Ein systematisches Review zu physiologischen und gesundheitlichen Wirkungen von 5G-relevanten hochfrequenten elektromagnetischen Feldern

–

Teilanalyse der Studien zu 3–4 und 20–30 GHz auf Säugetiere

Von der Medizinischen Fakultät
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Medizin
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Philine Johanna Scheelhaase

aus Hannover

Berichter: Universitätsprofessorin Dr. med. Julia Krabbe
Universitätsprofessor Dr. med. Thomas Kraus

Tag der mündlichen Prüfung: 15.07.2026

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Abkürzungsverzeichnis 1
1 Einleitung 1
1.1 EMF-assoziierte Syndrome 4
1.1.1 IEI-EMF 4
1.1.2 Der Frey-Effekt 5
1.1.3 Das Havanna-Syndrom 6
1.2 Hintergrund 6
1.2.1 Physikalischer Hintergrund: Elektromagnetische Felder (EMF) 6
1.2.2 Grenzwerte 10
1.2.3 Die 5. Generation des Mobilfunks – 5G 12
1.3 Relevante Institutionen 13
1.3.1 International: ICNIRP, SCENIHR und SCHEER 13
1.3.2 National: BfS, BMUV, SSK 13
1.4 5G in Europa 14
1.4.1 Der Umgang mit Expositionsgrenzwerten 15
1.4.2 5G in Deutschland 16
1.5 5G in der Medizin 16
1.6 Bisherige Untersuchungen zu 5G und den gesundheitlichen Auswirkungen 18
2 Begründung und Zielsetzung 22
3 Methoden 23
3.1 Problemformulierung nach PECOS 23
3.2 Studienprotokoll und Änderungen 24
3.3 Registrierung bei Prospero 27
3.4 Literatursuche 27
3.4.1 Datenbanken und Suchstrategie 27
3.4.2 Wahl der Suchbegriffe 28
3.4.3 Suche nach zusätzlichen Studien 28
3.5 Auswahl der Studien für das systematische Review 29
3.5.1 Titel- und Abstract-Screening (1.Schritt) 29
3.5.2 Volltext-Screening (2.Schritt) 35
3.5.3 Studienselektion für die Teilanalyse des Reviews 35
3.6 Datenextraktion 35
3.7 Bestimmung der internen Validität 36
3.7.1 Anpassung der Bewertungsinstrumente auf die eigene Fragestellung 36
3.8 Synthese der Studienergebnisse 39
3.8.1 Quantitative Ergebnisauswertung 39
3.8.2 Qualitative Ergebnisauswertung 39

4 Ergebnisse 43
4.1 Suche und Auswahlprozess: Eingeschlossene Studien 43
4.2 Bestimmung der internen Validität (Risk of Bias) 44
4.3 Synthese der Studienergebnisse: Qualitative Auswertung 47
4.3.1 Zentrales Nervensystem (ZNS), Kognition und Verhalten 48
4.3.2 Immunsystem 54
4.3.3 Thermoregulation 56
4.3.4 Wirkungen auf die Augen 57
4.3.5 Multiple Parameter & andere Themen 58
4.3.6 Fortpflanzung und Teratogenität 62
4.4 Einordnung nach Wirkungen 63
4.5 Subgruppenanalyse 64
4.6 Einordnung der Exposition im Verhältnis zu den Grenzwerten 64
4.7 Evidenzsynthese 66
4.7.1 Erläuterungen zur Evidenzsynthese 66
4.7.2 Evidenzsynthese nach Themengebieten 68
4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse 72
5 Diskussion 73
5.1 Ergebnisse im Kontext bestehender Literatur 73
5.2 Einschränkungen des Reviews/Limitationen 82
5.3 Konsequenzen für die Praxis 87
5.4 Forschungsaktivitäten und Forschungsbedarf 89
6 Zusammenfassung 93
Literatur 95
Anhang 121
Anhang 1: Studienprotokoll mit zugehörigen Anhängen 121
Anhang 2: Extraktionstabelle der eingeschlossen Studien im FR1-Bereich 189
Anhang 3: Extraktionstabelle der eingeschlossen Studien im FR2-Bereich 213
Anhang 4: Tabelle zum Überblick der Evidenzsynthese 218
Anhang 5: Grenzwerteinschätzung 220
Danksagung 232
Erklärung § 5 Abs. 1 zur Datenaufbewahrung 233
Eidesstattliche Erklärung gemäß § 5 Abs. (1) und § 11 Abs. (3) 12. der Promotionsordnung 234
Lebenslauf 235

Abkürzungsverzeichnis

5G	Mobilfunkstandard der fünften Generation
CW	ununterbrochene/kontinuierliche Welle (eng.: continuous wave)
femu	Forschungszentrum für elektromagnetische Umweltverträglichkeit
FR1	Frequenzbereich 1 (3–4 GHz)
FR2	Frequenzbereich 2 (20–30 GHz)
GRADE	Grading of Recommendations, Assessment, Development and Evaluation
HF-EMF	hochfrequente elektromagnetische Felder
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEI-EMF	Idiopathische Umweltintoleranz gegenüber elektromagnetischen Feldern
NTP	National Toxicology Program
OHAT	Office of Health Assessment and Translation
PD	Leistungsdichte (eng.: power density)
PECOS	Population, Exposure, Control, Outcome, Study design
PRISMA(-P)	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (Protocols)
PW	gepulste Welle (eng.: pulsed wave)
SAR	Spezifische Absorptionsrate
SCENIHR	Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks
SSK	Strahlenschutzkommission
WHO	World Health Organization

1 Einleitung

Die letzten Jahrzehnte haben eine unvergleichliche Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) gezeigt. Dazu zählt auch der Mobilfunk, welcher hochfrequente elektromagnetische Felder nutzt.

Durch diese Entwicklung hat somit auch die Exposition gegenüber hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) stetig über die letzten Jahrzehnte zugenommen (International Telecommunication Union, 2023; Karipidis et al., 2021; Kurnaz & Mutlu, 2020). Historisch gesehen ist die Einführung neuer Technologien oft von Debatten der Bevölkerung über mögliche positive oder negative Auswirkungen der Bevölkerung begleitet. Ein Beispiel dafür stellen die Proteste gegen den Ausbau der Mobilfunknetze in den 1990/2000er Jahren dar.

In den letzten Jahren ist die Diskussion über eventuelle negative gesundheitliche Wirkungen durch die Einführung des neusten Mobilfunkstandards der fünften Generation (5G) neu aufgeflammt. Die Debatte gleicht dabei der aus den 1990/2000er Jahren (Nyberg et al., 2022; Rowley & Mazar, 2021). Oft werden in Diskussionen um mögliche gesundheitliche Risiken unsystematisch zusammengesuchte Informationen und viele Falschinformationen, welche über die Sozialen Medien verbreitet werden, mit wissenschaftlichen Fakten vermischt. Dies führt auch zu diversen Verschwörungstheorien, wie z.B. im Rahmen der COVID-19-Pandemie deutlich geworden ist (Bruns et al., 2020; Joseph et al., 2022). Mit dem Versuch, die öffentliche Debatte über 5G zu versachlichen, hat die deutsche Bundesregierung die Onlineplattform „Deutschland spricht über 5G“ gegründet (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2024).

Eine systematische Aufarbeitung und Analyse des aktuellen Standes der Wissenschaft zu diesem Thema ist hochrelevant, um neutrale Informationen vorzulegen zu können und Diskussionen, beispielsweise zu Verschwörungstheorien bzgl. 5G und der COVID-Pandemie, zu versachlichen.

Allein der Anstieg der 5G-Abonnements in Westeuropa von 32 Mio. im Jahr 2021 zu 69 Mio. im Jahr 2022 und einer voraussichtliche Abonnementdurchdringung von 88% im Jahr 2028 zeigt, wie relevant die Thematik für die Öffentlichkeit ist (Jonsson, 2023).

Zu Frequenzen bestehender Mobilfunkanwendungen (< 3 GHz), welche beispielsweise vom Mobilfunkstandard LTE genutzt werden, existiert eine große Anzahl an Studien zu den möglichen gesundheitlichen Auswirkungen und viele internationale Expert*innen

haben bereits Bewertungen vorgenommen. Für 5G-Anwendungen, welche auch höhere Frequenzen benutzen, liegen hingegen deutlich weniger Studien zu möglichen Wirkungen vor.

Grundlage für die derzeitigen Expositionsgrenzwerte für HF-EMF, ist die thermische Wirkung. Die Temperaturerhöhung bei Frequenzen > 10 MHz ist der einzig anerkannte und wissenschaftlich nachgewiesene biologische Wirkmechanismus von HF-EMF, wie unter anderem der Richtlinien der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection und den Standards des International Committee on Elextromagnetic Safety zu entnehmen ist (ICNIRP, 2020a; IEEE, 2019). Unterhalb der momentan gültigen Expositionsgrenzwerte sind keine gesundheitlichen thermischen Wirkungen zu erwarten. Es gibt jedoch Diskussionen darüber, ob unterhalb der Grenzwerte (insbesondere bei langfristiger Exposition) nicht-thermische Wirkungen auftreten können (Jazyah, 2024; Kaur et al., 2023; Sciorio et al., 2022).

