirkungen der Exposition. Die verfügbaren In-vivo-Studien, die sich meist mit der Erwärmung der Haut und des Auges beschäftigten, liefern keine angemessenen und ausreichenden Informationen für eine sinnvolle, verlässliche Gefahreneinschätzung. Zudem liefern die Studien (in vivo und in vitro) keine ausreichenden Informationen für die Beantwortung der Frage nach dem Vorhandensein von gesundheitsrelevanten nicht-thermischen Wirkungen.

Die zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht belastbare Datenlage lässt gegenwärtig noch keine Schlussfolgerungen bezüglich möglicher gesundheitsrelevanter Auswirkungen einer Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder im FR2 unterhalb der in Deutschland geltenden Grenzwerte zu. Zusammenfassend lässt sich aber festhalten, dass die aktuell vorliegenden Daten nicht darauf hindeuten, dass es im FR2 andere potenziell negative biologische Wirkungen gibt als die, welche auf thermischen Effekten im Körpergewebe basieren und grundsätzlich bereits aus dem FR1 bekannt sind.

Angesichts einer zukünftig möglicherweise in Deutschland beginnenden Nutzung des Frequenzbereichs FR2 (siehe Abschnitt 3.1.2) und der derzeit unzureichenden Datenlage ist es notwendig, potenzielle Gesundheitsrisiken weiter zu untersuchen.

4.7 Offene Fragen und Forschungsbedarf

Da für den Frequenzbereich FR2 wenige Studien vorliegen, die Eindringtiefe der Felder in den Körper sehr gering ist und die Energiedeposition an der Oberfläche erfolgt, werden folgende Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen gegeben:

- Weiterführende Studien zu biologischen Wirkungen sollten in erster Linie Frequenzen des FR2 betreffen, die zur Nutzung vorgesehen sind.
- Da viele Studien bezüglich der wissenschaftlichen Methodik qualitativ unzureichend sind oder zumindest erhebliche Schwachstellen aufweisen, müssen Konzeption und Durchführung künftiger Studien deutlich verbessert werden. Dies gilt sowohl für epidemiologische als auch für humanexperimentelle sowie insbesondere für In-vivo- und In-vitro-Studien.
- Humanexperimentelle Studien zu biologischen und gesundheitlichen Auswirkungen: Diese sollten sich auf Effekte konzentrieren, die insbesondere über die Haut vermittelt werden, einschließlich der Wirkungen auf Komponenten des Nerven- und Immunsystems.
- Beim Menschen und/oder in Tiermodellen: Analyse möglicher langfristiger Auswirkungen von Expositionen durch Frequenzen des FR2 auf das gesamte Nervensystem, die insbesondere über die Haut vermittelt werden, (z. B. Verhalten, kognitive Leistungsfähigkeit, Neurophysiologie, Schmerzwahrnehmung).
- Tierexperimentelle Studien: Diese sollten die am stärksten exponierten Organe, insbesondere die Haut und die Augen untersuchen.
- In-vivo-/ In-vitro-Studien: Wirkungen der FR2-Exposition auf die Hautflora, insbesondere auf die Mikroorganismen, die Teil des Immunsystems sind, sollten untersucht werden. Außerdem wird in diesem Zusammenhang empfohlen, die Immunantwort zu untersuchen.
- Studien an In-vitro-Modellen (Haut, Hornhaut sowie Bindehaut des Auges usw.) zu thermischen Effekten sollten gefördert werden. Es wäre sinnvoll, globale "Omics"-Ansätze ohne gezielte Annahmen umzusetzen (Transcriptomics, Proteomics, Metabolomics, Lipodomics, Epigenomics).
- Zur Verbesserung der Datenlage besteht Forschungsbedarf zu möglichen nichtthermischen Wirkmechanismen.

Zurzeit laufen vier EU-Projekte (ETAIN, GOLIAT, NextGEM und SEAWave, siehe Anhang A-4), von denen Antworten auf einige offene Fragen erwartet werden.

5 Literatur

Alekseev et al. 2005 — Alekseev SI, Radzievsky AA, Szabo I, Ziskin MC. Local heating of human skin by millimeter waves: effect of blood flow. Bioelectromagnetics. 2005 Sep;26(6):489-501, doi: 10.1002/bem.20118

Andreuccetti et al. 1997 — Andreuccetti D, Fossi R, Petrucci C. An Internet resource for the calculation of the dielectric properties of body tissues in the frequency range 10 Hz - 100 GHz". IFAC-CNR, Florence (Italy), 1997. Based on data published by C. Gabriel et al. in 1996. http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/, zuletzt aufgerufen am 01.06.2023

ANSES 2019 — Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). Exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication "5G" et effets sanitaires associés - Rapport préliminaire, Octobre 2019. https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2019SA0006Ra.pdf, https://inis.iaea.org/records/ft1tc-psj44, zuletzt aufgerufen am 28.02.2025

ANSES 2021a — Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). Expositions aux champs électromagnétiques liées au déploiement de la technologie de communication "5G" et effets sanitaires éventuels associés (Saisine n°2019-SA-0006 "5G") - Rapport d'expertise collective, Mars 2021 (PDF p. 23 - 263). https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2019SA0006Ra.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.02.2025

ANSES 2021b — Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'"Exposition de la population aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie de communication "5G" et effets sanitaires associés" (Saisine n° 2019-SA-0006), Avril 2021 (PDF p. 3 - 22). https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2019SA0006Ra.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.02.2025

ANSES 2022a — Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). Exposition aux champs électromagnétiques liée au déploiement de la technologie "5G" - Avis actualisé de l'Anses, Rapport d'expertise collective, Février 2022. (Saisine n° 2019-SA-0006). https://www.anses.fr/en/system/files/AP2019SA0006RA-2.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.02.2025

ANSES 2022b — French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES). Opinion of the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety on "Population exposure to electromagnetic fields associated with the deployment of 5G communication technology and the related health effects" updating the opinion of 12 April 2021. (ANSES Opinion Request No 2019-SA-0006). https://www.anses.fr/en/system/files/AP2019SA0006EN-2.pdf, zuletzt aufgerufen am 28.02.2025

Arribas et al. 2023 — Arribas E, Escobar I, Martinez-Plaza A, Ramirez-Vazquez R. Comment on Martin L. Pall "Millimeter (MM) wave and microwave frequency radiation produce deeply penetrating effects: the biology and the physics", Rev Environ Health, 2021. Rev Environ Health. 2023 Mar 28;38(1):193-6, doi: 10.1515/reveh-2021-0180, Epub 20220210

BEMFV 2002 — Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder vom 20. August 2002 (BGBl. I S. 3366), die zuletzt durch Artikel 3 Absatz 3 des Gesetzes vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1947) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/bemfv/, zuletzt aufgerufen am 13.06.2025

BImSchG 2013 — Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 30. November 2016 (BGBl. I S. 2749) geändert worden ist

BImSchV 2013 — Sechsundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes vom 16.12.1996. Verordnung über elektromagnetische Felder in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2013 (BGBl. IS. 3266)

Blick et al. 1997 — Blick DW, Adair ER, Hurt WD, Sherry CJ, Walters TJ, Merritt JH. Thresholds of microwave-evoked warmth sensations in human skin. Bioelectromagnetics. 1997;18(6):403-9, doi: 10.1002/(sici)1521-186x(1997)18:6<403::Aid-bem1>3.0.Co;2-6

Christ et al. 2020a — Christ A, Samaras T, Neufeld E, Kuster N. Limitations of Incident Power Density as a Proxy for Induced Electromagnetic Fields. Bioelectromagnetics. 2020a Jul;41(5):348-59, doi: 10.1002/bem.22268, Epub 20200514

Christ et al. 2020b — Christ A, Samaras T, Neufeld E, Kuster N. RF-Induced Temperature Increase in a stratified Model for the Skin for Plane-Wave Exposuer at 6-100 GHz. Radiat Prot Dosimetry. 2020b Jun 24;188(3):350-60, doi: 10.1093/rpd/ncz293

Christ et al. 2021 — Christ A, Aeschbacher A, Rouholahnejad F, Samaras T, Tarigan B, Kuster N. Reflection Properties of the Human Skin From 40 to 110 GHz: A Confirmation Study. Bioelectromagnetics. 2021 Oct;42(7):562-74, doi: 10.1002/bem.22362, Epub 20210721

CLUE-H 2025a — CLUE-H. Webseite des European Research Cluster on EMF and Health (CLUE-H). https://www.emf-health-cluster.eu/, zuletzt aufgerufen am 11.04.2025

CLUE-H 2025b — CLUE-H. Resources. Webseite des European Research Cluster on EMF and Health (CLUE-H). https://www.emf-health-cluster.eu/resources/, zuletzt aufgerufen am 11.04.2025

Colombi et al. 2022 — Colombi D, Ghasemifard F, Joshi P, Xu B, Paola CD, Tornevik C. Methods and Practices for In Situ Measurements of RF EMF Exposure From 5G Millimeter Wave Base Stations. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2022;64(6): 1986-93, doi: 10.1109/temc.2022.3212543

Deutscher Bundestag 2013 — Deutscher Bundestag, Drucksache 17/12372. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 50, ausgegeben am 21.08.2013, Seite 3259. Verordnung zur Änderung der Vorschriften über elektromagnetische Felder und das telekommunikations-rechtliche Nachweisverfahren (Seite 10). http://dipbt. bundestag.de/dip21/btd/17/123/1712372.pdf, zuletzt aufgerufen am 13.06.2025

Di Ciaula 2018 — Di Ciaula A. Towards 5G communication systems: Are there health implications? Int J Hyg Environ Health. 2018 Apr;221(3):367-75, doi: 10.1016/j.ijheh.2018.01.011, Epub 2018/02/07

Diao et al. 2020 — Diao Y, Rashed EA, Hirata A. Assessment of absorbed power density and temperature rise for nonplanar body model under electromagnetic exposure above 6 GHz. Phys Med Biol. 2020 Nov 24;65(22):224001, doi: 10.1088/1361-6560/abbdb7, Epub 20201124

Diao et al. 2021 — Diao Y, Li K, Sasaki K, Kodera S, Laakso I, Hajj WE, Hirata A. Effect of Incidence Angle on the Spatial-Average of Incident Power Density Definition to Correlate Skin Temperature Rise for Millimeter Wave Exposures. IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility. 2021;63(5):1709-16, doi: 10.1109/temc. 2021.3098594

Dilli 2021 — Dilli R. Implications of mmWave Radiation on Human Health: State of the Art Threshold Levels. Ieee Access. 2021;9:13009-21, doi: 10.1109/Access.2021.3052387

DIN EN 50413:2009-08 — Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN EN 50413:2009-08. Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromag-netischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz). https://www.vde-verlag.de/normen/0848030/din-en-50413-vde-0848-1-2009-08.html, zuletzt aufgerufen am 13.06.2025.

DIN EN 62232:2017 — Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN EN 62232. Bestimmung der HF-Feldstärke, der Leistungsdichte und der spezifischen Absorptionsrate (SAR) in der Nachbarschaft von Funkkommunikations-Basisstationen zur Ermittlung der menschlichen Exposition. Deutsche Fassung: EN 62232:2017. Ausgabedatum: 2019-08. https://www.vde-verlag.de/standards/0800590/din-en-62232-vde-0848-232-2019-08.html, zuletzt aufgerufen am 01.07.2021.

EN 50401:2017 — European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). EN 50401:2017. Product standard to demonstrate the compliance of base station equipment with radiofrequency electromagnetic field exposure limits (110 MHz - 100 GHz), when put into service. 17/11/2017 OJ C 389.

Ericsson 2021 — Ericsson. EMF Test report: Ericsson AIR 5322 B258/B258A (FCC), Ericsson GFTL-20:001526 Uen, Rev H, 2021-06-03. https://fcc.report/FCC-ID/TA8AKRX10103/5304026.pdf, zuletzt aufgerufen am 19.11.2024

EU 1999 — Rat der Europäischen Union. Empfehlung 1999/519/EG des Rates der europäischen Union vom 12. Juni 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz). Amtsblatt der Europäischen Union, L 199/59 vom 30.07.1999. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999H0519, zuletzt aufgerufen am 13.06.2025

EU 2014 — Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2014/53/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über die Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt und zur Aufhebung der Richtlinie 1999/5/EG. Amtsblatt der Europäischen Union, L 153/62, 22.05.2014

Foroughimehr et al. 2023 — Foroughimehr N, Vilagosh Z, Yavari A, Wood A. The Effects of mmW and THz Radiation on Dry Eyes: A Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Computational Simulation Using XFdtd. Sensors (Basel). 2023 Jun 24;23(13), doi: 10.3390/s23135853, Epub 20230624

Foroughimehr et al. 2024 — Foroughimehr N, Clayton AHA, Yavari A. Exploring Skin Interactions with 5G Millimeter-Wave through Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy. Electronics. 2024;13(9), doi: 10.3390/electronics13091630

Foster und Balzano 2022 — Foster KR, Balzano Q. Comments on Martin Pall, "Millimeter (MM) wave and microwave frequency radiation produce deeply penetrating effects: the biology and the physics", Rev Environ Health 2021;37:247-58. Rev Environ Health. 2022 Jun 27;37(2):291-3, doi: 10.1515/reveh-2021-0086, Epub 20210716

FuAG 2017 Funkanlagengesetz vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1947), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 6. Mai 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 148) geändert worden ist. https://www.gesetze-im-internet.de/fuag/, zuletzt aufgerufen am 13.06.2025

GSMA 2025 GSM Association (GSMA). 5G EMF Surveys. https://www.gsma.com/publicpolicy/emf-and-health/safety-of-5g-networks/5g-emf-surveys, zuletzt aufgerufen am 28.02.2025

Hammarin et al. 2024a Hammarin G, Norder P, Harimoorthy R, Chen G, Berntsen P, Widlund PO, Stoij C, Rodilla H, Swenson J, Branden G, Neutze R. No observable non-thermal effect of microwave radiation on the growth of microtubules. Sci Rep. 2024a Aug 7;14(1):18286, doi: 10.1038/s41598-024-68852-3, Epub 20240807

Hammarin et al. 2024b Hammarin G, Norder P, Harimoorthy R, Chen G, Berntsen P, Widlund PO, Stoij C, Rodilla H, Swenson J, Branden G, Neutze R. Author Correction: No observable non-thermal effect of microwave radiation on the growth of microtubules. Sci Rep. 2024b Sep 23;14(1):21992, doi: 10.1038/s41598-024-72098-4, Epub 20240923

Hasgall et al. 2022 Hasgall PA, Di Gennaro F, Baumgartner C, Neufeld E, Lloyd B, Gosselin MC, Payne D, Klingenböck A, Kuster N. IT'IS Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues. Version 4.1, Feb 22, 2022, DOI: 10.13099/VIP21000-04-1. https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/overview/, zuletzt aufgerufen am 19.11.2024

Health Council of the Netherlands 2020a Health Council of the Netherlands. Background document to the advisory report 5G and health. No. 2020/16Ae. https://www.healthcouncil.nl/binaries/healthcouncil/documenten/advisory-reports/2020/09/02/5g-and-health/Background-document-to-the-advisory-report-5G-and-health.pdf, zuletzt aufgerufen am 25.07.2025

Health Council of the Netherlands 2020b Health Council of the Netherlands. 5G and health. No. 2020/16e. https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2020/09/02/5g-and-health, zuletzt aufgerufen am 25.07.2025

Herssens et al. 2022 Herssens H, Toribio D, De Borre E, Thielens A. Whole-Body Averaged Absorbed Power in Insects Exposed to Far-Field Radio-Frequency Electromagnetic Fields. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2022 11/01;70(11):11070-8, doi: 10.1109/TAP.2022.3209201

IARC 2013 International Agency for Research on Cancer (IARC). Non-ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. 102, 1-460, IARC, Lyon, France, 2013, Seiten 1-460, ISBN 978-92-832-1325-3 (Print Book), 978-92-832-0140-3 (PDF)

IARC 2019 International Agency for Research on Cancer (IARC). Preamble to the IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans. International Agency for Research on Cancer. Lyon, France (amended January 2019). https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2019/07/Preamble-2019.pdf, zuletzt aufgerufen am 06.03.2025

ICNIRP 1998 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys. 74:494-522, 1998

ICNIRP 2020 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). Health Phys. 2020 May;118(5):483-524, doi: 10.1097/HP.0000000000001210, Epub 2020/03/14

IEC 2022a International Electrotechnical Commission (IEC). Assessment of power density of human exposure to radiofrequency fields from wireless devices in close proximity to the head and body (Frequency range 6 GHz to 300 GHz) - Part 1: Measurement procedure. IEC/IEEE TR 63195-1. IEC Technical Committee 106. Geneva, Switzerland, 2022a

IEC 2022b International Electrotechnical Commission (IEC). Assessment of power density of human exposure to radiofrequency fields from wireless devices in close proximity to the head and body (Frequency range 6 GHz to 300 GHz) - Part 2: Computational procedures. IEC/IEEE TR 63195-2. IEC Technical Committee 106. Geneva, Switzerland, 2022b

IEC 2024 International Electrotechnical Commission (IEC). Evaluation of absorbed power density realted to human exposure to radio frequency fields from wireless communication devices between 6 GHz and 300 GHz. IEC/IEEE TR 63572 Ed.1. Committee Draft 2024-03-22. IEC Technical Committee 106. Geneva, Switzerland, 2024

Ijima et al. 2023a Ijima E, Li K, Hikage T, Nagai A, Murakami Y, Arima T, Ishitake T, Masuda H. Intensity-dependent Temperature Rise Induced by Local Exposure to 26.5 GHz Quasi-Millimeter-Wave in Rat. In Vivo. 2023a Sep-Oct;37(5):2092-9, doi: 10.21873/invivo.13306

Ijima et al. 2023b Ijima E, Kodera S, Hirata A, Hikage T, Matsumoto A, Ishitake T, Masuda H. Excessive whole-body exposure to 28 GHz quasi-millimeter wave induces thermoregulation accompanied by a change in skin blood flow proportion in rats. Front Public Health. 2023b;11:1225896, doi: 10.3389/fpubh.2023.1225896, Epub 20230904

ITU 2005 International Telecommunication Union (ITU). Specific attenuation model for rain for use in prediction methods. Recommendation ITU-R P.838-3 (03/2005). https://www.itu.int/rec/R-REC-P.838-3-200503-I/en, zuletzt aufgerufen am 01.06.2023

ITU 2016 International Telecommunication Union (ITU). Attenuation by atmospheric gases. Recommendation ITU-R P.676-11 (09/2016). https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-11-201609-S/en, zuletzt aufgerufen am 25.07.2025

ITU 2019 International Telecommunication Union (ITU). Attenuation due to clouds and fog. Recommendation ITU-R P.840-8 (08/2019). https://www.itu.int/rec/R-REC-P.840-8-201908-I/en, zuletzt aufgerufen am 01.06.2023

Jeladze et al. 2023 Jeladze V, Thielens A, Nozadze T, Korkotadze G, Partsvania B, Zaridze R. Estimation of the Specific Absorption Rate for a Honey bee Exposed to Radiofrequency Electromagnetic Fields from 2.5 to 100 GHz. In: 2023 IEEE XXVIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory 2023, ISBN 9798350315349

Jerbic et al. 2023 Jerbic K, Svejda JT, Sievert B, Rennings A, Fröhlich J, Erni D. The Importance of Subcellular Structures to the Modeling of Biological Cells in the Context of Computational Bioelectromagnetics Simulations. Bioelectromagnetics. 2023 Jan;44(1-2):26-46, doi: 10.1002/bem.22436, Epub 20230216

Jerbic 2024 Jerbic K. Computational Multiscale Models for Microdosimetric Investigations of Skin Tissues under Electromagnetic Exposure. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, doi: https://doi.org/10.17185/duepublico/81973

Jing et al. 2024 Jing R, Jiang Z, Tang X. Advances in Millimeter-Wave Treatment and Its Biological Effects Development. Int J Mol Sci. 2024 Aug 8;25(16), doi: 10.3390/ijms25168638, Epub 20240808

Kantz et al. 2005 Kantz J, Muller J, Hadeler KP, Landstorfer FM, Lang F. Insensitivity of cardiovascular function to low power cm-/mm-microwaves. Int J Environ Health Res. 2005 Jun;15(3):207-15, doi: 10.1080/09603120500105695

Karipidis et al. 2021 Karipidis K, Mate R, Urban D, Tinker R, Wood A. 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 Jul;31(4):585-605, doi: 10.1038/s41370-021-00297-6, Epub 2021/03/18

Kazemipour et al. 2016 Kazemipour A, Kleine-Ostmann T, Schrader T, Allal D, Charles M, Zilberti L, Borsero M, Bottauscio O, Chiampi M. Safety Checkpoints – Assessing heat transfer onto human skin after exposure to millimeter and submillimeter waves. IEEE Microwave Magazine. 2016;17(6):76-81, doi: 10.1109/mmm.2016.2538514

Kim et al. 2022 — Kim K, Lee YS, Kim N, Choi HD, Lim KM. 5G Electromagnetic Radiation Attenuates Skin Melanogenesis In Vitro by Suppressing ROS Generation. Antioxidants (Basel). 2022 Jul 26;11(8), doi: 10.3390/antiox11081449, Epub 20220726

Kojima et al. 2024 — Kojima M, Tasaki T, Kamijo T, Hada A, Suzuki Y, Ikehata M, Sasaki H. Effects of High Temperature and High Humidity on the Degree of Ocular Damage Caused by 60 GHz Millimeter Wave Exposure. Health Phys. 2024 Sep 2, doi: 10.1097/HP.0000000000001843, Epub 20240902

Kojima et al. 2025 — Kojima M, Tasaki T, Kamijo T, Hada A, Suzuki Y, Kik A, Ikehata M, Sasaki H. Investigation of the Ocular Response and Corneal Damage Threshold of Exposure to 28 GHz Quasi-millimeter Wave Exposure. Health Phys. 2025 Jan 13, doi: 10.1097/HP.0000000000001951, Epub 20250113

Kotrovskaia 1994 — Kotrovskaia TI. Sensory reactions evoked by weak electromagnetic stimuli in humans. Millimetrovie Volni v Biologii i Meditcine. 1994;3:32-8 (in Russian)

LAI 2014 — Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI). Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder in der Fassung des Beschlusses der 128. Sitzung der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz am 17. und 18. September 2014 in Landshut. https://www.lai-immissionsschutz.de/documents/ack_1503575775.pdf, zuletzt aufgerufen am 13.06.2025

Lawler et al. 2022 — Lawler NB, Evans CW, Romanenko S, Chaudhari N, Fear M, Wood F, Smith NM, Wallace VP, Swaminathan Iyer K. Millimeter waves alter DNA secondary structures and modulate the transcriptome in human fibroblasts. Biomedical optics express. 2022 May 1;13(5):3131-44, doi: 10.1364/BOE.458478, Epub 20220428

Le Dréan et al. 2013 — Le Dréan Y, Mahamoud YS, Le Page Y, Habauzit D, Le Quément C, Zhadobov M, Sauleau R. State of knowledge on biological effects at 40-60 GHz. Comptes Rendus Physique. 2013 May;14(5):402-11, doi: 10.1016/j.crhy.2013.02.005

Lebedeva 1993 — Lebedeva NN. Sensor and subsensor reactions of a healthy man to peripheral effects of low-intensity millimeter waves. Miloecollimetrovie Volni v Biologii i Meditcine. 1993;2:5-23 (in Russian)

Lebedeva 1995 — Lebedeva NN. Neurophysiological mechanisms of biological effects of peripheral action of low-intensity nonionizing electromagnetic fields in humans. Moscow, Russia: 10th Russian Symposium ‘‘Millimeter Waves in Medicine and Biology,’’ April, 1995 (Digest of papers). Moscow: IRE RAN. 1995: 138-40 (in Russian)

Li et al. 2023a — Li K, Hikage T, Masuda H, Ijima E, Nagai A, Taguchi K. Parameter variation effects on millimeter wave dosimetry based on precise skin thickness in real rats. Sci Rep. 2023a Oct 13;13(1):17397, doi: 10.1038/s41598-023-44572-y, Epub 20231013