Ein Thema, das in den Diskussionen um mögliche gesundheitliche Risiken durch HF-EMF eine große Rolle spielt, sind maligne Tumorerkrankungen.
Bereits 2011 wurde die Diskussion verschärft, als die IARC (International Agency for Research on Cancer) HF-EMF in die Kategorie 2B, also als „möglicherweise krebserzeugend/karzinogen für den Menschen“ einordnete (IARC, 2013). Diese Einschätzung der IARC wurde durch Ergebnisse der Studie des National Toxicology Program (NTP-Studie) und der Ramazzini-Studie weiter gestützt. Bei der NTP-Studie handelt es sich um eine Langzeitstudie an Ratten und Mäusen zur Ganzkörperexposition von Mobilfunkfeldern (NTP, 2018b, 2018a). Die Autor*innen sahen eine eindeutige Evidenz für das Auftreten von Herztumoren und eine mäßige Evidenz für das Auftreten von Hirntumoren und Erkrankungen des Nebennierenmarks bei männlichen Ratten. In der Ramazzini-Studie wurden Ratten pränatal bis hin zum natürlichen Tod 1,8 GHz Hochfrequenzfeldern ausgesetzt. In der Gruppe mit der stärksten Exposition konnte eine im Vergleich zur Kontrollgruppe statistisch signifikant erhöhte Inzidenz von Schwannomen des Herzens der männlichen Ratten beobachtet werden (Falcioni et al., 2018). Zudem konnte ebenso ein gehäuftes Auftreten von Schwannzell-Hyperplasien beider Geschlechter in der Gruppe mit der höchsten Exposition beobachtet werden. Die Autor*innen der Ramazzini-Studie sahen in ihren Ergebnissen eine Bestätigung der NTP-

Studie und forderten eine Neubewertung der IARC-Einstufung zu HF-EMF in Bezug auf das karzinogene Potential. Beide Studien wurden jedoch unter anderem durch das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) durch Hinweise auf methodische Mängel in den Studien, wie keine Verblindung in der initialen pathologischen Begutachtung, keine Korrektur für multiples Testen und keine Temperaturmessung in der NTP-Studie, in ihrer Bedeutung als wissenschaftliche Evidenz zu diesem Thema reduziert (BfS, 2021a, 2024b; ICNIRP, 2020b). Auch wurde die schlechte Übertragbarkeit auf den Menschen kritisiert, da beispielsweise in der NTP-Studie die Ganzkörperexpositionen ca. 20-fach oder mehr über dem gültigen Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung lagen und somit nicht auf die alltägliche Mobilfunkexposition übertragen werden können.
Die Neubewertung der möglichen Karzinogenität von HF-EMF wurde im Rahmen des IARC Monograph Programms von einer internationalen Beratergruppe des IARC als „hohe Priorität“ eingeordnet (Marques et al., 2019).

Neben der Diskussion über die Karzinogenität werden auch weitere nicht-thermische Wirkungen intensiv von Institutionen wie dem Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Risks (SCENIHR) und dem Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER) diskutiert, beispielsweise die Fruchtbarkeit und Entwicklung, kognitive Funktionen, die Gehirnaktivität oder weitere Wirkungen auf das Nervensystem (SCENIHR, 2015; SCHEER, 2023). Studienergebnisse zu diesen Themen widersprechen sich jedoch häufig, sind inkonsistent und qualitativ sehr heterogen (Cordelli et al., 2023; Pophof et al., 2021; Röösli et al., 2024).
2018 führte die WHO eine Umfrage mit 300 HF-EMF Experten durch, welche 34 genannte Endpunkte nach der GRADE-Methodik priorisieren sollten (Verbeek et al., 2021). Krebs, negative Folgen für die Reproduktion/Geburtsschäden, kognitive Einschränkungen, unspezifische Symptome (elektromagnetische Hypersensibilität), oxidativer Stress und hitzebedingte Wirkungen waren die Themen, die die höchste Priorität erhielten.
Zur Bewertung von potenziellen gesundheitlichen Auswirkungen von HF-EMF unterhalb der Grenzwerte gab die WHO zu diesen Themen neun systematische Reviews in Auftrag (Benke et al., 2024; Bosch-Capblanch et al., 2024; Cordelli et al., 2023, 2024; E. E. Johnson et al., 2024; Karipidis et al., 2024, 2025; Kenny et al., 2024; Mevissen, Ducray, et al., 2025; Meyer et al., 2024; Pophof et al., 2024; Röösli et al., 2024).

Da die immer weiter zunehmende Nutzung von Mobilfunk und insbesondere die 5G-Exposition große Teile der Bevölkerung betrifft, ist es essenziell, mögliche schädliche Wirkungen unterhalb der Grenzwerte zu erkennen – auch, wenn noch kein anderer Wirkmechanismus, außer der thermischen Wirkung oberhalb der Grenzwerte, anerkannt ist. Von den verschiedenen Kategorien, in welche die 34 genannten Endpunkte der WHO in der Umfrage eingeteilt waren, gab es keine einzige Kategorie, die nicht von mindestens 20 Experten als wichtig oder sogar kritisch eingestuft wurde (Verbeek et al., 2021).

Daher wurden in dieser Dissertation im Rahmen des systematischen Reviews die untersuchten Wirkungen nicht eingeschränkt. Berücksichtigte Endpunkte können sowohl gesundheitsbezogen, physiologisch, verhaltensbezogen sowie auch therapeutisch sein. Somit stellt das systematische Review und im Rahmen dessen diese Dissertation eine Ergänzung zu den von der WHO in Auftrag gegebenen Reviews dar.

1.1 EMF-assoziierte Syndrome

1.1.1 IEI-EMF

Die sogenannte „idiopathische Umweltintoleranz gegenüber elektromagnetischen Feldern (IEI-EMF), oft auch als Elektrohypersensibilität bezeichnet, wird kontrovers diskutiert. Trotz häufiger Verwendung als Synonyme muss klar zwischen den Begriffen „elektro(hyper)sensibel“ und „elektro(hyper)sensitiv“ unterschieden werden:

Jemand, der elektrohypersensitiv ist, also physiologisch elektromagnetische Felder oder Ströme besser wahrnehmen kann als andere Personen, muss nicht automatisch elektrosensibel (subjektive Zuschreibung von Symptomen durch EMF) sein. Laut dem BfS bezeichnen sich ungefähr 1–2 % der Menschen in Deutschland als elektrosensibel und berichten von Beschwerden wie Kopfschmerzen, Schlaf- sowie Konzentrationsstörungen, welche oft auf hochfrequente elektromagnetische Felder zurückgeführt werden (BfS, 2021b). Bisher konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Symptomen und elektromagnetischer Strahlung wissenschaftlich nachgewiesen werden. Ein Forschungsvorhaben im Rahmen des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms (DMF) zeigte, dass elektrosensible Personen sogar schlechter als Kontrollpersonen darin sind, echte elektromagnetische Pulse von Scheinimpulsen zu unterscheiden (Frick et al., 2009). Bei einer anderen doppelt-verblindeten

randomisierten kontrollierten Studie war in häuslichen Bedingungen kein/e Teilnehmer*in in der Lage, besser als der Zufall zu erkennen, ob eine Exposition stattgefunden hatte oder nicht (van Moorselaar et al., 2017). Zum gleichen Schluss kam auch eine Studie der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Kaul, 2009). Auch weitere Studien und Reviews konnten die von manchen Menschen beschriebene Elektrosensibilität nicht belegen (Ministerie van Volksgezondheid, 2020; Rubin et al., 2011; SCENIHR, 2015; Schmiedchen et al., 2019; SSM's (Swedish Radiation Safety Authority) Scientifc Council on Electromagnetic Fields, 2021). Als Ursache der Beschwerden werden andere zugrunde liegende Erkrankungen aufgeführt. Zudem wird der Nocebo-Effekt diskutiert, bei welchem es allein durch die Erwartung negativer gesundheitlicher Folgen zu Symptomen kommt, ohne dass ein kausaler Zusammenhang besteht (Eltiti et al., 2018; Verrender et al., 2018). Während IEI-EMF in Deutschland bisher nicht als Krankheit anerkannt ist, wird in Schweden die Elektrohypersensitivität (EHS) als „körperliche Beeinträchtigung" eingestuft. Aktuell testet das BfS Verhaltenstherapien, um Betroffenen zu helfen und ihre Lebensqualität zu verbessern.

1.1.2 Der Frey-Effekt

Der Frey-Effekt (englisch: microwave auditory/hearing effect) wurde erstmals während des zweiten Weltkrieges von Personen nahe Radaranlagen berichtet. Es wurde ein hörbares Geräusch, oft als Zischen, Klicken oder Summen wahrgenommen. Momentan wird die thermoelastische Theorie als wahrscheinlichster Mechanismus angenommen.
Der auditorische Effekt entsteht durch einen kleinen, aber schnellen Temperaturanstieg im Hirngewebe infolge der Absorption der gepulsten Mikrowellenstrahlung (Lin, 2022). Dieser akute, theoretisch winzige Temperaturanstieg ist praktisch nicht messbar, kann aber eine thermoelastische Ausdehnung der Hirnsubstanz bewirken. Dies löst dann eine Spannungs- oder Druckwelle aus, die sich durch das Gewebe des Kopfes bis zur Cochlea ausbreitet und dort von den sensorischen Haarzellen der Cochlea wahrgenommen wird. Die neuronalen Signale werden an das zentrale Hörsystem weitergeleitet und werden anschließend in der Großhirnrinde wahrgenommen und erkannt. Dieser Effekt konnte erstmals 1973 im Labor bei Menschen wissenschaftlich nachgewiesen werden (Frey & Messenger, 1973). Darauf folgten weitere kontrollierte Laborstudien, welche diese Annahme auch bei anderen Frequenzen, z.B. 3 GHz unterstützen konnten (Cain & Rissmann, 1978).

Der Effekt findet Anwendung in der biomedizinischen Bildgebung - das Funktionsprinzip der thermoakustischen Mikrowellentomographie (MTT) (Lin, 2022). Dieses Verfahren ist eine Kombination aus Ultraschall-Bildgebung mit dem Vorteil der Auflösung und des Kontrasts der Mikrowellen-Bildgebung. Die bereits in den 1980er Jahren gestartete Forschung zur MTT wird heutzutage aktiv fortgesetzt, beispielsweise in der medizinischen Diagnostik zur Früherkennung von Brustkrebs (Fu et al., 2014).
Da keine gesundheitliche Beeinträchtigung erwartet wird, wird dieser Effekt in den neuen Leitlinien der ICNIRP von 2020 nicht berücksichtigt (ICNIRP, 2020a).

1.1.3 Das Havanna-Syndrom

Das sogenannte Havanna-Syndrom ist ein sehr rätselhaftes Phänomen, welches bereits in über 1500 Fällen in 96 Ländern berichtet wurde (Tagesschau, 2023). Erstmals im Jahr 2016 klagten Mitarbeiter der US-Botschaft in Havanna (Kuba) über Kopfschmerzen, Hörverlust, Schwindel und Übelkeit nach dem Hören seltsamer Töne. Über die Ursache gab es zahlreiche Spekulationen; so wurde von „umgelenkter Energie“ und einer neuen „Mikrowellen-Waffe“ gesprochen. Ein systematisches Review aus 2023 kommt zu dem Schluss, dass das Havanna Syndrom eine unspezifische neurologische Erkrankung mit einem oder mehreren nicht identifizierten ursächlichen Faktoren ist. Es besteht demnach aus einer akuten Phase mit spezifischen auditiven/vestibulären Symptomen und einer chronischen Phase mit unspezifischen neurologischen Symptomen. Viele Studien zeigen dabei ein geringes Evidenzlevel (Asadi-Pooya, 2023). Die Ursache scheint eher multifaktoriell zu sein und ist auch nach der neusten These eines US-Experten-Komitees nicht auf einen ausländischen Angriff mittels Mikrowellenwaffe zurückzuführen (Office of the Director of National Intelligence, 2023).