Li et al. 2023b — Li K, Kodera S, Poljak D, Diao Y, Sasaki K, Šušnjara A, Prokop A, Taguchi K, Xi J, Zhang S, Yao M, Sacco G, Zhadobov M, Hajj WE, Hirata A. Calculated Epithelial/Absorbed Power Density for Exposure From Antennas at 10–90 GHz: Intercomparison Study Using a Planar Skin Model. Ieee Access. 2023b;11:7420-35, doi: 10.1109/access.2023.3238582

Li et al. 2024 — Li K, Kodera S, Poljak D, Diao Y, Sasaki K, Zhang S, Yao M, Kapetanovic A, Li C, Wu T, Liebig T, Simon W, Hirata A. Spatially Averaged Epithelial/Absorbed Power Density for Nonplanar Skin Models Exposed to Antenna at 10–90 GHz. Ieee Access. 2024;12:15379-89, doi: 10.1109/access.2024.3358109

Liu et al. 2024 — Liu S, Tobita K, Onishi T, Taki M, Watanabe S. Electromagnetic field exposure monitoring of commercial 28-GHz band 5G base stations in Tokyo, Japan. Bioelectromagnetics. 2024 Sep;45(6): 281-92, doi: 10.1002/bem.22505, Epub 2024/05/23

Martin et al. 2020 — Martin C, Percevault F, Ryder K, Sani E, Le Cun JC, Zhadobov M, Sauleau R, Le Drean Y, Habauzit D. Effects of Radiofrequency Radiation on Gene Expression: A Study of Gene Expressions of Human Keratinocytes From Different Origins. Bioelectromagnetics. 2020 Oct;41(7):552-7, doi: 10.1002/bem. 22287, Epub 20200819

Martin et al. 2024 — Martin C, Evrard B, Percevault F, Ryder K, Darde T, Lardenois A, Zhadobov M, Sauleau R, Chalmel F, Le Drean Y, Habauzit D. Transcriptional landscape of human keratinocyte models exposed to 60-GHz millimeter-waves. Toxicol In Vitro. 2024 May;97: 105808, doi: 10.1016/j.tiv.2024.105808, Epub 20240312

Mevissen et al. 2025 — Mevissen M, Fröhlich J, Schürmann D. Elektromagnetische Felder im Frequenzbereich 5.8-200 GHz – Biologische Effekte und Konsequenzen für die Gesundheit. Bericht im Auftrag des Schweizer Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Bern, Mai 2025. 1-57. https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=73167, zuletzt aufgerufen am 17.06.2025. 2025

Minier et al. 2023 — Minier L, Debouzy JC, Foerster M, Pierre V, Maindet C, Crouzier D. Hypoalgesia and parasympathetic effects of millimeter waves on experimentally induced pain in healthy volunteers. Electromagn Biol Med. 2023 Jan 2;42(1):3-11, doi: 10.1080/15368378.2022.2162919, Epub 20221228

Miura et al. 2021 Miura N, Kodera S, Diao Y, Higashiyama J, Suzuki Y, Hirata A. Power Absorption and Skin Temperature Rise From Simultaneous Near-Field Exposure at 2 and 28 GHz. Ieee Access. 2021;9:152140-9, doi: 10.1109/access.2021.3126372

Mobilfunknetzbetreiber 2023 Deutsche Telekom Technik, Telefónica Germany, Vodafone, 1&1 Mobilfunk (Mobilfunknetzbetreiber). Selbstverpflichtung der Mobilfunkbranche über Informations-, Kommunikations- und Gesundheitsschutzmaßnahmen beim Ausbau der Mobilfunknetze, abgegeben durch die vier deutschen Mobilfunknetzbetreiber Deutsche Telekom Technik GmbH, Telefónica Germany GmbH & Co. OHG, Vodafone GmbH, 1&1 Mobilfunk GmbH. Stand: 19. Juni 2023. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Strahlenschutz/selbstverpflichtung_mobilfunkbetreiber_2023_bf.pdf, zuletzt aufgerufen am 04.03.2025

Morimoto und Hirata 2022 Morimoto R, Hirata A. Assessment of incident power density in different shapes of averaging area for radio-frequency exposure above 6 GHz. Phys Med Biol. 2022 Oct 31;67(21), doi: 10.1088/1361-6560/ac994d, Epub 20221031

Moroder 2021 Moroder C. Untersuchung des Wet-Antenna-Effekts bei Richtfunkstrecken. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München. https://mediatum.ub.tum.de/1559781, zuletzt aufgerufen am 01.06.2023

Müller et al. 2004 Müller J, Hadeler KP, Müller V, Waldmann J, Landstorfer FM, Wisniewski R, Kantz J, Lang F. Influence of low power cm-/mm-microwaves on cardiovascular function. Int J Environ Health Res. 2004 Oct;14(5):331-41, doi: 10.1080/09603120400004006

Nelson et al. 2003 Nelson DA, Walters TJ, Ryan KL, Emerton KB, Hurt WD, Ziriax JM, Johnson LR, Mason PA. Inter-species extrapolation of skin heating resulting from millimeter wave irradiation: modeling and experimental results. Health Phys. 2003 May;84(5):608-15, doi: 10.1097/00004032-200305000-00006

Pakhomov et al. 1998 Pakhomov AG, Akyel Y, Pakhomova ON, Stuck BE, Murphy MR. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves: a review of the literature. Bioelectromagnetics. 1998;19(7):393-413, Epub 1998/10/15

Pall 2022 Pall ML. Millimeter (MM) wave and microwave frequency radiation produce deeply penetrating effects: the biology and the physics. Rev Environ Health. 2022 Jun 27;37(2):247-58, doi: 10.1515/reveh-2020-0165, Epub 20210526

Panagopoulos 2022 Panagopoulos DJ. Comments on Pall's "Millimeter (MM) wave and microwave frequency radiation produce deeply penetrating effects: the biology and the physics". Rev Environ Health. 2022 Jun 27;37(2):295-7, doi: 10.1515/reveh-2021-0090, Epub 20210712

Parker et al. 2024 — Parker JE, Butterworth JW, Rodriguez RA, Kowalczewski CJ, Christy RJ, Voorhees WB, Payne JA, Whitmore JN. Thermal damage to the skin from 8.2 and 95 GHz microwave exposures in swine. Biomed Phys Eng Express. 2024 May 17;10(4), doi: 10.1088/2057-1976/ad488e, Epub 20240517

Parsadanyan et al. 2024 — Parsadanyan MA, Shahinyan MA, Mikaelyan MS, Grigoryan SV, Poghosyan GH, Vardevanyan PO. Influence of millimeter range electromagnetic waves on bovine serum albumin interaction with acridine orange. Electromagn Biol Med. 2024 Oct;43(4):246-55, doi: 10.1080/15368378.2024.2383683, Epub 20240728

Partyla et al. 2017 — Partyla T, Hacker H, Edinger H, Leutzow B, Lange J, Usichenko T. Remote Effects of Electromagnetic Millimeter Waves on Experimentally Induced Cold Pain: A Double-Blinded Crossover Investigation in Healthy Volunteers. Anesthesia and analgesia. 2017 Mar;124(3):980-5, doi: 10.1213/ANE.0000000000001657, Epub 2016/10/27

Peleg et al. 2023 — Peleg M, Berry EM, Deitch M, Nativ O, Richter E. On radar and radio exposure and cancer in the military setting. Environ Res. 2023 Jan 1;216(Pt 2):114610, doi: 10.1016/j.envres.2022.114610, Epub 20221021

Perov et al. 2022 — Perov SY, Rubtsova NB, Belaya OV. Status of the Neuroendocrine System in Animals Chronically Exposed to Electromagnetic Fields of 5G Mobile Network Base Stations. Bull Exp Biol Med. 2022 Dec;174(2):277-9, doi: 10.1007/s10517-023-05689-2, Epub 20230104

Pfeifer et al. 2019 — Pfeifer S, Carrasco E, Crespo-Valero P, Neufeld E, Kuhn S, Samaras T, Christ A, Capstick MH, Kuster N. Total Field Reconstruction in the Near Field Using Pseudo-Vector *E*-Field Measurements. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2019;61(2):476-86, doi: 10.1109/temc.2018.2837897

Possenti et al. 2023 — Possenti L, Barbiroli M, Vitucci EM, Fuschini F, Fosci M, Degli-Esposti V. A Study on mm-Wave Propagation in and Around Buildings. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. 2023;4:736-47, doi: 10.1109/ojap.2023.3297201

Radarkommission 2003 — Expertenkommission zur Frage der Gefährdung durch Strahlung in früheren Radareinrichtungen der Bundeswehr und der NVA (Radarkommission). Bericht der Expertenkommission zur Frage der Gefährdung durch Strahlung in früheren Radareinrichtungen der Bundeswehr und der NVA. Abschlussbericht, erstellt im Auftrag des Deutschen Bundesministeriums der Verteidigung. Berlin, 2. Juli 2003. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/44/Bericht_Radarkommission_Deutscher_Bundestag_Volltext.pdf, zuletzt aufgerufen am 04.03.2025

Radzievsky et al. 1999 — Radzievsky AA, Rojavin MA, Cowan A, Ziskin MC. Suppression of pain sensation caused by millimeter waves: a double-blinded, cross-over, prospective human volunteer study. Anesthesia and analgesia. 1999 Apr;88(4):836-40, doi: 10.1097/00000539-199904000-00029

Rampazzo et al. 2024 — Rampazzo E, Persano L, Karim N, Hodgking G, Pinto R, Casciati A, Tanori M, Zambotti A, Bresolin S, Cani A, Pannicelli A, Davies IW, Hancock C, Palego C, Viola G, Mancuso M, Merla C. On the effects of 30.5 GHz sinusoidal wave exposure on glioblastoma organoids. Front Oncol. 2024;14:1307516, doi: 10.3389/fonc.2024.1307516, Epub 20240531

Ramundo-Orlando 2010 — Ramundo-Orlando A. Review Article: Effects of millimeter waves radiation on cell membrane. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. 2010 01/01;31:1400

Russell 2018 — Russell CL. 5 G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications. Environ Res. 2018 Aug;165:484-95, doi: 10.1016/j.envres.2018.01.016, Epub 2018/04/16

Sandoval-Diez et al. 2025 — Sandoval-Diez N, Belácková L, Fernandes Veludo A, Jalilian H, Guida F, Deltour I, Thielens A, Zahner M, Fröhlich J, Huss A, Röösli M. Determining the relationship between mobile phone network signal strength and radiofrequency electromagnetic field exposure: protocol and pilot study to derive conversion functions. Open Research Europe. 2025;4, doi: 10.12688/openreseurope.18285.2

SCENIHR 2009 — Scientific Committee on Emerging Newly Identified Health Risks (SCENIHR). Health Effects of Exposure to EMF. http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_022.pdf, zuletzt aufgerufen am zuletzt aufgerufen am 06.03.2025

Shapira et al. 2023 — Shapira S, Nitecki M, Tzur D, Schwartz N, Silverman BG, Zack O, Friedensohn-Zuck L. Occupational Exposure to Nonionizing Radiation and Risk for Malignancy in Young Adults. Mil Med. 2023 Jul 22;188(7-8):e2424-e30, doi: 10.1093/milmed/usad020

Simko und Mattsson 2019 — Simko M, Mattsson MO. 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 Sep 13;16(18), doi: 10.3390/ijerph16183406, Epub 2019/09/22

SSK 2021 — Strahlenschutzkomission (SSK). Elektromagnetische Felder des Mobilfunks im Zuge des aktuellen 5G-Netzausbaus – Technische Aspekte und biologische Wirkungen im unteren Frequenzbereich (FR1, bis ca. 7 GHz). Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 317. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 09./10. Dezember 202. Bekanntmachung im BAnz AT 26.09.2022 B3. https://ssk.de/publikationen/2021/2021-12-10-stgn-5g-mobilfunk

Taguchi et al. 2022 — Taguchi K, Kodera S, Hirata A, Kashiwa T. Computation of Absorbed Power Densities in High-Resolution Head Models by Considering Skin Thickness in Quasi-Millimeter and Millimeter Wave Bands. IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology. 2022;6(4):516-23, doi: 10.1109/jerm.2022.3203576

Thielens et al. 2020 — Thielens A, Greco MK, Verloock L, Martens L, Joseph W. Radio-Frequency Electromagnetic Field Exposure of Western Honey Bees. Sci Rep. 2020 Jan 16;10(1):461, doi: 10.1038/s41598-019-56948-0, Epub 20200116

Törnevik 2023 — Törnevik C. Fachvortrag mit Diskussion zum Thema „Information on 5G FR2 radio products related to EMF and health aspects“ in der Sitzung der Arbeitsgruppe „EMF und 5G-Mobilfunknetze“ des Ausschusses „Nichtionisierende Strahlen“ der Strahlenschutzkommission vom 12.06.2023.

Überbacher et al. 2011 — Überbacher R, Cecil S, Schmid G. RF dosimetry of the domesticated honey bee (Apis Mellifera) in the frequency range from 500 MHz to 20 GHz. Poster presentation PB-60 at the 33rd annual meeting of the Bioelectromagnetics Society. June 12-17, 2011, Halifax, Canada.

Unger 1994 — Unger H-G. Hochfrequenztechnik in Funk und Radar. Teubner Studienskripten. Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, 1994, ISBN 3519300184 (ISBN-13: 9783519300182)

Unger 2022 — Unger P. Fachvortrag mit Diskussion zum Thema "Mobilfunkausbau der Telekom: Stand und Perspektiven" in der Sitzung der Arbeitsgruppe „EMF und 5G-Mobilfunknetze“ des Ausschusses „Nichtionisierende Strahlen“ der Strahlenschutzkommission vom 05.12.2022.

von Baeyer et al. 2005 — von Baeyer CL, Piira T, Chambers CT, Trapanotto M, Zeltzer LK. Guidelines for the cold pressor task as an experimental pain stimulus for use with children. J Pain. 2005 Apr;6(4):218-27, doi: 10.1016/j.jpain.2005.01.349

Walters et al. 2004 — Walters TJ, Ryan KL, Nelson DA, Blick DW, Mason PA. Effects of blood flow on skin heating induced by millimeter wave irradiation in humans. Health Phys. 2004 Feb;86(2):115-20, doi: 10.1097/00004032-200402000-00001

Walther 2022 — Walther L. Fachvortrag mit Diskussion zum Thema „5G im FR2: Grundlagen, Unterschiede zu FR1, Anwendungsbeispiele“ in der Sitzung der Arbeitsgruppe „EMF und 5G-Mobilfunknetze“ des Ausschusses „Nichtionisierende Strahlen“ der Strahlenschutzkommission vom 14.09.2022.

Wood 2023 — Wood M. Fachvortrag mit Diskussion zum Thema „Addressing Public Concerns around Telecommunications Facilities - Telstra's EMF Testing and Communications" in der Sitzung der Arbeitsgruppe „EMF und 5G-Mobilfunknetze" des Ausschusses „Nichtionisierende Strahlen" der Strahlenschutzkommission vom 19.09.2023.

Wood et al. 2021 — Wood A, Mate R, Karipidis K. Meta-analysis of in vitro and in vivo studies of the biological effects of low-level millimetre waves. J Expo Sci Environ Epidemiol. 2021 Jul;31(4):606-13, doi: 10.1038/s41370-021-00307-7, Epub 2021/03/18

Yao et al. 2022 — Yao C, Wang H, Sun L, Ren K, Dong J, Wang H, Zhang J, Xu X, Yao B, Zhou H, Zhao L, Peng R. The Biological Effects of Compound Microwave Exposure with 2.8 GHz and 9.3 GHz on Immune System: Transcriptomic and Proteomic Analysis. Cells-Basel. 2022 Nov 30;11(23), doi: 10.3390/cells11233849, Epub 20221130

Yuasa et al. 2024 — Yuasa A, Uehara S, Ushizawa K, Kodera S, Arai N, Hirata A, Otaka Y. The thermal sensation threshold and its reliability induced by the exposure to 28 GHz millimeter-wave. Front Neurosci. 2024;18:1331416, doi: 10.3389/fnins.2024.1331416, Epub 20240227

Zilberti et al. 2014 — Zilberti L, Arduino A, Bottauscio O, Chiampi M. Parametric analysis of transient skin heating induced by terahertz radiation. Bioelectromagnetics. 2014 Jul;35(5):314-23, doi: 10.1002/bem. 21842, Epub 2014/02/11

Zilberti et al. 2015 — Zilberti L, Voyer D, Bottauscio O, Chiampi M, Scorretti R. Effect of Tissue Parameters on Skin Heating Due to Millimeter EM Waves. IEEE Transactions on Magnetics. 2015;51(3):9400904, doi: 10.1109/tmag.2014.2363898

6 Abkürzungsverzeichnis

ACTH	Adrenocorticotropes Hormon
Alpha-MSH	Alpha- melanocyte stimulating hormone; Alpha-Melanozyten-stimulierendes Hormon
ANFR	Agence Nationale des Fréquences (Frankreich) (*Nationale Agentur für Frequenzen*)
ANSES	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (Frankreich) (*Nationale Behörde für Lebensmittelsicherheit, Umweltschutz und Arbeitsschutz*)
CD-Spektroskopie	circular dichroism spectroscopy (*Zirkulardichroismus-Spektroskopie*)
CI	Confidence Interval (*Konfidenzintervall*)
CLUE-H	Cluster on Electromagnetic fields Exposure and Health
CPT	Cold Pressor Test (*Kaltwassertest*)
DCF-DA	Dichlorodihydrofluorescein Diacetate (*Dichlordihydrofluorescein-Diacetat*)
DNA	Desoxyribonucleic acid (*Desoxyribonukleinsäure*)
EEG	Elektroenzephalographie
EKG	Elektrokardiogramm
ELISA	Enzyme-linked immunosorbent assay
ETAIN	Enhancing the investigation of RF-EMF and its possible effects on human health and biodiversity
FAD	Flavin-Adenin-Dinukleotid
FAIR	Findability, Accessibility, Interoperability, and Reusability (*Auffindbarkeit, Zugänglichkeit, Interoperabilität und Wiederverwendbarkeit*)
FLIM	Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy
FR1	Frequency Range 1
FR2	Frequency Range 2
GHz	Gigahertz

GOLiAT	5G exposure, casual effects and risk perception through citizen engagement
GSMA	GSM Association
HaCaT	spontaneously transformed human keratinocyte cell culture (*Spontan transformierte menschliche Keratinozyten-Zellkultur*)
HAS	Humanserumalbumin
HEK	Human Embryonic Kidney Cells (*Menschliche embryonale Nierenzellen*)
HF	Hochfrequenz
HF-EMF	Hochfrequente(s) elektromagnetische(s) Feld(er)
HSC	heat shock control (*Hitzeschock-Kontrolle*)
IARC	International Agency for Research on Cancer (*Internationale Agentur für Krebsforschung*)
ICC	Intraclass Correlation Coefficient (*Intraklassen-Korrelation*)
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (*Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung*)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IL	Interleukin
KI	Konfidenzintervall
MANOVA	Multivariate Analysis of Variance (*Multivariate Varianzanalyse*)
Mlph	Melanophilin
MMW	Millimeterwelle
MyoVa	Myosin VA Gen
NextGEM	Next Generation Integrated Sensing and Analytical System for Monitoring and Assessing Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure and Health
NHEK	normal human epidermal keratinocytes (*normale menschliche epidermale Keratinozyten*)
NIKH	NextGEM Innovation and Knowledge Hub

OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (*Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren*)
OR	Odds Ratio
PA	Polyamine
qRT-PCR	quantitative Reverse Transcriptase Polymerase Chain Reaction (*quantitative Polymerase-Kettenreaktion mit umgekehrter Transkription*)
Rab27a	Ras-related protein Rab-27A
RF-EMF	Radiofrequency electromagnetic field(s)
ROS	Reactive oxygen species (*Reaktive Sauerstoffspezies*)
SAR	Specific Absorption Rate (*Spezifische Absorptionsrate*)
SCENIHR	Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (Europäische Union)
SEAWave	Scientific-Based Exposure and Risk Assessment of Radiofrequency and mm-Wave Systems from children to elderly (5G and Beyond)
TDD	Time Division Duplex
THz	Terahertz
TNF	Tumor-Nekrose-Faktor
TRP-1	tyrosinase related protein-1 (*Tyrosinase-verwandtes Protein-1*)
TRP-2	tyrosinase related protein-2 (Tyrosinase-verwandtes Protein-2)
WHO	World Health Organization (*Weltgesundheitsorganisation*)
WLAN	Wireless Local Area Network (*Drahtloses lokales Funknetz*)

7 Begriffserklärungen

3G	3. Generation der Mobilfunkkommunikation (3G): Als dritte Mobilfunkgeneration wird der Mobilfunkstandard UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) bezeichnet. UMTS nutzte das 2100 MHz-Frequenzband. In Deutschland ist UMTS inzwischen abgeschaltet. Es konnten Downlink-Datenraten von bis zu einigen 100 kBit s^{-1} (mit der Erweiterung HSPA+ bis zu einigen 10 MBit s^{-1}) erreicht werden.
4G	4. Generation der Mobilkommunikation (4G): Zur vierten Mobilfunkgeneration zählen die Mobilfunkstandards Long Term Evolution (LTE) und Long Term Evolution - Advanced (LTE-A) mit Downlink-Datenraten bis zu einigen 100 MBit s^{-1}. LTE und LTE-A nutzen in Deutschland derzeit 700 MHz-, 800 MHz-, 900 MHz-, 1,5 GHz, 1,8 GHz-, 2,1 GHz- und 2,6 GHz-Frequenzbänder.
5G	5. Generation der Mobilkommunikation (5G): Als fünfte Mobilfunkgeneration wird der Mobilfunkstandard 5G bezeichnet. 5G nutzt in Deutschland derzeit im Frequency Range 1 (FR1) die Frequenzbänder 700 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz und 3,6 GHz mit theoretisch erzielbaren Downlink-Datenraten von etwas über 1 GBit s^{-1} sowie im Frequency Range 2 (FR2) das Frequenzband 26 GHz mit theoretisch erzielbaren Downlink-Datenraten bis zu einigen GBit s^{-1} (Stand 07/2025).
Absorption (Strahlung)	Die Absorption bezeichnet die Abschwächung einer Strahlung beim Durchgang durch Materie durch Umwandlung von Strahlungsenergie in eine andere Energieform (z. B. thermische Energie).
Antennenarray	Ein Antennenarray besteht aus einzelnen Antennenelementen, die durch phasenrichtige Ansteuerung zu einer Gruppenantenne mit hoher Richtwirkung kombiniert werden können und so das Beamforming ermöglichen.
Antennengewinn	Der Antennengewinn ist das Verhältnis aus der von einer realen Antenne in deren Hauptstrahlrichtung im Fernfeld in einer bestimmten Entfernung erzeugten Leistungsdichte zu der Leistungsdichte einer Referenzantenne (typischerweise ein idealer isotroper Strahler) bei identischer Eingangsleistung in derselben Entfernung in Hauptstrahlrichtung.

Basisgrenzwert (Elektromagnetische Felder)	Der Basisgrenzwert ist ein Vergleichswert für physikalische Größen, die im Körperinneren als Folge einer Exposition gegenüber von außen auf den Körper einwirkenden elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern verursacht (induziert) werden und unmittelbar im Zusammenhang mit der zu begrenzenden biophysikalischen Wirkung stehen. In den Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) werden zur Bewertung elektromagnetischer Felder, abhängig von der Frequenz, Basisgrenzwerte für die intrakorporale elektrische Feldstärke (> 0 Hz bis 10 MHz), die intrakorporale elektrische Stromdichte (> 0 Hz bis 10 MHz), lokale und über den gesamten Körper gemittelte spezifische Absorptionsrate (100 kHz bis 6 GHz), spezifische Absorption (400 MHz bis 6 GHz), absorbierte Leistungsdichte (100 kHz bis 300 GHz), und absorbierte Energiedichte (6 GHz bis 300 GHz) festgelegt. Die Überprüfung der Einhaltung der Basisgrenzwerte erfordert im Allgemeinen einen hohen Aufwand, weshalb sie in der Praxis typischerweise nur dann erfolgt, wenn Referenzwerte (siehe dort) überschritten werden. Die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) empfiehlt zur Begrenzung elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder ein Konzept aus Basisgrenzwerten und Referenzwerten. Basisgrenzwerte werden für im Körper induzierte elektrische Größen festgelegt und adressieren biologische Wirkungen der Felder. Referenzwerte sind aus den Basisgrenzwerten unter Annahme konservativer (ungünstiger) Expositionsbedingungen abgeleitet.
Beamforming	Beamforming bezeichnet die Möglichkeit die Form und die Ausrichtung des Beams bzw. der Sendekeule einer intelligenten (adaptiven) Antenne gezielt zu verändern. Bei modernen adaptiven Antennen, wie sie im Zuge des 5G-Ausbaus teilweise zum Einsatz kommen, geschieht dies Software-gesteuert, um die Sendekeule gezielt in eine bestimmte Richtung zu lenken (z. B. in einen Bereich mit großer Benutzerdichte).
Beugung (Funkübertragung)	Die Beugung oder Diffraktion ist die Ablenkung von elektromagnetischen Wellen in eine oder mehrere neue Richtung(en) an einem Hindernis, z. B. an einer Gebäudekante. Durch Beugung kann sich eine Welle in Raumbereiche ausbreiten, die auf geradem Weg durch das Hindernis versperrt wären.
Blut-Perfusion	Durchströmung des Körpers oder eines Organs mit Blut.
Broadcast Beam(s)	Strahlungskeule(n) einer 5G-Antenne, über die die Signalisierungsinformation abgestrahlt wird.