1.2 Hintergrund

1.2.1 Physikalischer Hintergrund: Elektromagnetische Felder (EMF)

Die elektrische und magnetische Komponente wird bei niederfrequenten Feldern unabhängig voneinander betrachtet, während diese bei hochfrequenten Feldern aneinandergekoppelt sind – hier spricht man von elektromagnetischen Feldern. Sie besitzen eine Eigenschaft, welche beispielsweise im Mobilfunk oder drahtloser Datenübertragung zur Informationsübertragung verwendet wird: Sie können sich im

Hochfrequenzbereich von ihrer Quelle „ablösen“ und große Entfernungen mit Lichtgeschwindigkeit zurücklegen.

Elektromagnetische Felder gehören zur nicht-ionisierenden Strahlung. Sie sind ein Teil des elektromagnetischen Spektrums, welches sich in einen nicht-ionisierenden und einen ionisierenden Strahlungs-Bereich aufteilen lässt (siehe Abbildung 1). Bei einer Frequenz von 0 Hz spricht man von statischen elektrischen und magnetischen Feldern, bei > 0 Hz bis etwa 300 Hz spricht man vom Niederfrequenzbereich, bei 300 Hz bis etwa 10 MHz vom Intermediär- oder Zwischenfrequenzbereich und von 10 MHz bis 300 GHz vom Hochfrequenz-Bereich. Ein Teil des Hochfrequenzbereiches von 300 MHz bis 300 GHz sind Mikrowellen. Beispiele für den Einsatz von Mikrowellen als (künstliche) HF-EMF sind Mobilfunk, WLAN, Rundfunk, Radar oder auch medizinische Anwendungen (Gallucci et al., 2022; Gupta et al., 2022).

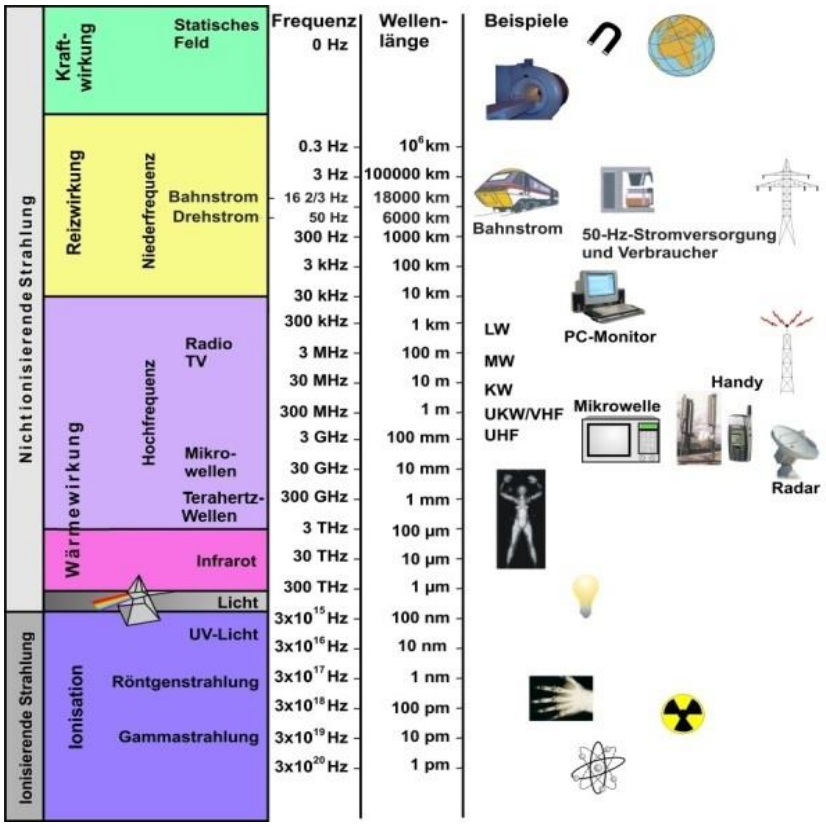


Abbildung 1: Schematische Darstellung des elektromagnetischen Spektrums; aus (EMF-Portal | Elektromagnetisches Spektrum)

Im Gegensatz zu ionisierender Strahlung haben die Photonen nicht-ionisierender Strahlung nicht genug Energie, um Elektronen aus der Hülle zu „schlagen“ und somit positiv geladene Teilchen (Ionen) zu erzeugen- also zu ionisieren (BfS -

Elektromagnetische Felder). Die nicht-ionisierende Strahlung wird häufig für medizinische Anwendungen wie z.B. den Ultraschall oder die Laserchirurgie verwendet. Gerade Frequenzen im höheren Bereich sind durch die oberflächliche Wirkung für sehr präzise Ablationen und Oberflächenbehandlungen geeignet (Omer, 2021).

Die Wellenlänge (m, Meter) und die Frequenz (Hertz, Hz, 1 Hz = 1 Schwingung pro Sekunde) sind voneinander abhängig: je höher die Frequenz, desto schneller ist die Schwingung, desto kürzer ist die Wellenlänge.
Ebenfalls gilt: Je höher die Frequenz ist, desto geringer ist die Eindringtiefe der EMF in Gewebe. Bei Muskeln reduziert sich die Eindringtiefe beispielsweise von 3,5 cm bei 1 GHz auf 0,3 mm bei 100 GHz. Infolgedessen findet die Energieabsorption bei höheren Frequenzen konzentrierter an der Oberfläche statt, was wiederum durch schnelle Reibung der Teilchen aneinander zu einer Oberflächenerwärmung führen kann (SCHEER, 2023). Bei einer örtlich begrenzten Erwärmung wird überschüssige Wärme durch das Blut abgeführt und ausgeglichen. Bei einer Ganzkörpererwärmung kommt es zunächst zu einer verstärkten Durchblutung der Haut, woraufhin die Wärme über die Hautoberfläche verdunstet (Schwitzen) (BfS - Elektromagnetische Felder). Die einzige wissenschaftlich anerkannte und nachgewiesene Wirkung von HF-EMF ist die Wärmewirkung. Erst wenn elektromagnetische Felder so hoch sind, dass es zur Erwärmung kommt, können Menschen die elektromagnetischen Felder dadurch wahrnehmen (Mikrowellenprinzip) (Heck, 2019).
Der Prozess von Exposition gegenüber HF-EMF hin zu einer Erkrankung/Beeinflussung von Geweben und Strukturen besteht aus mehreren Schritten einer kausalen Kette. Abbildung 2 zeigt die verschiedenen Schritte dieser Kausalkette. Dabei kann aber muss nicht zwangsläufig auf einen Schritt der Kette der Nächste folgen, d.h. es muss nicht zwangsläufig nach einer Exposition auch zu einer Erkrankung kommen (Valberg et al., 2007).

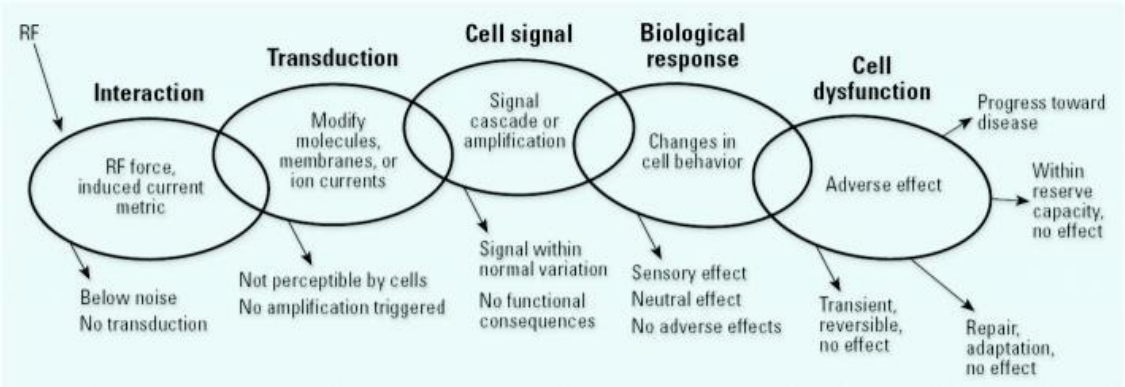


Abbildung 2: Interaktion elektromagnetischer Strahlung mit biologischen Systemen; aus (Valberg et al., 2007)

Dabei ist die Wirkung der elektromagnetischen Strahlung auf das Lebewesen aber nicht allein von den Komponenten des Feldes, sondern auch von den Komponenten und der Reaktion des Lebewesens abhängig – es findet eine Interaktion statt.

Die Absorption hängt von der Wassermenge, also den dielektrischen Eigenschaften des Gewebes ab: bei Muskeln und Blut, welche einen hohen Wasseranteil besitzen, ist die Absorption hoch, während bei Fett oder Knochen mit wenig Wasseranteil die Absorption deutlich niedriger ist und somit mehr Energie in das Gewebe vordringt.

Außerdem ist die Resonanz von großer Bedeutung. Der Körper, welcher der Empfänger der elektromagnetischen Strahlung ist, befindet sich im sogenannten „Resonanzbereich“, wenn die Größe etwa die halbe Wellenlänge der Strahlung beträgt. In diesem Bereich nimmt der Körper besonders viel Energie der Strahlung auf. Der Resonanzfrequenzbereich ist von der Körpergröße und der Orientierung im Feld abhängig. Bei der Ergebnisübertragung von Tierexperimenten auf den Menschen ist also sehr relevant, dass eine Maus beispielsweise bei ihrer Resonanzfrequenz von ca. 2 GHz viel mehr Energie pro Gramm Körpergewicht aufnimmt als ein Mensch bei dieser Frequenz (BfS - Elektromagnetische Felder). Die entstehenden internen elektrischen Felder sind also abhängig von diesen verschiedenen Parametern.

1.2.2 Grenzwerte

Da wie oben beschrieben die Einkopplung der externen Felder in den Körper von mehreren Faktoren abhängt, stellen externe Expositionsparameter anstatt der internen Expositionsparameter meist nur sehr grobe Näherungswerte da. Von der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) wurden deshalb interne als auch externe Metriken als Grenzwerte festgelegt. Die körpereigenen internen Grenzwerte sind sogenannte „Basisgrenzwerte“. Diese beruhen auf unmittelbar gesicherten gesundheitlichen Folgen und werden in physikalischen Größen wie der spezifischen Absorptionsrate (SAR) angegeben. Die externen Grenzwerte sind „Referenzgrenzwerte“ zur Beurteilung der Exposition in der Praxis. Diese werden als abgeleitete Größen wie die elektrische Feldstärke angegeben. Je nach Frequenz werden für die Grenzwerte verschiedene Parameter herangezogen.

Die spezifische Absorptionsrate (SAR) wird in Watt pro Kilogramm Gewebe (W/kg) angegeben und beschreibt, wie viel Leistung pro Zeit und Kilogramm Körpergewicht absorbiert wird (ICNIRP, 2020a).

Der SAR ist nur dann sinnvoll, wenn die Eindringtiefe bei > 1 cm liegt, also sich der Frequenzbereich dementsprechend zwischen 100 kHz und ca. 6 GHz befindet (ICNIRP, 2020a). Sowohl in den ICNIRP-Richtlinien aus 1998 als auch in denen aus 2020 wird ein SAR-Ganzkörpergrenzwert von 0,08 W/kg für die Allgemeinbevölkerung und 0,4 W/kg für beruflich Exponierte Personen vorgeschlagen, um die Möglichkeit thermischer Wirkungen für die Bevölkerung unter allen Umwelt- und Gesundheitsbedingungen auszuschließen.

Der Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung hat folgenden Hintergrund: Eine längerfristige Erhöhung der Körperkerntemperatur > 1 °C kann gesundheitsschädliche Folgen haben. Es ist bekannt, dass HF-EMF bei einer SAR von 4 W/kg in 30 min zu einer Erhöhung der Körperkerntemperatur um 1 °C führen kann. Daher wurde dieser Basisgrenzwert mit einem Sicherheitsfaktor von 50 kombiniert, sodass der geltende SAR-Grenzwert nun bei 0,08 W/kg für den ganzen Körper festgelegt ist.

Gerade die Einführung von 5G führt zu einer Exposition mit HF-EMF mit Frequenzen von > 6 GHz, was ebenfalls in den Veränderungen der neusten Leitlinien berücksichtigt wird (ICNIRP, 2020a). Zu diesen Änderungen gehören unter anderem Beschränkungen für Ganzkörper-Durchschnittswerte für Frequenzen > 6 GHz, Beschränkungen für kurze (< 6

Minuten) Expositionen für Frequenzen > 6 GHz und die Verringerung des Mittelungsbereichs für Frequenzen > 6 GHz.
Hier wird der Basisgrenzwert als Leistungsflussdichte angegeben (10 W/m^{-2} für die Allgemeinbevölkerung und 50 W/m^{-2} für beruflich Exponierte Personen) anstatt des SAR, da die Eindringtiefe zu gering und eine Mittelung über Gewebemassen irrelevant wird, sodass der SAR kein geeignetes Maß mehr darstellt.
Die Leistungsflussdichte S des elektromagnetischen Feldes wird in Watt pro Quadratmeter (W/m^2) gemessen.

Die frequenzabhängigen Grenzwerte für ortsfeste Anlagen des Mobilfunks, wie Mobilfunkbasisstationen, werden in Deutschland in der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BimSchV) des BMVU festgelegt (siehe Kapitel 1.3.2). Mobiltelefone sind in der Verordnung nicht berücksichtigt, für diese gibt es stattdessen international anerkannte Produktnormen. Diese Normen beziehen sich auf die Einhaltung von Basisgrenzwerten nach ICNIRP und nicht auf Referenzwerte, da diese aufgrund der starken lokalen Exposition nicht geeignet sind. Es kommen lokale SAR-Grenzwerte zum Einsatz: Der SAR-Wert eines Handys gibt hier entsprechend an, wie viel Sendeleistung der Körper beim Telefonieren mit diesem Gerät maximal aufnehmen kann. Dieser darf europaweit bei verkauften Mobiltelefonen und Tablets nicht überschritten werden. Da der Kopf durch das Telefonieren besonders intensiv elektromagnetischer Strahlung von Mobiltelefonen ausgesetzt ist, wurden zum Schutz der Nutzer international ein Teilkörper SAR-Wert festgelegt, welcher am Kopf maximal 2 Watt/kg (gemittelt über 10 g) betragen darf. An den Extremitäten sind maximal 4 W/kg zulässig (ICNIRP, 2020a).
Der angegebene SAR-Wert eines Mobiltelefons wird bei der maximal möglichen Sendeleistung eines Smartphones gemessen, sodass der SAR-Wert während des Telefonierens aufgrund einer dynamisch anpassbaren Sendeleistung des Mobiltelefons aber tatsächlich bei deutlich niedrigeren Werten liegt. Je besser das Netz ausgebaut und je näher an einer Basisstation, desto niedriger die ausgesendete Leistung (Informationszentrum Mobilfunk, 2018).

1.2.3 Die 5. Generation des Mobilfunks – 5G

Den Anfang des Mobilfunks machte die 1. Generation (1G) in den 1980er Jahren. Ungefähr alle zehn Jahre entstand ein neuer Standard, sodass heutzutage die 5. Generation (5G) den neusten Technologiestandard darstellt.

Hauptquellen von 5G sind Mobiltelefone, Mobilfunk-Basisstationen, Wearables sowie auch immer mehr 5G-Campusnetze.

5G wird in verschiedenen Frequenzbändern/-bereichen betrieben. Bereits 2019 hat die Europäische Union drei 5G- „Pionierbänder“ harmonisiert: 700 MHz (703–733 MHz und 758–788 MHz), 3,6 GHz (3,4–3,8 GHz, 5G FR1/Frequenzbereich 1) und 26 GHz (24,25–27,5 GHz, 5G FR2) (Directive (EU) 2018/1972, 2018). Seit Januar 2022 ist kommerzielles 5G in allen 27 Mitgliedstaaten der EU verfügbar und etwa 89 % der EU-Bevölkerung werden von mindestens einem 5G-Basisnetzwerk abgedeckt (European 5G Observatory, 2023, 2024). Die weltweit meistgenutzten Frequenzbänder sind 700 MHz und 3,3–3,8 GHz. Beispielsweise werden aber auch 4,9 GHz in China, 28 GHz in Japan, Südkorea und den USA oder 39 GHz in den USA als Frequenzen verwendet (European 5G Observatory, 2023).

Die Übertragungsgeschwindigkeit ist 10–100-fach schneller als bei 4G oder LTE, die Latenz geringer und die Bandbreite hoch. Mit steigender Frequenz nimmt die Reichweite ab, weshalb insbesondere der FR2-Bereich das Positionieren vieler neuer Mobilfunkbasisstationen fordert – es entstehen sogenannte „small-cells“ (SCHEER, 2023). Zur Steigerung der Effizienz können vor allem im FR1-Bereich adaptive Antennen, sogenannte MIMO-Antennen (Multiple Input, Multiple Output), eingesetzt werden. Diese können die Signale in die Richtung des Empfängers bündeln, was man als „Beamforming“ bezeichnet. Die Daten erreichen den Empfänger gezielter, was eine Erhöhung der Datenraten bei geringerer Energie ermöglicht und gleichzeitig die Exposition verringert, da weniger ungerichtete Leistung in die Umgebung abgegeben wird (BfS - Elektromagnetische Felder).

1.3 Relevante Institutionen

1.3.1 International: ICNIRP, SCENIHR und SCHEER

Die **International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)** ist eine von der WHO anerkannte und von der EU konsultierte Kommission, die den wissenschaftlichen Kenntnisstand über nicht-ionisierende Strahlung analysiert. Bereits im Jahr 1998 veröffentlichte die ICNIRP die Leitlinien "Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)", welche auf negativen gesundheitlichen Auswirkungen aufgrund der Temperaturerhöhung basierten und auf nachgewiesenen gesundheitsschädlichen Wirkungen beruhen. Die 2020 aktualisierten Leitlinien weisen eine höhere Genauigkeit bei den Dosimetrie-Berechnungen auf und bieten zusätzliche Hinweise und Empfehlungen, welche für die neuesten Entwicklungen der 5G-Technologie relevant sind (ICNIRP, 2020a).

Das **Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR)** der Europäischen Kommission erstellt Gutachten zu neu auftretenden oder identifizierten Risiken, insbesondere in Bezug auf den Verbraucherschutz oder die öffentliche Gesundheit. Im Jahr 2015 veröffentlichte das SCENIHR ein finales Update zu den möglichen gesundheitlichen Wirkungen durch EMF-Exposition. Intensiv diskutierte nicht-thermische Wirkungen betrafen die Gehirnaktivität, kognitive Funktionen und die Fruchtbarkeit (SCENIHR, 2015).

Im Jahr 2016 wurde das SCENIHR durch das **Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER)** ersetzt. Insbesondere nach der Aktualisierung der ICNIRP-Leitlinien 2020, wurde das SCHEER zur Notwendigkeit einer Überarbeitung der entsprechenden EU-Empfehlungen und -Richtlinien (Empfehlung 1999/519/EG des Rates, Richtlinie 2013/35/EU) in Bezug auf HF-EMF konsultiert.

In der neusten Stellungnahme sieht das SCHEER keine moderaten oder starken Belege für gesundheitsschädliche Wirkungen durch HF-EMF-Exposition unterhalb der geltenden Grenzwerte (SCHEER, 2023).

1.3.2 National: BfS, BMUV, SSK

Das **Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)** ist eine zentrale Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV). Das BfS agiert dabei zum Schutz und zur Sicherheit von Menschen und der Umwelt in Bezug auf ionisierende und nicht-ionisierende Strahlung.

Es berät die Bundesregierung zur Bewertung des Mobilfunks, stellt Informationen für die Öffentlichkeit zusammen und initiiert verschiedene Projekte wie das Deutsche Mobilfunkforschungsprogramm (DMF) (BfS, 2025).

Das **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMVU)** legt, basierend auf den Empfehlungen der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK, s.u.) und der ICNIRP, Grenzwerte im Mobilfunk fest (BMVU, 2025). Die 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes novelliert diese Grenzwerte (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV, 2013).

Die **Strahlenschutzkommission (SSK)** berät das BMUV zu Risiken ionisierender und nicht-ionisierender Strahlung (SSK, 2024). Anders als bei der Anwendung ionisierender Strahlung gibt es für die Anwendung von nicht-ionisierender Strahlung kein vollständiges Gesetzes- und Regelwerk, das den Schutz vor schädlichen Auswirkungen sicherstellt.