Eindringtiefe (elektromagnetische Felder)	Bei elektromagnetischen Feldern bezeichnet die Eindringtiefe die Wegstrecke in Materie, nach der die Feldstärke auf 1 e^{-1} oder 37 % ihres Anfangswertes abgesunken ist.
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power (*äquivalente isotrope Strahlungsleistung*) ist die Wirkleistung, die anstelle einer real betrachteten Antenne einem idealen verlustlosen, isotropen Strahler zugeführt werden müsste, damit dieser in einem bestimmten Abstand (im Fernfeld) die gleiche elektromagnetische Leistungsdichte lieferte wie die reale Antenne in ihrer Hauptstrahlrichtung (Fernfeld).
Fading (Funkübertragung)	Als Fading (Schwund) bezeichnet man bei Funkübertragungen durch Interferenz, Abschattungen, Mehrwegeausbreitungen und durch Doppler-Effekt verursachte örtliche Schwankungen der Feldstärke.
FR1	Die Abkürzung FR1 bezeichnet den Frequenzbereich (Frequency Range) 1. Dieser umfasst die Frequenzen von 410 MHz bis 7,125 GHz (siehe auch „5G“ für die darin aktuell für 5G-Anwendungen genutzten Frequenzbereiche in Deutschland)
FR2	Die Abkürzung FR2 bezeichnet den Frequenzbereich (Frequency Range) 2. Dieser umfasst die Frequenzen von 24,25 GHz bis 71 GHz (siehe auch „5G“ für die darin aktuell für 5G-Anwendungen genutzten Frequenzbereiche in Deutschland)
Funkzelle	Eine Funkzelle ist ein Gebiet, das von einem Sender versorgt wird. Je nach Größe unterscheidet man zwischen Femtozellen, Pikozellen, Mikrozellen und Makrozellen. Speziell im Mobilfunk versteht man unter Funkzelle den Bereich innerhalb eines Mobilfunknetzes, der durch eine Basisstation mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern versorgt wird. Die Größe einer Funkzelle im Netz richtet sich u. a. nach Datendurchsatz und topographischen Gegebenheiten.
Handover	Vorgang in einem Mobilkommunikationsnetz, bei dem die Funkverbindung mit dem mobilen Endgerät während eines Gesprächs oder einer Datenverbindung von einer Funkzelle in eine andere nahtlos übergeben wird.
Hornschicht	Die Hornschicht (Stratum Corneum) ist ein Teil der Oberhaut (Epidermis)
Hydrometeor	Der Begriff Hydrometeor ist der in der meteorologischen Fachsprache benutzte Oberbegriff für alle Formen kondensierten Wassers, die an der Erdoberfläche oder in der Atmosphäre beobachtet werden können.

ICNIRP	Die ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (*Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung*) ist eine internationale Vereinigung von Wissenschaftlern, die durch die Analyse und Bewertung des Kenntnisstands zur gesundheitlichen Wirkung von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern, optischer Strahlung sowie Infra- und Ultraschall zum Schutz des Menschen vor nichtionisierender Strahlung beiträgt. Als wichtige Ergebnisse ihrer Arbeit werden Grenzwertempfehlungen veröffentlicht, die u. a. von der EU bei der Erstellung von Empfehlungen und Rechtsakten berücksichtigt werden.
Latenzzeit	In der Telekommunikationstechnik die Verzögerungszeit zwischen dem Auftreten eines Ereignisses und dem Auftreten eines erwarteten Folgeereignisses.
Lichtgeschwindigkeit	Geschwindigkeit, mit der sich elektromagnetische Wellen ausbreiten. Im Vakuum beträgt die Lichtgeschwindigkeit 299 792 458 $m\ s^{-1}$. In bodennaher Luft ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen mit ca. 299 710 $km\ s^{-1}$ etwas geringer als im Vakuum.
Massive-MIMO	Siehe „MIMO“
Matching Layer	Unter einem Matching Layer versteht man eine Materialschicht, die an der Grenze zwischen zwei Medien A und B unterschiedlicher dielektrischer Gewebe- bzw. Wellenausbreitungseigenschaften eingefügt wird. Durch spezielle dielektrische Eigenschaften des Matching Layers (im Verhältnis zu den dielektrischen Eigenschaften der beiden Medien A und B) führt sein Vorhandensein dazu, dass der resultierende Reflexionskoeffizient für elektromagnetische Wellen bei Wellenausbreitung von Medium A zu Medium B kleiner ist als beim direkten Übergang von Medium A zu Medium B (ohne Matching Layer). Das Vorhandensein des Matching Layers führt also dazu, dass mehr elektromagnetische Strahlungsleistung von Medium A in das Medium B übergeleitet wird, als dies ohne Matching Layer der Fall wäre.
Maxwell-Gleichungen	Die Maxwell-Gleichungen sind die vier Grundgleichungen für alle elektromagnetischen Erscheinungen und die Elektrodynamik. Sie beschreiben, wie elektrische und magnetische Felder erzeugt werden sowie untereinander und mit elektrischen Ladungen und elektrischem Strom zusammenhängen.

Mehrträgerverfahren	Ein Mehrträgermodulations-Verfahren (OFDMA, s. Abk.-Verzeichnis), bei dem die Daten auf mehrere Träger verteilt werden. Diese Subträger sind orthogonal zueinander, d. h. das Maximum eines Subträgers im Amplituden-Spektrum fällt mit den Nulldurchgängen aller anderen Subträger zusammen. Daher gibt es kein Übersprechen zwischen den Subträgern und somit ist auch kein großer Sicherheitsabstand zwischen ihnen erforderlich. Dies führt zu einem relativ geringen Bandbreite-Bedarf.
Mehrwegeausbreitung	Mehrwegeausbreitung tritt auf, wenn elektromagnetische Wellen eines Senders von Reflektoren (z. B. Gebäuden, Fahrzeugen, Wasseroberflächen etc.) abgelenkt werden und auf verschiedenen Wegen beim Empfänger ankommen.
MIMO	(engl. „Multiple Input Multiple Output“) Mehrantennentechnik, bei der auf Seiten des Senders und Empfängers mehrere Antennen parallel eingesetzt werden, um die Datenübertragung zu optimieren. Dadurch können mehrere Datenströme gleichzeitig gesendet und empfangen werden. Werden Dutzende oder sogar Hunderte von Antennen verwendet, spricht man auch von Massive-MIMO.
PECO	Patient/Population, Exposure, Comparison, Outcome („Patient/ Population, Exposition, Vergleich, Ergebnisse“) ist ein Schema, das in der evidenzbasierten Medizin verwendet wird, um Forschungsfragen zu formulieren und zu beantworten. PECO-Kriterien helfen, Forschungsfragen zu strukturieren und die Relevanz von Studien zu bewerten.
Penetrationsverlust	Dämpfung einer elektromagnetischen Welle bei Durchdringung eines Objektes.
Pennes'sche Biowärmegleichung	Die Pennes'sche Biowärmegleichung beschreibt die Entwicklung der Temperatur T im Inneren des menschlichen Körpers infolge eines Energieeintrages durch Absorption elektromagnetischer Wellen (berücksichtigt durch die volumetrische Leistungsdichte Q_{abs}). In der Gleichung berücksichtigt sind die Massendichte ρ, die spezifische Wärmekapazität c, die Wärmeleitfähigkeit k, die metabolische Wärmerzeugung Q_m und die Blutperfusionsrate w_b des betrachteten Gewebes sowie die spezifische Wärmekapazität des Blutes c_b und die Temperatur des arteriellen Blutes T_a. $$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T - w_b c_b (T - T_a) + Q_m + Q_{abs}$$

Polyamine	Polyamine (PA), wie Spermin und Spermidin, sind die wichtigsten PA, die in allen lebenden Organismen vorkommen. PA werden durch die Decarboxylierung von Aminosäuren gebildet und erleichtern das Zellwachstum und die Entwicklung durch verschiedene zelluläre Reaktionen. PA sind ein integrierter Bestandteil des zellulären und genetischen Stoffwechsels und tragen zur Transkription, Translation, Signalübertragung und zu posttranslationalen Modifikationen bei.
Poynting Vektor	Der Poynting Vektor ist jener Vektor, der den elektromagnetischen Leistungsfluss nach Größe und Richtung beschreibt. Er ist das vektorielle Produkt der Vektoren der elektrischen und magnetischen Feldstärke.
Referenzwert (Elektromagnetische Felder)	Der Referenzwert ist ein konservativer Vergleichswert für eine physikalische Größe, die einer Routinemessung zugänglich ist und die für eine vereinfachte Expositionsbewertung herangezogen werden kann. In den Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) werden zur Bewertung elektromagnetischer Felder, abhängig von der Frequenz, Referenzwerte für die von außen einwirkenden bzw. einfallenden Feldgrößen elektrische Feldstärke (> 0 Hz bis 300 GHz), magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte (> 0 Hz bis 300 GHz), Leistungsdichte (30 MHz bis 300 GHz), Energiedichte (400 MHz bis 300 GHz) sowie für Kontaktströme (> 0 Hz bis 10 MHz) und hochfrequente Ströme in Gliedmaßen (100 kHz bis 110 MHz) festgelegt. Wenn die Referenzwerte nicht überschritten werden, kann ohne weitere Prüfung davon ausgegangen werden, dass keine Gefährdung von Personen durch direkte Wirkungen der elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Felder vorliegt. Bei Überschreitung der Referenzwerte besteht ggf. die Möglichkeit, durch aufwändigere Bewertungsverfahren die Übereinstimmung mit den biologisch relevanten Basisgrenzwerten (siehe dort) zu zeigen. Die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) empfiehlt zur Begrenzung elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder ein Konzept aus Basisgrenzwerten und Referenzwerten. Basisgrenzwerte werden für im Körper induzierte elektrische Größen festgelegt und adressieren biologische Wirkungen der Felder. Referenzwerte sind aus den Basisgrenzwerten unter Annahme konservativer (ungünstiger) Expositionsbedingungen abgeleitet.
Reflexionsverlust	Dämpfung einer elektromagnetischen Welle bei Reflexion.
Shadowing	Empfangspegelvariation bei der Signalübertragung aufgrund der Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit Objekten, beispielsweise durch Abschattung.