1.4 5G in Europa

5G-PPP und der Aktionsplan der EU-Kommission

Bereits im Jahr 2013 gründete die Europäische Kommission gemeinsam mit der europäischen IKT-Industrie die 5G Public-Private Partnership (5G-PPP), um die Forschung und Innovation von 5G zu beschleunigen (5G-PPP, 2024). Der im Jahr 2016 verabschiedete 5G-Aktionsplan adressierte mangelnde Koordination zwischen Mitgliedstaaten und zielte auf eine einheitliche 5G-Einführung in allen EU-Mitgliedsstaaten bis Ende des Jahres 2020 ab (Europäische Kommission, 2016). Nach Erreichen der meisten Ziele bis 2021, steht nun die flächendeckende Versorgung im Fokus.

European 5G Observatory

Das European 5G Observatory überwacht den Fortschritt der europäischen 5G-Ziele und veröffentlicht Fortschrittsberichte. Die letzten Reporte zeigen eine langsame Zunahme der 5G-Abdeckung der Bevölkerung auf 89 % (European 5G Observatory, 2023, 2024). Die 5G-Abonnements verzeichnen ein sehr starkes Wachstum von 32 Mio. 2021 zu 69 Mio. 2022 und prognostizierten 143 Mio. in den folgenden Jahren.

Politische Schwerpunkte:

- 5G Security Toolbox (2020): identifiziert Risiken und strategische Maßnahmen für Cybersicherheit bezüglich 5G in den Mitgliedsstaaten der EU.
- Initiative „Digital Decade“: Integration grüner Technologien zur Bekämfung des Klimawandels mit dem Ziel einer 100 % 5G-Abdeckung bis 2030 (vs. 81 % 2023) sowie 100 % 5G-Abdeckung im Bereich 3,4-3,8 GHz bis 2030 (vs. 41 % in 2023). Im letzten Report der EU Digital Decade wird deutlich, dass die EU im Bereich der 5G-Abdeckung anderen Ländern stark nachsteht – in den USA sind beispielsweise schon jetzt 96 % mit 5G versorgt (Europäische Kommission, 2023).

1.4.1 Der Umgang mit Expositionsgrenzwerten

Trotz oder gerade aufgrund des fortschreitenden Ausbaus von 5G muss die Bevölkerung nach dem Electronic Communications Code ausreichend geschützt werden (Directive (EU) 2018/1972, 2018). Die Expositionsgrenzwerte basieren auf den ICNIRP-Leitlinien, welche 50-fach unterhalb der Werte mit Evidenz für gesundheitliche Schäden liegen (ICNIRP, 2020a).

Herausforderungen:

- Zu hohe Grenzwerte bergen ein potenzielles Gesundheitsrisiko
- Zu niedrige Grenzwerte schränken den Netzausbau ein. Im Jahr 2020 wurden beispielsweise von der EU-Kommission verbindlich neue Regularien eingeführt, um die Errichtung von „small-cells“ zu erleichtern, welche in Ländern mit strengen, niedrigen Grenzwerten sonst gegen die Grenzwerte verstoßen hätten (Europäische Kommission, 2020).

Die EMF-Grenzwerte des Europäischen Rates an sich sind jedoch nur Empfehlungen und nicht verbindlich für die EU-Mitgliedsstaaten. Diese Unverbindlichkeit führt zu sehr unterschiedlichen Ansätzen der EMF-Grenzwerte. So konnten die EU-Mitgliedsstaaten bezüglich ihrer Ansätze in drei verschiedene Gruppen aufgeteilt werden (Stam, 2018):

- Gruppe 1: Die EU-Empfehlung wurde in verbindliche nationale Rechtsvorschriften oder in nationale Politik umgesetzt
- Gruppe 2: Nationale Grenzwerte, die auf der EU-Empfehlung oder der ICNIRP beruhen, sind nicht verbindlich, es gibt mildere Grenzwerte oder keine Regelung
- Gruppe 3: Strengere Beschränkungen auf der Grundlage des Vorsorgeprinzips oder aufgrund von öffentlichem Druck

Deutschland lässt sich hier dementsprechend Gruppe 1 zuordnen.

1.4.2 5G in Deutschland

Bereits im Herbst 2016 startete die Bundesregierung die „5G Initiative für Deutschland“, im Rahmen derer die ersten Maßnahmen bezüglich 5G vorgestellt und diskutiert wurden. Als Ergebnis dieses Prozesses veröffentlichte die Bundesregierung im Sommer 2017 eine nationale 5G-Strategie bis 2025 mit fünf wichtigen Handlungsfeldern: Netzausbau beschleunigen, verfügbare Frequenzen bedarfsgerecht bereitstellen, Zusammenarbeit zwischen Telekommunikations- und Anwenderbranchen fördern, gezielte und koordinierte Forschung, 5G-Einführung in Städten und Gemeinden initiieren. Zudem gründete die Bundesregierung die Dialoginitiative „Deutschland spricht über 5G“, um sowohl sachlich zum Thema 5G zu informieren als auch einen Dialog zu Bürger*innen und ihren Sorgen bezüglich der neuen Technologie 5G herzustellen (Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2024).

Die 5G-Abdeckung in Deutschland lag laut Telefonica mit seiner Marke O2 im Juni 2025 bei 98% (Telefónica, 2025). Der häufigste Typ an 5G-Basisstationen nutzt über eine Dynamic Spectrum Sharing (DSS)-Konfiguration gleichzeitig 4G-Bänder, wodurch Ressourcen dynamisch zugewiesen werden und ein besserer Übergang von 4G zu 5G ermöglicht werden kann. Es folgen die Basisstationen bei 700 MHz und bei 3,4–3,8 GHz (European 5G Observatory, 2023). Bereit seit September 2022 wird 5G im Rahmen des Projektes „Digitale S-Bahn Hamburg“ in autonomen Zügen verwendet (Deutsche Bahn, 2022).

1.5 5G in der Medizin

Nicht nur grundsätzlich in der Bevölkerung, sondern auch in der Medizin werden die 5G-Technologien bereits genutzt und in den kommenden Jahren eine immer größer werdende Rolle spielen. Dies bietet einerseits viele Möglichkeiten, bringt aber auch viele Herausforderungen und Limitierungen mit sich (Devi et al., 2023; Jain & Jain, 2022).
In der Medizin werden HF-EMF bereits zu diagnostischen oder therapeutischen Zwecken genutzt: Mikrowellen-Diathermie (gleiches Frequenzband wie 2G, 3G und WLAN), Mikrowellen-induzierte thermoakustische Echografie (gleiches Frequenzband wie 4G),

Bildgebung (gleiches Frequenzband wie 2G, 3G und 4G und 5G) und im Monitoring (gleiches Frequenzband wie mm-Wellen-5G) (Theodorou et al., 2021).

Mögliche Einsatzbereiche sind vielfältig: von Patiententransport, „smarter" Krankenhausversorgung, Ferndiagnosen, VR-Technologie, über Patientenmonitoring hin zu tragbaren oder „smarten" medizinischen Geräten (Li, 2019). Auch für Fernoperationen mit dem Roboter spielt eine schnelle Übertragung, welche durch 5G möglich wird, eine entscheidende Rolle. Die 5G-Technologie ist auch eine Möglichkeit, den Trend der „Präzisionsmedizin" oder der „personalisierten Medizin" anzutreiben (Kang et al., 2023).

Ein Forschungsprojekt für Einsatz von 5G in der Medizin ist zum Beispiel 5URVIVE (**5**G-basierte **U**mfassende Strategie zu**R** **V**erbesserung des Überlebens **I**n der Notfall**VE**rsorgung) (5URVIVE, 2024). Es ist, wie das systematische Review, in das diese Dissertation eingeflossen ist, ebenfalls ein Teilprojekt des Förderwettbewerbs 5G.NRW und wurde im Rahmen des Fachsymposiums „Vernetzte Städte NRW" vorgestellt. Es hat das Ziel, verschiedene Aspekte, wie zum Beispiel den Transport von AEDs mit Drohnen, die Unterstützung des Ersthelfers durch den Telenotarzt oder durch eine digitale Rettungsgasse, die Rettungskette beim Kreislaufstillstand durch die Integration verschiedener neuer Aspekte unter dem Einsatz der 5G-Technologie zu optimieren, um somit mehr Leben retten zu können.

All diese Einsatzmöglichkeiten in der Medizin würden die Exposition bei 5G-Feldern und auch die Abhängigkeit von der Technologie jedoch noch weiter erhöhen, weshalb auch hier die Erforschung von Langzeitauswirkungen, das Risiko von Cyberkriminalität und die stärkere Abhängigkeit von der Technologie bedacht werden muss (Agrawal et al., 2023).

1.6 Bisherige Untersuchungen zu 5G und den gesundheitlichen Auswirkungen

In den letzten Jahren wurden bereits einige Reviews und Stellungsnahmen relevanter Institutionen mit spezifischem Fokus auf 5G und deren mögliche gesundheitliche Risiken veröffentlicht.

Im Jahr 2020 veröffentlichte das Komitee für elektromagnetische Felder des „Health Council“ der Niederlande einen Bericht zum wissenschaftlichen Stand möglicher gesundheitlicher Folgen durch 5G-Exposition (Ministerie van Volksgezondheid, 2020). Verschiedene Erkrankungen und biologische Prozesse wurden als „möglich“ klassifiziert, wobei das Komitee kein starkes Risiko bei Frequenzen wie 700 MHz oder 3,5 GHz sieht, da diese bereits vor 5G genutzt wurden und keine gesundheitlichen Schäden bewiesen werden konnten. Da jedoch insbesondere für Frequenzen wie 26 GHz, welche auch für 5G relevant sind, fast keine Studien bzgl. der Auswirkungen vorliegen, war es dem Komitee schlussendlich nicht möglich, ein Statement über die tatsächlichen Gesundheitsrisiken zukünftiger 5G-Exposition zu erstellen.

Weiterhin kam, als weitere öffentliche Stelle, die französische Agentur für Lebensmittel, Umwelt-und Arbeitsschutz (ANSES) in ihrer 2022 veröffentlichten Stellungnahme zu der Schlussfolgerung, dass es kein neues gesundheitliches Risiko bei Frequenzen von 3,5 GHz gibt (ANSES, 2022). Zur Exposition bei 26 GHz konnte jedoch keine Aussage getroffen werden. Dies glich den Schlussfolgerungen im Bericht des niederländischen Komitees.

Das STOA („Gremium für die Zukunft der Wissenschaft und Technologie“) des Europäischen Parlaments beauftragte ein Review zur Untersuchung des Frequenzbereiches 450 MHz–300 GHz und deren Auswirkungen auf Wirbeltiere (ausgenommen Menschen), Wirbellose und Pflanzen (Thielens, 2021). Thielens konnte jedoch abgesehen von dielektrischer Erwärmung keine weiteren Wirkungen feststellen.

Auch Belpoggi führte im Auftrag der STOA ein Review für die Frequenzen von 450 MHz–6 GHz und 24–100 GHz zu den Themen der Karzinogenität und Reproduktion/Entwicklung durch (Belpoggi, 2021). Im Gegensatz zu Thielens konnte Belpoggi im Frequenzbereich von 450 MHz–6 GHz mögliche negative Auswirkungen in Bezug auf die Karzinogenität und die Reproduktion/Entwicklung feststellen.

Ein weiteres systematisches Review untersuchte *in-vivo*-Tierstudien den Zusammenhang zwischen HF-EMF (100 kHz–300 GHz) und dem Krebsrisiko (Pinto et al.,

2023). Zwar konnten in einigen Geweben statistisch signifikante Zusammenhänge beobachtet werden, die Evidenz wurde jedoch für jedes untersuchte Gewebe als gering oder unzureichend bewertet.

Weiterhin untersuchte auch ein Team der Swinburne University of Technology und der Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA) in einer Metaanalyse und in einem Review die Exposition mit Frequenzen > 6 GHz (Karipidis et al., 2021; Wood et al., 2021). Sie konnten keine ausreichende Evidenz für negative gesundheitliche Auswirkungen finden, kritisierten jedoch nicht unabhängig replizierbare Ergebnisse und eine sehr schlechte Methodik der eingeschlossenen Studien, sodass unter anderem Wirkungen in Folge von Erwärmung nicht ausgeschlossen werden können.

Die schwedische Strahlenschutzbehörde kommt zu dem Schluss, dass die Exposition mit EMF, eingeschlossen HF-EMF, unterhalb der geltenden Grenzwerte keine gesundheitlichen Auswirkungen auf den Menschen hat (Huss et al., 2025). Tierexperimentelle Studien deuten auf Wirkungen wie erhöhten oxidativen Stress hin – die Ergebnisse konnten jedoch nicht konsistent auf Menschen übertragen werden. Die Beweise für nicht-thermische Wirkungen seien weiter unschlüssig.

Auch Simkó & Mattsson führten ein Review im Frequenzbereich von 6 GHz–100 GHz durch (Simkó & Mattsson, 2019). Fast alle Studien befanden sich jedoch im Bereich zwischen 30 und 65 GHz, nur sehr wenige unter 30 GHz. Aufgrund dessen und weil es keine konsistente Beziehung zwischen Leistungsdichte, Expositionsdauer oder der Frequenz und der einhergehenden Wirkungen gab, kamen sie zu dem Schluss, dass diese Erkenntnisse nicht für eine Sicherheitsbewertung ausreichen. Auch die Frage über nicht-thermische Wirkungen kann aus den Ergebnissen nicht aussagekräftig beantwortet werden.

Chiaraviglio und Kolleg*innen schlussfolgerten, dass gesundheitliche Bedenken bezüglich 5G nicht wissenschaftlich gestützt werden können (Chiaraviglio et al., 2021).

Hinrikus und Kolleg*innen untersuchten in einem Review die Folgen einer Exposition im Frequenzbereich von 450 MHz–2500 MHz in Bezug auf das Gehirn (Hinrikus et al., 2022). Es konnte kein konsistenter Zusammenhang zwischen den Wirkungen von HF-EMF und den Expositionsparametern der Mobilfunkgenerationen bis 4G gezeigt werden. Dies

sollte sich für 5G im Frequenzbereich FR1 nicht wesentlich unterscheiden, für den Bereich FR2 seien die Auswirkungen unvorhersehbar. Es konnte keine experimentellen Humanstudien mit einer Exposition > 2500 MHz oder Studien explizit mit 5G-Exposition eingeschlossen werden.

Auch ein weiteres Review betont, dass es zwar in einigen Studien Hinweise auf Veränderungen des EEGs durch EMF generell gebe, es jedoch nur wenige Studien zur Exposition gegenüber Millimeterwellen und der Mobilfunktechnologie 5G gibt. Somit lassen sich laut Autor*innen keine Schlussfolgerungen zu den Auswirkungen auf die Gehirnfunktion ziehen (Torkan et al., 2025).

Russell kam zu dem Schluss, dass HF-EMF wie „Gift für biologische Systeme“ zu wirken scheint und forderte sowohl ein Moratorium für die Einführung von 5G als auch die Entwicklung unabhängiger Gesundheits- und Umweltbeiräte sowie den Einschluss unabhängiger Wissenschaftler (Russell, 2018).

Kostoff und Kolleg*innen veröffentlichten im Jahr 2020 ein Review zu den gesundheitlichen Auswirkungen von 5G unter lebensechten Bedingungen. Die Autor*innen behaupteten, dass "es eine große Anzahl von Daten aus Labor- und epidemiologischen Studien gibt, die zeigen, dass frühere und aktuelle Generationen von drahtlosen Netzwerktechnologien erhebliche negative Auswirkungen auf die Gesundheit haben", und dass "die Überlagerung der 5G-Strahlung mit einer bereits vorhandenen toxischen drahtlosen Strahlungsumgebung die nachgewiesenen negativen Auswirkungen auf die Gesundheit noch verschlimmern wird" (Kostoff et al., 2020).

Wersényi kritisierte in seinem Review, wie viele andere Autor*innen auch, dass die meisten Experimente schlecht konzipiert waren und die grundlegenden Kriterien einer korrekten wissenschaftlichen Bewertung nicht erfüllt seien (Wersényi, 2022). Zudem würden wissenschaftlichen Untersuchungen, welche keine gesundheitlichen Auswirkungen zeigen, nur selten veröffentlicht und in Reviews zitiert werden. Es gebe jedoch keine Belege dafür, dass die Exposition durch Mobilfunkbasisstationen unter realistischen Bedingungen gesundheitsschädlich ist.

De Vocht & Albers untersuchten insgesamt 15 verschiedene Reviews, Kommentare oder Meinungsartikel im Hinblick auf ihre Argumentation bezüglich gesundheitlicher Auswirkungen durch 5G-Exposition je nach ihrer Verbindung zu der 5G-Industrie, Aktivismus oder Unabhängigkeit (de Vocht & Albers, 2022). Es fand sich keine eindeutige

Antwort darauf, ob Artikel mit Verbindungen zu Aktivisten/Kampagnen-Organisationen eine Überschätzung der Risiken beschreiben, Artikel mit Verbindungen zur Industrie eine Unterschätzung der Risiken beschreiben oder eine zukünftig kombinierte Bewertung wahrheitsgetreuere Evidenzsynthesen fördern würde.

Sofri und Kolleg*innen untersuchten im Review die gesundheitlichen Wirkungen einer Exposition bei 5G-Basisstationen, schlossen jedoch keine Studien im Bereich 3–30 GHz ein (Sofri et al., 2022).
Di Ciaula konnte in seinem Review ebenfalls keine Studien im Bereich von 3–30 GHz einschließen und kam daher zu dem Schluss, dass gerade in diesem Bereich weiterer Bedarf an Forschung besteht (Di Ciaula, 2018). Gleichzeitig berief er sich aber auch auf das Vorsorgeprinzip und forderte, in Anbetracht der Vielzahl an Personen, die von dieser Art der Exposition betroffen sind, die Überarbeitung der momentanen Grenzwerte, da die Beweise aus bestehenden Studien ausreichend seien.

Zu den bisherigen Reviews zum Thema der gesundheitlichen Auswirkungen von 5G lässt sich zusammenfassen, dass viele der Reviews und der einbezogenen Studien von schlechter Qualität sind und sich auch die Ergebnisse widersprüchlich darstellen. Die fehlende Studienlage für den FR2-Bereich ist ein zentrales Problem. Viele methodische Mängel wie die fehlende Angabe der Suchstrings, die fehlende Bestimmung der Studienqualität und der fehlende Einschluss von Frequenzen im Bereich von 3–30 GHz zeigen, dass anhand der bisherigen Reviews keine systematische Recherche, Analyse und Bewertung zu den Folgen bezüglich der Gesundheit durch 5G stattgefunden hat.

2 Begründung und Zielsetzung

Aus der weit verbreiteten und zunehmenden Nutzung von 5G resultiert ein hohes Expositionspotenzial für einen Großteil der Bevölkerung, weshalb eine starke Relevanz für die öffentliche Gesundheit besteht. Die Einführung von 5G hat bei vielen Menschen starke Besorgnis ausgelöst und die Berichterstattung der Medien war groß, sodass man die Sorgen der Bevölkerung vor gesundheitlichen Schäden wissenschaftlich überprüfen sollte. Obwohl nur wenige Daten für den neu genutzten Frequenzbereich von 3–30 GHz und für Frequenzen > 30 GHz, welche in der Zukunft voraussichtlich auch genutzt werden, vorliegen, haben viele Behörden und Institutionen geschlussfolgert, dass es vermutlich keine gesundheitlichen Schäden durch 5G geben wird. Trotz einiger Reviews sind diese möglichen Folgen und Auswirkungen von 5G nicht systematisch überprüft und bewertet worden.

Somit ist es notwendig, ein systematisches Review und im Rahmen dessen diese Teilanalyse zu den potenziellen Wirkungen 5G-relevanter HF-EMF-Exposition, insbesondere bezogen auf bisher ungenutzte Frequenzen in den vorherigen Generationen des Mobilfunks, systematisch durchzuführen und anhand von internationalen Richtlinien und transparenten Methoden zu recherchieren, zu analysieren und zu bewerten.

Das systematische Review behandelt nur den neu eingeführten Frequenzbereich 3–30 GHz, bzw. diese Dissertation die darin enthaltenden Frequenzbändern FR1 und FR2, da bereits viele Studien und Bewertungen internationaler Expertenkommissionen für Frequenzen bestehender Mobilfunkanwendungen in Bezug auf Risiken und gesundheitliche Wirkungen (< 3 GHz) existieren.

Daher soll nach dem PECOS-Schema eine Bewertung der physiologischen, gesundheitsbezogenen, verhaltensbezogenen und therapeutischen Wirkungen (O) der Exposition bei 5G-relevanten HF-EMF (3–4 GHz und 20–30 GHz) (E) bei Säugetieren (P) im Vergleich zu keiner oder geringerer Exposition (C) in experimentellen *in vivo*- und epidemiologischen Studien (S) erfolgen. Die spezifischen Ziele sind die Identifizierung relevanter *in-vivo*-Literatur zu Tieren, die Bewertung des Bias-Risikos für einzelne Studien, die Zusammenfassung der Evidenz für die Korrelation zwischen Exposition und Ergebnis, sowie die Bewertung der Konfidenz in die Gesamtevidenz.