Spektrumanalysator	Ein Spektrumanalysator ist ein in der elektrischen Messtechnik eingesetztes Messgerät zur Erfassung und Darstellung eines Signals im Frequenzbereich.
Standortbescheinigung	Eine Standortbescheinigung ist gemäß §4 BEMFV 2002 eine Unbedenklichkeitsbescheinigung aus Sicht des Strahlenschutzes und muss für den Betrieb einer ortsfesten Funkanlage mit einer EIRP (siehe „EIRP“) von 10 Watt oder mehr vorliegen. Das Gleiche gilt für eine ortsfeste Funkanlage mit einer EIRP von mehr als 0,1 Watt, jedoch weniger als 10 Watt, die an einem Standort mit einer Gesamt-EIRP von 10 Watt oder mehr errichtet wurde, oder wenn durch die hinzukommende Funkanlage die Gesamt-EIRP von 10 Watt erreicht oder überschritten wird. Standortbescheinigungen werden auf Antrag von der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA) ausgestellt. Ausnahmen gelten z. B. für bestimmte Amateurfunkanlagen.
Strahlungsleistung	Siehe „EIRP“
Streuung	Diffuse Ablenkung einer elektromagnetischen Welle in viele Richtungen durch Wechselwirkung mit einem Objekt.
Traffic Beam(s)	Strahlungskeule(n) einer 5G-Antenne, über welche die Kommunikation der Basisstation mit den einzelnen Endgeräten stattfindet.
Transmissionsverlust	Zusätzliche Dämpfung einer elektromagnetischen Welle beim Durchgang durch Materie.
Voxel	Der kleinste würfelartige Teil in einem dreidimensionalen Raum. Ein Voxel wird durch die x-, y- und z-Koordinaten eines der acht Eckpunkte oder durch seine Mitte festgelegt. Der Begriff Voxel wird in der dreidimensionalen Darstellung von Gewebe in bildgebenden Verfahren der Medizin verwendet.

Anhang

A-1 Tabellarische Zusammenstellung der experimentellen Humanstudien

Tab. A-1.1: Tabellarische Zusammenstellung der in Abschnitt 4.3 „Experimentelle Humanstudien“ erwähnten Publikationen

Studie	n	Geschlecht	Alter (Jahre)	Frequenz(en)	Leistungsdichte	Expositionsdauer	Ergebnis
Wahrnehmung							
Pakhomov et al. 1998 [1)]	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	37,7 GHz 42,25 GHz 53,57 GHz	5 - 15 mW cm^{-2}	20 mal 1 min, 1-min-Intervalle zwischen den Expositionen	• Wahrnehmungshäufigkeit über alle Frequenzen und Leistungsdichten: 30 % bis 80 %; • Kombination 37,7 GHz und 15 mW cm^{-2}: Häufigkeit der Wahrnehmung deutlich geringer als bei 42,25 GHz und 5 mW cm^{-2}. Reaktionslatenz: 40 s - 50 s.
Blick et al. 1997	15	keine Angabe	45,2 ± 6,0	2,45 GHz 7,5 GHz 10,0 GHz 35 GHz 94 GHz	20 Intensitäten	keine Angabe	• Wahrnehmungsschwellen: 2,45 GHz: 63,1 mW cm^{-2}; 7,5 GHz: 19,5 mW cm^{-2}; 10 GHz: 19,6 mW cm^{-2}; 35 GHz: 8,8 mW cm^{-2}; 94 GHz: 4,5 mW cm^{-2} (vergleichbar mit Infrarot: 5,34 mW cm^{-2})
Yuasa et al. 2024	20	16 Männer, 4 Frauen	35,2 ± 3,0	28 GHz	27 mW cm^{-2} 126 mW cm^{-2} 191 mW cm^{-2} 252 mW cm^{-2} 399 mW cm^{-2}	keine Angabe	• Wahrnehmungsschwellen: 27 mW cm^{-2}: 0,2 °C 126 mW cm^{-2} bis 399 mW cm^{-2}: 0,9 °C bis 1,0 °C; • Zuverlässigkeit der Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle steigt mit dem Expositionsniveau
Schwellenwert für thermischen Schmerz							
Radzievsky et al 1999	12	12 Männer	37,3 ± 4,9 18 – 65	42,25 GHz	25,5 mW cm^{-2}	30 min	• Signifikante ($p < 0,05$) Unterdrückung der Schmerzempfindung; • Anstieg der Schmerztoleranz: 37,7 %; • Anstieg des Schmerzempfindlichkeitsbereichs: 49,3 %
Partyla et al. 2017	23	23 Männer	20 - 40	42,25 GHz, 50 - 70 GHz Rauschsignal	< 17,2 mW cm^{-2}	30 min	• Anstieg der Schmerzschwelle: 42,25 GHz: 1,97 Sekunden; 50 - 70 GHz Rauschgenerator: 1,27 Sekunden; Scheinexposition: keine Abweichung vom Ausgangswert

Studie	n	Geschlecht	Alter (Jahre)	Frequenz(en)	Leistungsdichte	Expositionsdauer	Ergebnis
Minier et al. 2023	10	7 Männer, 3 Frauen	35,2 ± 12,9 21 - 54	61,25 GHz	17,2 mW cm^{-2}	30, 60 und 90 min	• Schmerzschwelle: 30 min: statistisch signifikante Erhöhung der Schmerzschwelle; 60 und 90 min: keine Veränderung der Schmerzschwelle; • Schmerztoleranz: keine Veränderung;
Kardiovaskuläre Effekte							
Radzievsky et al 1999	12	12 Männer	37,3 ± 4,9 18 - 65	42,25 GHz	25,5 mW cm^{-2}	30 min	keine expositionsbedingten Unterschiede
Müller et al. 2004	50	38 Männer, 12 Frauen	18 - 36	77 GHz	3 µW cm^{-2}	15 min	• Herzfrequenz, elektrokardiographischen Parameter, Atemfrequenz, Hauttemperatur und Hautleitfähigkeit sowie systolischer und diastolischer Blutdruck: keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen
Kantz et al. 2005	50	32 Männer, 18 Frauen	15 - 78	5,8 GHz 12 GHz 24 GHz 60 GHz 77 GHz 110 GHz	59,7 µW cm^{-2}	15 min	• Herzfrequenz, elektrokardiographischen Parameter, Atemfrequenz, Hauttemperatur und Hautleitfähigkeit sowie systolischer und diastolischer Blutdruck: keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen
Partyla et al. 2017	23	23 Männer	20 - 40	42,25 GHz	< 17,2 mW cm^{-2}	30 min	• Diastolischer Blutdruck: Anstieg unter Exposition; • andere Ergebnisgrößen (systolischer Blutdruck, Herzfrequenz und Parästhesien): keine Veränderung.
Minier et al. 2023	10	7 Männer, 3 Frauen	35,2 ± 12,9 21 - 54	61,25 GHz	17,2 mW cm^{-2}	30, 60 und 90 min	• Herzfrequenz: 30 min: statistisch signifikante Verringerung; 60 und 90 min: keine Veränderung; • Blutdruck und Hauttemperatur: keine signifikanten Unterschiede
[1)] Zusammenfassung von drei in russicher Sprache publizierten Originalarbeiten (Lebedeva 1993, Lebedeva 1995, Kotrovskaia 1994)							

A-2 Tabellarische Zusammenstellung der In-vivo-Studien

Tab. A-2.1: Tabellarische Zusammenstellung der in Abschnitt 4.4 „In-vivo-Studien“ erwähnten Publikationen (Autor: Mats-Olof Mattsson)

Studie	Exponiertes System	Biologischer Endpunkt	Frequenz	Leistungs-dichte/ SAR	Expositions-zeit (min bis d)	Scheinexp. / Kontrolle	Positivkon-trolle	Temperatur-Kontrolle	Verblindet	Dosimertie	Anzahl (n)	Ergebnisse
Thermische Wirkungen, insbesondere auf Haut und Auge												
Ijima et al. (2023a)	Männliche Sprague-Dawley-Ratten	Dorsale Haut	26 GHz	0 W m^{-2} 125 W m^{-2} 250 W m^{-2} 370 W m^{-2} 500 W m^{-2}	18 min	ja	nein	ja	nein	ja	6-15	• Die Hauttemperatur stieg dosisabhängig gleich zu Beginn der Exposition an, mit einem maximalen Anstieg von 11,3°C bei 500 W m^{-2}. • Der Temperaturanstieg hörte sofort auf, als die Exposition beendet wurde. • Die Rektaltemperatur stieg nach 4-minütiger Exposition nur bei 370 W m^{-2} und 500 W m^{-2} um 0,6° C an (Rektal-temperaturdaten wurden insgesamt 30 Minuten lang gesammelt, 6 Minuten vor, 18 Minuten während und 6 Minuten lang nach der Exposition).
Ijima et al. (2023b)	Männliche Sprague-Dawley-Ratten	Thermoregulation, einschließlich der Veränderungen des Blutflusses in der Haut, während der Ganzkörperex-position	26 GHz	0 W m^{-2} 8,5 W m^{-2} 122 W m^{-2} 237 W m^{-2}; entsprechend 0 W kg^{-1} 0,26 W kg^{-1} 3,7 W kg^{-1} 7,2 W kg^{-1}	40 min	ja	nein	ja	nein	ja	31	• Die Exposition verursachte bei allen In-tensitäten einen sofortigen Temperatur-anstieg in der Haut, während die rektale Temperatur nach 46 s Exposition zu steigen begann. • Der Temperaturanstieg blieb während der gesamten Expositionszeit bestehen. • Der Blutfluss blieb in der Rückenhaut während der Exposition auf dem glei-chen Niveau, stieg aber in der Schwanzhaut linear an, mit einem Fak-tor von drei bei 237 W m^{-2}. • Der Temperaturanstieg in der Rücken-haut betrug 2,7° C und 3,9° C bei 122 W m^{-2} bzw. 237 W m^{-2}. • Die entsprechenden Erhöhungen betru-gen 4,4° C und 7,4° C für die Schwanz-haut und 0,9° C und 1,3° C im Rektum.

Studie	Exponiertes System	Biologischer Endpunkt	Frequenz	Leistungs-dichte/ SAR	Expositions-zeit (min bis d)	Scheinexp. / Kontrolle	Positivkon-trolle	Temperatur-Kontrolle	Verblindet	Dosimertie	Anzahl (n)	Ergebnisse
Foroughimehr et al. (2023)	menschliches Auge, 3D-Modell für normales und trockenes Auge	Temperaturände-rung in den beiden Hornhautmodellen	0,5 GHz bis 30 GHz	20 W m^{-2} 100 W m^{-2}	Modellstudie, daher nicht relevant	nicht rele-vant	nicht rele-vant	nicht rele-vant	nicht rele-vant	nicht rele-vant	nicht rele-vant	• Die 30-GHz-Exposition verursachte beim normalen Auge einen Temperatur-anstieg von ca. 0,03°C bei 20 W m^{-2} und einen Anstieg von ca. 0,13 °C bei 100 W m^{-2}. • Für das trockene Auge betrugen die entsprechenden Erhöhungen 0,03 °C bzw. 0,13 °C.
Foroughimehr et al. 2024	Schweinehaut	Veränderungen der Gewebstem-peratur und Autofluoreszenz von Flavin-Adenin-Dinukleotid (FAD).	26 GHz	5,1 kW m^{-2}	1-30 min	nein	nein	nein	nein	ja	6	• Der Temperaturanstieg war in den ers-ten 5 Minuten am stärksten, verlang-samte sich und erreichte nach 30 Minu-ten ein Plateau. • Der maximale Temperaturanstieg be-trug 7° C. • Die Lebensdauer von FAD, als Indikator für intakten Stoffwechsel, nahm mit der Zeit ab (statistisch nicht signifikant), so-wohl bei den Kontroll- als auch bei den exponierten Proben.
Parker et al. (2024)	weibliche Schweinehaut	Verbrennungs-schwellen	8,2 GHz 95 GHz	8 W cm^{-2} 20 W cm^{-2} 25 W cm^{-2} 30 W cm^{-2}	5 sec	ja	nein	ent-fällt	nein	ja	8	• Verbrennungsschäden traten dosisab-hängig auf • Schweregrad der Verbrennung nahm mit zunehmender eingebrachter Energie zu
Li et al. (2023a)	Haut von männlichen Sprague-Dawley-Ratten	Stationäre Temperaturerhöh-ungen	6 GHz 30 GHz 60 GHz 100 GHz	0-500 W m^{-2}	keine Angaben	nein	nein	ja	nein	ja	keine Anga-ben	• Lineare Beziehung zwischen der absor-bierten Leistungsdichte an der Haut-oberfläche und der Leistungsdichte au-ßerhalb des Körpers bei 6 GHz, 30 GHz, 60 GHz und 100 GHz. • Der Erwärmungsfaktor für die Kopfhaut der Ratte variierte zwischen 0,0083 °C und 0,0118 °C pro W cm^{-2} über den Be-reich von 6 GHz bis 100 GHz. • Oberhalb von 30 GHz könnte die äqui-valente absorbierte Leistungsdichte eine um 70 % höhere Temperatur in der Rattenrückenhaut im Vergleich zur Rat-tenkopfhaut verursachen.