Zudem sollen, wenn möglich, auch mögliche Konsequenzen erläutert werden, die sich bezüglich der medizinischen Praxis, des Alltags und der Forschung ergeben.

3 Methoden

Die vorliegende Dissertation ist Teil eines systematischen Reviews, welches das Ziel hat, die Wirkungen von 5G-relevanten HF-EMF im Frequenzbereich von 3–30 GHz auf Menschen und Säugetiere zu untersuchen. Die Literatursuche sowie die Studienauswahl und Qualitätsbewertung erfolgten zuerst im Rahmen des gesamten systematischen Reviews. Im Anschluss wurde im Rahmen der Dissertation eine Teilanalyse durchgeführt, welche sich speziell mit tierexperimentellen und epidemiologischen Studien bei 3–4 und 20–30 GHz befasst. Dies entspricht in etwa den von der EU festgelegten Pionierbändern von 5G – Frequenzbereich FR1 (3,4–3,8 GHz) sowie FR2 (24,25–27,5 GHz) – welche momentan von hoher Relevanz sind. Damit entspricht die Teilanalyse dem ursprünglich im Studienprotokoll des systematischen Reviews definierten Frequenzbereich (3–4 und 20–30 GHz) und grenzt sich von der später erweiterten Frequenzspanne des Reviews (3–30 GHz) ab. Auch Humanstudien werden im Gegensatz zum systematischen Review aufgrund der geringen Anzahl und schlechten Vergleichbarkeit mit Tierstudien in der Teilanalyse nicht berücksichtigt.

3.1 Problemformulierung nach PECOS

Ziel der Teilanalyse ist somit, *die physiologischen, gesundheitsbezogenen, verhaltensbezogenen und therapeutischen Wirkungen (O) einer Exposition bei 5G-relevanten HF-EMF (3–4 GHz und 20–30 GHz) (E) bei Säugetieren (P) im Vergleich zu keiner oder geringerer Exposition (C) in experimentellen in vivo und epidemiologischen Studien (S) zu bewerten.*

Die Forschungsfrage wurde, wie in Tabelle 1 dargestellt, anhand des PECOS-Schemas formuliert.

Ursprünglich wurde dieses im Jahr 1995 als PICO-Schema ohne weitere Variationen eingeführt (Richardson et al., 1995).

Mit Hilfe der Schlagworte Population (P), Intervention (I), Vergleichsintervention (Comparator, C) und Ergebnis (Outcome, O), sollten klinische Fragestellungen auf relevante Schlüsselwörter heruntergebrochen werden. Im Laufe der Jahre wurden viele verschiedene Variationen des PICO-Schemas entwickelt, um das Schema an verschiedene Studientypen anzupassen. Für Beobachtungstudien wurde die

Intervention (I) durch die Exposition (E) ersetzt (Morgan et al., 2018). Zudem wurde der Ansatz PECO um den Studientyp (Study design, S) zu PECOS erweitert.

Tabelle 1: PECOS Schema zur Formulierung der Forschungsfrage

population	Säugetiere
exposure	5G-relevante HF-EMF (3–4 GHz und 20–30 GHz)
comparator	Keine oder geringere Exposition
outcome	Physiologische, gesundheitsbezogene, verhaltensbezogene und therapeutische Wirkungen
study design	Experimentelle in vivo und epidemiologische Studien

Studien werden in die Teilanalyse aufgenommen, wenn sie die in der Tabelle 1 aufgeführten Einschlusskriterien erfüllen.

Für den Fall, dass Studien Ergebnisse für Bedingungen liefern, die den Kriterien entsprechen, aber auch solche, die den genannten Kriterien nicht entsprechen, werden ausschließlich Ergebnisse berücksichtigt, die den Bedingungen entsprechen.

Genauere Ein-und Ausschlusskriterien für das systematische Review s.u. in Kapitel 3.5.

3.2 Studienprotokoll und Änderungen

Zur Festlegung der Methodik wurde vor Beginn des systematischen Reviews ein Studienprotokoll erstellt (Anhang 1).

Das Studienprotokoll richtet sich nach dem Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses Protocols(PRISMA-P) Statement zur Protokollerstellung für systematische Reviews (Moher et al., 2015). Das gemeinsame systematische Review selbst wurde nach den PRISMA-Richtlinien erstellt (Page et al., 2021).

Die Studienqualität und das Risiko einer Verzerrung (Bias) wurde anhand der überarbeiteten Version des Office of Health Assessment and Translation (OHAT) Handbuchs bewertet, um Transparenz und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten (NTP, 2019).

Die von den Expert*innen des OHAT entwickelte standardisierte Vorgehensweise von systematischen Reviews ist neben Expertenurteilen ein wichtiger Bestandteil einer evidenzbasierten Entscheidungsfindung. Die Vorgehensweise des OHAT ist in Abbildung 3 grafisch dargestellt.

Gegründet wurde OHAT vom National Toxicology Program (NTP) und dem National Institute of Enviromental Health Sciences. Das OHAT bewertet verschiedene umweltmedizinisch relevante Substanzen hinsichtlich ihrer potenziellen gesundheitsschädlichen Wirkung. Auf der Grundlage diese Bewertungen folgt anschließend eine Stellungsnahme (NTP-Level of Concern (LoC)), ob die bewerteten Stoffe aufgrund der aktuellen Expositionswerte als besorgniserregend für Menschen anzusehen sind.

Seit Beginn der Erforschung zur Methodik eines systematischen Reviews durch OHAT im Jahr 2011 konnte somit die Transparenz des Prozesses sowie die Beständigkeit der Methoden und die Effizienz bei der Ergebnissynthese- und Zusammenfassung erhöht werden (Birnbaum et al., 2013).

Diese Vorgehensweise wurde erstmals 2015 als Handbuch veröffentlicht und 2019 aktualisiert, entwickelt primär für randomisierte kontrollierte Studien. Viele Aspekte bereits bestehender Methoden und Handlungsempfehlungen systematischer Reviews, z.B. der Cochrane-Collaboration (Higgins et al., 2023), des Navigation Guide (P. I. Johnson et al., 2014; Koustas et al., 2014; Woodruff & Sutton, 2014), der GRADE-Arbeitsgruppe (Balshem et al., 2011; Granholm et al., 2019) und anderer, wurden als Grundlage verwendet.

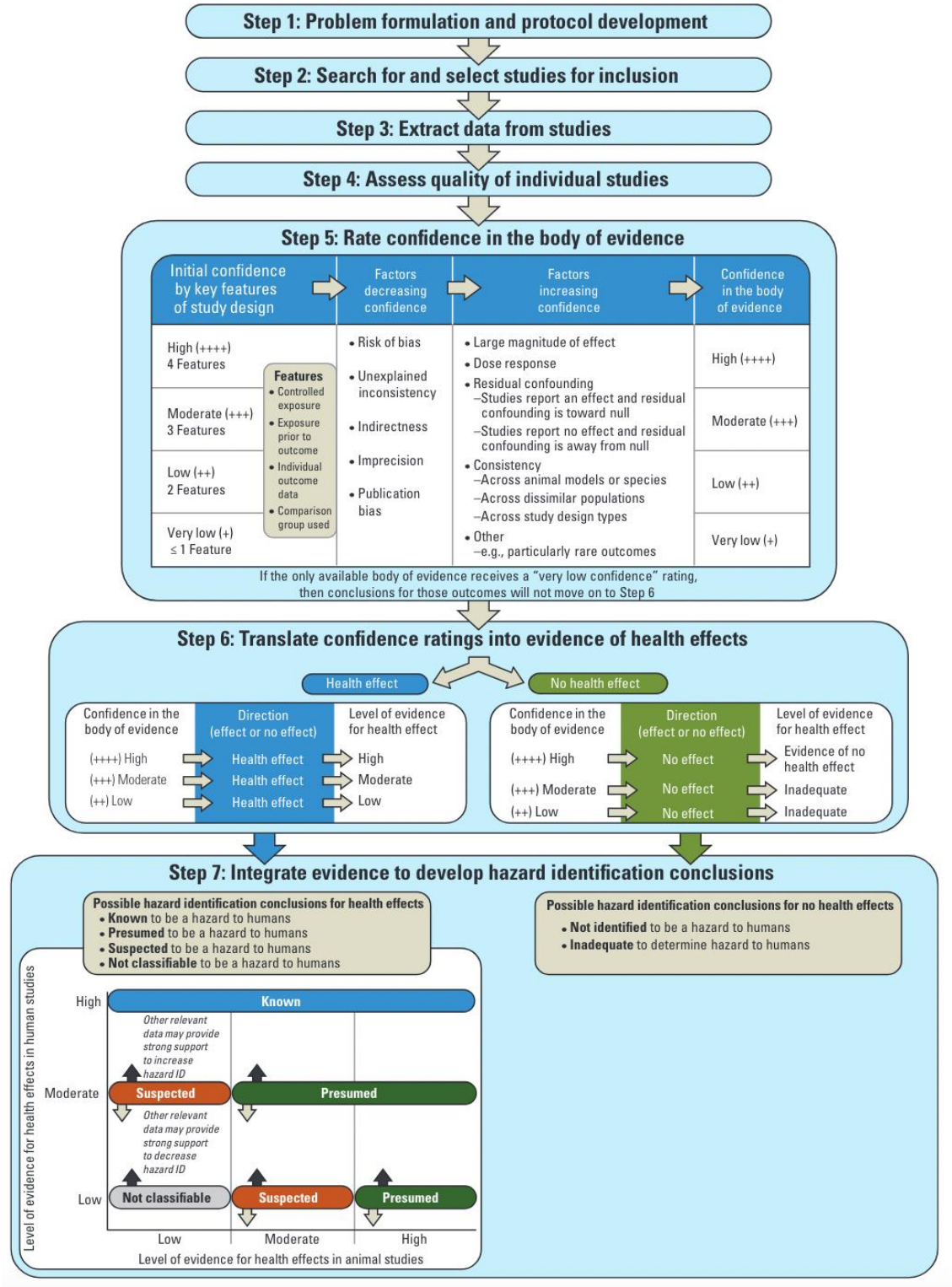


Abbildung 3: Vorgehensweise nach OHAT für systematische Reviews, aus (Rooney et al., 2014)

Protokolländerungen:

Der Frequenzbereich wurde für die Literatursuche des systematischen Reviews von 3–4 und 20–30 GHz auf 3–30 GHz ausgeweitet, um mehr Studien mit einbeziehen zu können.