Studie	Exponiertes System	Biologischer Endpunkt	Frequenz	Leistungs-dichte/ SAR	Expositions-zeit (min bis d)	Scheinexp. / Kontrolle	Positivkon-trolle	Temperatur-Kontrolle	Verblindet	Dosimertie	Anzahl (n)	Ergebnisse
												• Die Temperaturänderung könnte an der Hautoberfläche der Ratte durch thermische Parameter, die Gewebedicke und die Durchblutungsrate in den tieferen Gewebeschichten beeinflusst werden.
Kojima et al. (2024)	Kaninchenauge	Schädigung des Kaninchenauges	60 GHz	200 mW cm^{-2} 300 mW cm^{-2}	6 min	ja	nein	ja	nein	ja	5	• Unter Bedingungen mit hoher Temperatur und hoher Luftfeuchtigkeit (45 °C, 80 % relative Luftfeuchtigkeit) wurden bei allen untersuchten Tieren Hornhauttrübungen, Hornhautödeme und Schädigungen des Hornhautepithels (bei 200 mW cm^{-2}) induziert. • Eine relative Luftfeuchtigkeit von 80 % begünstigte die Augenschäden deutlich. • Der Schwellenwert für Augenschäden hing direkt von der Leistungsdichte ab. • Eine hohe Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit spielten eine sekundäre Rolle und bedingten eine verschlimmernde Wirkung auf die Augenschäden. • Eine Umgebung mit niedriger Luftfeuchtigkeit verhinderte nicht unbedingt die Entwicklung von Augenschäden durch die MMW-Exposition.
Kojima et al. (2025)	Kaninchenauge	Schädigung des Kaninchenauges	28 GHz	200 mW cm^{-2} bis 750 mW cm^{-2}	6 min	ja	nein	ja	nein	ja	35	• Bei 400 mW cm^{-2} wurde eine Schädigung des Hornhautepithels, ein Hornhautödem und eine Linsentrübung (Katarakt) beobachtet. • Schwellenwerte der Leistungsdichte, die eine 10-prozentige, 50-prozentige bzw. 90-prozentige Wahrscheinlichkeit (DD10, DD50 bzw. DD90) einer Augenschädigung durch die 6-minütige Exposition bedingten: • 327 mW cm^{-2}, 359 mW cm^{-2} bzw. 394 mW cm^{-2}.

Studie	Exponiertes System	Biologischer Endpunkt	Frequenz	Leistungs-dichte/ SAR	Expositions-zeit (min bis d)	Scheinexp. / Kontrolle	Positivkon-trolle	Temperatur-Kontrolle	Verblindet	Dosimertie	Anzahl (n)	Ergebnisse
												• Diese Werte liegen höher als in früheren Studien desselben Autorenteams bei höheren Frequenzen (40 GHz, 60 GHz, 75 GHz, 95 GHz und 162 GHz).
Andere Endpunkte												
Perov et al. (2022)	Männliche Wistar-Ratten	Erkundungs- und Orientierungsaktivität, Serumkonzentrationen der Hormone ACTH und Kortikosteron	3,6 GHz 28 GHz 37 GHz	250 µW cm^{-2}	1 Monat, 2 Monate, 3 Monate oder 4 Monate lang 24 h/d, 7 Tage pro Woche; eine zusätzliche Gruppe nach viermonatiger Expositionszeit und anschließend einem Monat ohne Exposition.	ja	nein	nein	nein	keine Angaben	12 für jede Gruppe	• Die Orientierungs- und Erkundungsaktivität nahm bei den exponierten Tieren im Vergleich zu den Kontrolltieren ab, mit einer maximalen Wirkung nach drei Monaten (meist statistisch nicht signifikant) • Nur ein Verhaltensparameter („hole reflex“) zeigte eine statistisch signifikante Abnahme nach zwei Monaten der Exposition.
Yao et al. (2022)	Männliche Wistar-Ratten	Immunsystem, Organ-Pathologie (Thymus, Milz), 6 h sowie 7 Tage, 14 Tage und 28 Tage nach der Exposition untersucht	2,8 GHz 9,3 GHz (allein oder in Kombination)	10 mW cm-2	6 min 6 plus 6 min	ja	nein	nein	nein	nein	5	• Pathologische Veränderungen sowohl im Thymus als auch in der Milz, beginnend am Tag 7 nach der Exposition, mit stärkeren Wirkungen unter den Bedingungen der Mehrfrequenz-Exposition. • Insbesondere zeigten die Lymphozyten in diesen beiden Organen eine Stauung und Kernfragmentierung, die am 28. Tag nach der Exposition nicht mehr vorhanden war. • Die Einzelfrequenz-Expositionen hatten keinen Einfluss auf die Anzahl der weißen Blutkörperchen. • Dagegen veränderten die Mehrfrequenz-Expositionen die Anzahl und den Anteil sowohl der T- als auch der B-Lymphozyten, wobei die Anzahl der B-Zellen zunahm.

Studie	Exponiertes System	Biologischer Endpunkt	Frequenz	Leistungs-dichte/ SAR	Expositions-zeit (min bis d)	Scheinexp. / Kontrolle	Positivkon-trolle	Temperatur-Kontrolle	Verblindet	Dosimertie	Anzahl (n)	Ergebnisse
												• Unklar, ob die längere Dauer der Exposition oder die Kombination der Frequenzen die Effekte verursachte. Diese Wirkungen waren am Tag 28 nach der Exposition nicht mehr vorhanden. Mehrere Zytokine im Serum (IL-1alpha, IL-1beta, IL-4, TNF-alpha, IL-12) stiegen zu den Messzeitpunkten 6 h und 7 Tage an, kehrten aber bis Tag 28 auf den Normalwert zurück. Die Interferon-gamma-Spiegel waren zu allen Zeitpunkten unverändert. • Auf Genom- und Proteinebene waren Stoffwechsel und immunassoziierte Prozesse verändert.

A-3 Tabellarische Zusammenstellung der In-vitro-Studien

Tab. A-3.1: Tabellarische Zusammenstellung der in Abschnitt 4.5 „In-vitro-Studien“ erwähnten Publikationen

Studie	Exponiertes System	Biologischer Endpunkt	Frequenz	Leistung/ Leistungs-dichte/ SAR	Expositions-zeit (min bis d)	Scheinexp. / Kontrolle	Positivkon-trolle	Temperatur Kontrolle	Verblindet	Dosimertie	Anzahl (n)	Ergebnisse
Genexpression												
Rampazzo et al. (2024)	Glioblastom-Organoide	Genexpres-sion	30,5 GHz	0,2 W 0,1 W	2 W mittlere Leistung für 10 Minuten 0,1 W mittlere Leistung für 20 Minuten	ja	ja	ja	nein	ja	keine Angaben	• In beiden Fällen im Vergleich zur nicht exponierten Kontrollgruppe statistisch signifikante Wirkungen durch die EMF-Exposition auf die Zellproliferation und die Apoptose, ohne den Differenzie-rungsstatus der Glioblastom-Zellen zu beeinträchtigen. • In Kombination mit dem Chemothera-peutikum Temozolomid wurde bei einer mittleren Leistung von 0,1 W eine sta-tistisch signifikante therapeutische Wir-kung beobachtet, die zu einem ver-stärkten Absterben von Glioblastom-Zellen führte.
Martin et al. (2024)	Keratinozyten-Kulturen (HEK und NHEK) HaCaT-Zellen	Genexpres-sion	60 GHz	2 mW cm^{-2} 5 mW cm^{-2} 10 mW cm^{-2} 20 mW cm^{-2}	3 h 14 h	ja	nein	ja	ja	ja	3-5	Abgesehen von einer mit der akuten 60-GHz-Exposition mit hoher Leistungsdichte verbundenen Wärmewirkung, keine weiteren Wirkungen.
Martin et al. (2020)	Primärkulturen menschlicher Keratinozyten HaKaT-Zellen	Genexpres-sion	61 GHz	5 mW cm^{-2} 10 mW cm^{-2} 20 mW cm^{-2}	3 h 14 h	ja	nein	ja	ja	ja	3-6	Statistisch signifikante Veränderungen; das Autorenteam führt die Schwankungen auf zufällige Fluktuationen zurück.
Lawler et al. (2022)	primäre humane Haut-Fibroblasten	Genexpres-sion	60 GHz	2,6 mW cm^{-2} 46,8 J cm^{-2} d^{-1}	4 Tage lang 5 h/d	ja	nein	ja	nein	inadä-quat	3	Exposition durch MMW mit hoher Energie, die gleichzeitig nicht-thermische Veränderungen im Transkriptom sowie in der Dynamik der DNA-Struktur hervorruft, jedoch keine DNA-Schäden verursacht.

Studie	Exponiertes System	Biologischer Endpunkt	Frequenz	Leistung/ Leistungs-dichte/ SAR	Expositions-zeit (min bis d)	Scheinexp. / Kontrolle	Positivkon-trolle	Temperatur Kontrolle	Verblindet	Dosimertie	Anzahl (n)	Ergebnisse
Andere Endpunkte												
Kim et al. (2022)	Maus-Mela-nom-Zelllinie (B16F10) 3D-Modell der pigmentierten Epidermis (Melanoderm)	ROS Genexpres-sion von Melaninsyn-these-Enzymen Dendriten-Formation in B16F10 Zellen	28 GHz	10 W m^{-2}	4 h/d für 4 d (B16-Zellen) oder jeden zweiten Tag für 14 d (Melanoderm)	ja	ja	ja	nein	unklar	3	Untersuchungen 4 h, 18 h und 24 h nach der Exposition: 24 h nach der Exposition waren die ROS und Melanin sowie die mRNA-Gehalte in alpha-MSH-aktivierten B16F10-Zellen reduziert.
Zhao et al. (2020)	menschliche A375-Mela-nom-Tumor-zellen	Apoptose	35,2 GHz	0,16 mW cm^{-2}	15 min 30 min 60 min 90 min	ja	ja	ja	nein	ja	keine Angaben	• Statistisch signifikante Hochregulierung von Caspase-3 und Caspase-8 • Hemmung der Zellviabilität • Induzierung von Apoptose
Ploskonos et al. (2022)	normale und pathologische menschliche Spermien	Stabilität der Spermien Apoptose	42,194 GHz	keine Angaben	20 min	ja	nein	nein	nein	nein	gesunde Spender (n = 25) subfertile Spender (n = 78)	• Erhöhung des Widerstands der Spermi-enmembranen • Verringerung der Akrosinaktivität • Verringerung der Anzahl apoptotischer Gameten • Verringerung der PA-Konzentrationen im Spermienplasma
Hammarin et al. (2024a), (2024b)	Proben von extrahiertem, aufgereinigtem Tubulin aus Schweinehirn-Gewebe	Wachstums-verhalten von Mikrotubuli von eukaryoti-schen Zellen	3,5 GHz 20 GHz 29 GHz	keine Angaben	keine Angaben	ja	nein	ja	nein	nein	keine Angaben	Effekte standen eindeutig mit Temperaturanstieg in Verbindung

A-4 EU-Studien unter Horizon Europe (CLUE-H)

Die Europäische Kommission hat im Rahmen ihrer verschiedenen Forschungsrahmenprogramme mehrere Projekte finanziert, die sich mit möglichen gesundheitlichen Auswirkungen der Exposition gegenüber verschiedenen Arten von EMF, einschließlich HF-EMF, befassen. Derzeit läuft das Programm „Horizon Europe“, das für den Zeitraum 2021-2027 aus EU-Mitteln gefördert wird. Im Rahmen dieses Programms wurde 2022 der Cluster on Electromagnetic fields Exposure and Health (CLUE-H**;** https://research-and-innovation.ec.europa.eu/research-area/health/environment-climate-and-health/clue-h_en**)** ins Leben gerufen (Gesamtfördersumme: 29 Millionen Euro). Dazu wurden auf der Basis einer Ausschreibung vier Projekte zur Förderung ausgewählt: ETAIN, GOLIAT, NextGEM und SEAWave.

Das Ziel vom CLUE-H Forschungsprogramm ist, die folgenden Fragen zu beantworten (CLUE-H 2025a):

- Wie stark sind wir hochfrequenten elektromagnetischen Feldern ausgesetzt?
- Wie verändert sich unsere elektromagnetische Umgebung durch die Einführung neuer drahtloser Technologien, insbesondere 5G?
- Gibt es irgendwelche Auswirkungen auf unsere Gesundheit und die Umwelt?

Um die Arbeiten zwischen den vier Projekten zu koordinieren und zu harmonisieren, wurden fünf Arbeitsgruppen eingerichtet:

- Arbeitsgruppe 1 (WG1) Wissenschaftliche Übersetzung für Politik und Praxis
- Arbeitsgruppe 2 (WG2) Datenmanagement und -austausch
- Arbeitsgruppe 3 (WG3) Kommunikation und Informationsverbreitung
- Arbeitsgruppe 4 (WG4) Experimentelle Studien
- Arbeitsgruppe 5 (WG5) Expositionsbewertung

Im Rahmen der CLUE-H werden Newsletter, Broschüren und Policy Briefs erstellt, welche auf der Webseite zur Verfügung stehen (CLUE-H 2025b). Es werden auch mehrere thematische Workshops/Schulungen zu spezifischen Themen von gemeinsamem Interesse organisiert. Auf derselben Webseite findet man auch Links zu allen Publikationen der vier Projekte.

Die Projekte innerhalb des Clusters begannen ihre Untersuchungen im Jahr 2022 und sollen bis 2027 fortgesetzt werden. Sie sollen Ergebnisse liefern, die zu einer evidenzbasierten politischen Strategie im Umgang mit hochfrequenten elektromagnetischen Feldern beitragen können. Im Folgenden werden die vier Projekte kurz beschrieben.

Verbesserung der Untersuchung von HF-EMF und ihrer möglichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die biologische Vielfalt (ETAIN)

Ziel von ETAIN (Exposure To electromAgnetic fIelds and plaNetary health) ist die Entwicklung und Validierung von Ansätzen zur Bewertung der Auswirkungen von HF-EMF aus Sicht menschlicher und planetarer Gesundheit sowie die Erforschung von Optionen zur Verringerung der Exposition.

Dazu wird im Rahmen eines Citizen-Science Ansatzes eine Mobiltelefon-App entwickelt und validiert, welche die Nutzenden über ihre aktuelle HF-EMF Exposition informiert. Zudem werden mit der App Daten gesammelt, welche genutzt werden, um die räumliche Verteilung

der HF-EMF Exposition in Europa zu modellieren. Dabei werden einerseits Kalibrationsmessungen durchgeführt, um den Zusammenhang zwischen der Signalqualität im Mobil- und WLAN Netz und der damit verbundenen Exposition durch die Infrastruktur und das eigene Gerät abzuschätzen (Sandoval-Diez et al. 2025). Zudem wird ein Expositionsmodell erstellt, welches Laien erlaubt ihre kumulative Exposition durch HF-EMF im FR1 abzuschätzen. Zusätzlich werden neue dosimetrische Modellierungen für neue Technologien und Anwendungen mit Fokus auf den Millimeterwellenbereich (FR2) entwickelt.

Weiter wird evaluiert, inwiefern Netzwerke so gestaltet werden können, dass die Exposition der Bevölkerung minimiert wird, und entsprechende Netzwerkplanungstools werden entwickelt. Biologische Wirkungen von HF-EMF werden bei Honigbienen (*Apis mellifica*), Wildbienen (*Osmia bicornis*) und Blauen Schmeißfliegen (*Calliphora vomitoria*) untersucht. Einerseits werden mit 3-dimensionalen Modellen die HF-EMF Absorption im Bereich von 0.1 bis 120 GHz charakterisiert. In Laborexperimenten werden Wirkungen einer 1,8-GHz-, 3,5-GHz- und 26-GHz-Exposition auf die verschiedenen Entwicklungsstadien dieser Insekten untersucht. In einem Feldexperiment wird der Einfluss einer 3,5-GHz- und 24-26-GHz-Exposition auf die Biodiversität allgemein und Bienen im Speziellen untersucht. Weiter werden bei Fruchtfliegen über mehrere Generationen die Wirkungen einer 26-GHz-Exposition auf das Verhalten experimentell im Labor untersucht. Zudem werden Analysen des Transkriptomics und Metabolomics an den Fruchtfliegen durchgeführt.
In Bezug auf die menschliche Gesundheit werden experimentelle Untersuchungen an der Haut und dem Auge durchgeführt. Dabei stehen Wirkungen auf den oxidativen Stress im Vordergrund. Mittels Transkriptomik werden die biologischen Wirkungen auf der Ebene der Genexpression untersucht, um potenzielle Wirkungen eines 26-GHz-Signals im menschlichen 3D-Hautmodell zu erforschen. Es wird auch getestet, ob eine Exposition bei 26 GHz das Metabolom der endo- und extrazellulären Extrakte der rekonstruierten menschlichen Haut und der Fruchtfliege beeinflussen und unter anderem oxidative Derivate erzeugen könnte. Die Projektergebnisse werden zusammen mit Literaturbefunden im Hinblick auf die planetare Gesundheit bewertet.

5G-Exposition, kausale Auswirkungen und Risikowahrnehmung durch bürgerschaftliches Handeln (GOLIAT)

Das Hauptziel des fünfjährigen Projektes GOLIAT (5G expOsure, causaL effects, and rIsk perception through citizen engAgemenT) ist, die HF-EMF Exposition in der Bevölkerung genauer zu charakterisieren und mögliche Veränderungen über die Zeit zu erfassen. Zudem sollen neue Erkenntnisse über potenzielle kausale neuropsychologische und biologische Auswirkungen gewonnen werden und das Verständnis der Risikowahrnehmung und -kommunikation der Bevölkerung in einem europaweiten Ansatz inter- und transdisziplinär untersucht werden.

Dazu werden einerseits Messkampagnen in zehn europäischen Ländern durchgeführt, um die Exposition durch Mobilfunkbasisstationen sowie durch Mobilfunktelefone zu erfassen. Die Daten werden kombiniert mit dosimetrischen Modellierungen, Bevölkerungsbefragungen um potenzielle Risiken für die Bevölkerung abzuschätzen. Ergänzend werden Messungen in beruflichen Situationen durchgeführt, wo 5G möglicherweise relevant ist.

Weiter werden im Rahmen von GOLIAT eine Reihe von Kohortenstudien bei Kindern und Jugendlichen durchgeführt. Primär werden Wirkungen auf die Kognition und den Schlaf untersucht. Weitere gesundheitsrelevante Effekte sind das Verhalten, unspezifische Symptome und mentale Gesundheit. In humanexperimentellen Studien werden Wirkungen einer Exposition bei 3 GHz, 5 GHz und 26 GHz auf das EEG, die Kognition und Thermoregulation

evaluiert. Bei jungen Mäusen und Ratten wird in vivo die Exposition durch Felder des 5G-Mobilfunks auf das Verhalten, die Kognition und die Thermoregulation untersucht. In vitro werden Wirkungen von 5G-Feldern (0,7 GHz bis 26 GHz) auf neokortikale Neuronen und Hirnzellen untersucht. Zudem wird in vitro die Thermoregulation bei humanen Thermorezeptoren und Radikalstress bei verschiedenen Hautzellen untersucht. Mittels molekularer Modellierung soll das Verständnis für die biophysikalischen Wechselwirkungsmechanismen verbessert werden. Die Synthese umfasst eine Gesundheitsrisikoabschätzung. Neben der biologisch-medizinischen Evidenzbeurteilung umfasst dies auch die Charakterisierung der Risikowahrnehmung der Bevölkerung mittels mentaler Modelle und Fallstudien zur effizienten HF-EMF Expositionsreduktion im Alltag. Damit die Erkenntnisse effizient kommuniziert werden können, findet kontinuierlich ein Austausch mit der Bevölkerung statt.

Integriertes Sensor- und Analysesystem der nächsten Generation zur Überwachung und Bewertung der Exposition durch hochfrequente elektromagnetische Felder und der Gesundheit (NextGEM)

NextGEM soll einen Rahmen für die Gewinnung gesundheitsrelevanter wissenschaftlicher Erkenntnisse und Daten auf der Grundlage neuer Szenarien für die Exposition durch HF-EMF in mehreren Frequenzbändern schaffen und Instrumente für eine evidenzbasierte Risikobewertung entwickeln und validieren. Im Rahmen von NextGEM soll auch eine NextGEM-Innovations- und Wissensdrehscheibe (NIKH) für EMF und Gesundheit eingerichtet werden, die den europäischen Regulierungsbehörden und der wissenschaftlichen Gemeinschaft eine standardisierte Möglichkeit zur Speicherung und Bewertung von Projektergebnissen bietet. Die meisten Aktivitäten von NextGEM berücksichtigen 5G FR1 und FR2.

Die Ziele des Projektes sind:

- Messung und Modellierung einzelner und mehrerer HF-EMF-Quellen bei sich ändernden EMF-Expositionsmustern auf der Grundlage innovativer Monitoring-Technologien (5G FR1, FR2)
- Bewertung der gesundheitlichen Auswirkungen und Aufklärung der Wirkungsmechanismen verschiedener und kombinierter HF-EMF-Expositionsmuster durch In-vitro-, In-vivo- und Humanstudien (5G FR1, FR2)
- Identifizierung von Kausalzusammenhängen und Durchführung von Risikobewertungen hinsichtlich der EMF-Exposition und ausgewählter Gesundheitsfolgen unter Bereitstellung von FAIR-Daten (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), (5G FR1, FR2)
- Entwicklung des NextGEM Innovation Knowledge Hub (NIKH) und dessen Validierung in der Praxis
- Maximierung der Bedeutung von NextGEM durch umfassende Verbreitungs-, Kommunikations-, Standardisierungs-, Nutzungs-, Kapazitätsaufbau- und Clustering-Aktivitäten.

Wissenschaftlich fundierte Expositions- und Risikobewertung von Hochfrequenz- und Millimeterwellen-Systemen bei Kindern bis hin zu älteren Menschen (5G und darüber hinaus) (SEAWave).

Dieses Projekt wird von Horizon Europe und SERI (Schweiz) kofinanziert. Ziel ist es, einen Beitrag zur wissenschaftlichen Grundlage für die Bewertung der Gesundheitsrisiken von 5G zu leisten und die Mittel für eine effektive Kommunikation der Gesundheitsrisiken und die

Verbreitung der Ergebnisse an alle Interessengruppen bereitzustellen, von Bürgerinnen und Bürgern, nationalen Regulierungsbehörden bis hin zu Normungsgremien und der Industrie.

Ziele sind:

- Ermittlung von Unterschieden in den Expositionsmustern zwischen den 2G- bis 4G-Mobilfunkstandards und dem 5G-Mobilfunkstandard für die gesamte Bevölkerung, einschließlich Kinder und Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmern,
- Bereitstellung von Werkzeugen und Instrumenten für eine zuverlässige Expositionsbewertung,
- Beitrag zur wissenschaftlichen Grundlage für die Bewertung der Gesundheitsrisiken von 5G,
- Bereitstellung von Maßnahmen für eine wirksame Kommunikation über Gesundheitsrisiken und die Verbreitung der Ergebnisse an Interessengruppen.

Tab. A-4.1: Laufende Projekte im Horizon Europe Forschungs-Cluster CLUE-H (Stand: Juni 2025, Autor: Mats-Olof Mattsson)

Projekt	**Akronym**	**Koordinator**	**Laufzeit**	**Website**
Exploring the impact of RF-EMF exposure on planetary health	ETAIN	Utrecht University, The Netherlands	5 Jahre	https://www.etainproject.eu/
5G exposure, causal effects and risk perception through citizen engagement	GOLIAT	Barcelona Institute for Global Health (ISGlobal), Spain	5 Jahre	https://projectgoliat.eu/
Next Generation Integrated Sensing and Analytical System for Monitoring and Assessing Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure and Health	NextGEM	Foundation for Research and Technology – HELLAS (FORTH), Greece	4 Jahre	https://www.nextgem.eu/
Scientific-Based Exposure and Risk Assessment of Radiofrequency and mm-Wave Systems from children to elderly (5G and Beyond)	SEAWave	Aristotle University of Thessaloniki, Greece	3,5 Jahre	https://seawave-project.eu/