Zudem wurden Querschnittsstudien ausgeschlossen, da der Nachweis kausaler Effekte aufgrund der fehlenden Zeitbezogenheit schwierig ist. Auch wurden Studien, in welchen die Exposition des Individuums nicht genauer untersucht wurde, ausgeschlossen.

3.3 Registrierung bei Prospero

Das Studienprotokoll wurde bei PROSPERO (internationales prospektives Register für systematische Reviews) am 20.11.2022 unter der Identifikationsnummer CRD42022374434 registriert und ist online vorzufinden (https://www.crd.york.ac.uk/prospero/display_record.php?ID=CRD42022374434).

3.4 Literatursuche

3.4.1 Datenbanken und Suchstrategie

Die Literaturrecherche erfolgte in folgenden Datenbanken:

- PubMed https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov
- Web of Science https://www.webofscience.com
- EMF-Portal https://www.emf-portal.org

Das EMF-Portal wird vom Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu) betrieben und ist weltweit die umfassendste wissenschaftliche Literaturdatenbank zu biologischen und gesundheitlichen Wirkungen nicht-ionisierender elektromagnetischer Strahlung (Frequenzbereich von 0–300 GHz). Es umfasst somit EMF-relevante Artikel aus dem wichtigsten internationalen Literaturdatenbanken.

Die Suchstrategie wurde auf Grundlage verschiedener Aspekte entwickelt: der langjährigen Erfahrung des femu in der Literaturrecherche für das EMF-Portal, früherer systematischer Reviews des femu zu EMF-relevanten Themen, sowie den systematischen Review-Protokollen, die von der WHO in Auftrag gegeben wurden (siehe Kapitel 1). Die Suche nach Tierstudien mit Säugetieren erfolgte auf Basis des Suchfilters für Tierstudien des NTP (NTP, 2015b). Es erfolgte keine Beschränkung bezüglich des Veröffentlichungsdatums. Es wurden nur Studien mit einem durchlaufenen Peer-Review Prozess in deutscher und englischer Sprache in das systematische Review aufgenommen. Die Suche nach relevanter Literatur in verschiedenen Datenbanken wurde ohne zeitliche Begrenzung durchgeführt, um die Suchstrategie zu kalibrieren. Die Ergebnisse der Suche wurden mit dem Inhalt von 41 „Kernstudien“ verglichen, welche

zuvor für das Thema des systematischen Reviews als relevant identifiziert und dem Review von Simkó & Mattsson (Simkó & Mattsson, 2019) entnommen wurden. Da bei der Suche 100 % der Studien übereinstimmten, konnte unsere Suchstrategie validiert werden.

Die Suche wurde erstmals im November 2022 zu Beginn der Arbeit an dem Review durchgeführt und im August 2023 direkt vor der Datenanalyse wiederholt, um relevante Studien, welche erst im Zeitraum des Screening-Prozesses veröffentlicht wurden, noch einschließen zu können und somit ein Review mit einer möglichst aktuellen Suche zu gewährleisten.

3.4.2 Wahl der Suchbegriffe

Die Suchbegriffe wurden entsprechend angepasst, um ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Präzision und Vollständigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Anzahl der Schlüsselwörter wurde durch ein manuelles Trial-and-Error-Verfahren reduziert, indem einzelner Schlüsselwörter entfernt wurden. Dabei wurde geprüft, ob die Trefferanzahl reduziert wurde oder nicht. Alle Suchbegriffe, die keine Veränderung in der Suche bewirkten, wurden entfernt.

Im EMF-Portal wurden folgende Punkte für die Suche ausgewählt: "experimentelle Studien", "epidemiologische Studien" und "medizinische Anwendungen" als Themen, sowie "Hochfrequenz (≥ 10 MHz)" und "Mobilfunk" als Frequenzbereiche. Die Suche erfolgte ohne Verwendung weiterer Suchbegriffe oder Einschränkung des Zeitraums.

Die Suche in PubMed und dem Web of Science beruhte wiederum auf einer Titel- und Abstract-Suche mit Verwendung expositionsbezogener Suchbegriffe (z.B. “millimeter wave“ oder “5G“), kombiniert mit relevanten Spezies (z.B. “human“ oder “hamster“). Artikel, welche irrelevante Schlüsselbegriffe enthielten (z. B. "nomophobia"), wurden ausgeschlossen.

Im Anhang des Studienprotokolls findet sich die ausführliche Liste der Suchstrings.

3.4.3 Suche nach zusätzlichen Studien

Im OHAT-Handbuch wird neben der systematischen Suche in Datenbanken die Suche in anderen Quellen empfohlen. Diese kann beispielsweise in den Literaturverzeichnissen eingeschlossener Studien sowie auch in sogenannter „grauer Literatur“ (nicht

kommerziell veröffentlichte oder öffentlich zugängliche Publikationen) erfolgen (NTP, 2019).

Im vorliegenden Review wurden zusätzliche Studien über retrospektive Zitationsanalysen aller in das Review aufgenommenen Publikationen sowie relevanter Reviews gesucht. Die retrospektiven Zitationsanalysen wurden manuell durchgeführt.

3.5 Auswahl der Studien für das systematische Review

Die Referenzverwaltung erfolgte mithilfe des Literaturverwaltungsprogramms Zotero.

Alle identifizierten Publikationen wurden in die Anwendung Covidence importiert (https://www.covidence.org). Covidence ist eine seit 2014 bestehende Webanwendung für systematische Reviews. Sie wird weltweit von den führenden Universitäten sowie Krankenhäusern und staatlichen Organisationen verwendet. Duplikate wurden nun durch vorhandene Funktionen entfernt. Im Anschluss wurden alle potenziell relevanten Publikationen der systematischen Suche in zwei Schritten überprüft.

Hierbei führten jeweils 2 unabhängige Autor*innen den 1. und 2. Schritt durch.

Bei Uneinigkeit erfolgte in beiden Schritten eine gemeinsame Entscheidung beider Autor*innen über den Ein- oder Ausschluss der betroffenen Publikation. Falls keine Einigung möglich war oder Unsicherheiten bestanden, wurde ein/e weiterer Autor*in miteinbezogen.

Das Screening des Titels/Abstracts als auch des Volltextes, sowie auch die spätere Datenextraktion und Bewertung der Studienqualität erfolgte durch Lambert Bodewein (LB), Dagmar Dechent (DD), Sarah Driessen (SD), Tanja Edmonds (TE) und Philine Johanna Scheelhaase (PJS) in Teams jeweils unanhängig von dem/der Partner*in. Die Bewertung der Studienqualität erfolgte zusätzlich durch Gernot Schmid (GS). Unsicherheiten insbesondere der Expositionsbeurteilung und des Versuchsaufbaus wurden mit Gernot Schmid (GS) und Pia Schneeweiss (PS) besprochen.

3.5.1 Titel- und Abstract-Screening (1.Schritt)

Der Auswahlprozess begann mit dem Titel und Abstract Screening. Die Entscheidung über den Ein-oder Ausschluss der Studie trafen beide Autor*innen jeweils unabhängig voneinander.

Die Ein-und Ausschlusskriterien für die Aufnahme bzw. den Ausschluss von Studien sind im Folgenden in Tabelle 2 dargestellt und waren sowohl im Abstract- als auch im Volltextscreening folgende:

Arten der Population

Als Studienpopulationen wurden in das systematische Review zunächst die Allgemeinbevölkerung sowie berufstätige Personen eingeschlossen. Es gab hier keine Einschränkung bezüglich individueller Merkmale wie zum Beispiel Geschlecht oder Alter. Nicht-menschliche Säugetiere stellen aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit bei der Vorhersage des Gesundheitsrisikos für den Menschen ein beliebtes toxikologisches Modell dar (NTP, 2019) und wurden daher in Übereinstimmung mit den von der WHO in Auftrag gegebenen Reviews ins Review aufgenommen (Benke et al., 2024; Bosch-Capblanch et al., 2024; Cordelli et al., 2023, 2024; E. E. Johnson et al., 2024; Karipidis et al., 2024, 2025; Kenny et al., 2024; Mevissen, Ducray, et al., 2025; Meyer et al., 2024; Pophof et al., 2024; Röösli et al., 2024). Auch hier gab es keine Einschränkung bezüglich der Lebensstadien (einschließlich *in utero*, peripubertär und adult), der Art oder des Geschlechts. Ausgeschlossen wurden jegliche *in-vitro*- oder *in-silico*-Studien.

Arten der Exposition

Zunächst sollten nur Studien im Bereich von 3–4 und 20–30 GHz in das Review eingeschlossen werden. Da außerhalb von Europa im Bereich von 3–30 GHz auch andere Frequenzen, wie z.B. 4,9 GHz in China (European 5G Observatory, 2023), benutzt werden und innerhalb des Frequenzbereiches 3–30 GHz eine ähnliche physikalische Wirkung zu erwarten ist, wurde in dem bei PROSPERO eingereichten Protokoll festgelegt, dass der untersuchte Frequenzbereich (**e**xposure) gegebenenfalls auf 3–30 GHz erweitert wird.
Dies war der Fall, weshalb eine erneute Suche mit anschließender Durchführung aller weiteren Schritte (Abstract- und Volltextscreening, Extraktion) erfolgte.
Eingeschlossen in das Review wurden also Studien mit Expositionen im 5G-relevanten HF-EMF-Bereich zwischen 3–30 GHz, für die hier vorliegende Dissertation wurden anschließend jedoch wie beschrieben nur relevante Studien der ursprünglichen Suche zu 3–4 und 20–30 GHz einbezogen.

Die Studien wurden nur berücksichtigt, wenn mindestens einer der folgenden Deskriptoren für die Exposition verwendet wurde:

A) Körper-/Gewebe-interne Expositionsmetriken, gemessen oder berechnet für die jeweiligen Versuchsbedingungen:
- SAR [W/kg]
- SA [J/kg]
- induzierte elektrische Feldstärke [V/m]
- interne magnetische Feldstärke [A/m]

B) Externe oder interne Expositionsmetriken des Körpers/Gewebes, die die oberflächliche Absorption bei Frequenzen über 6 GHz beschreiben und für die Versuchsbedingungen gemessen oder berechnet wurden:
- einfallende Leistungsflussdichte [W/m2]
- einfallende Energiedichte [J/m²]
- transmittierte (absorbierte) Leistungsflussdichte [W/m²]
- transmittierte (absorbierte) Energiedichte [J/m²]

C) Externe Expositionsmetriken des Körpers/Gewebes (an der Stelle des exponierten Körpers):
- einfallende elektrische Feldstärke [V/m]
- einfallende magnetische Feldstärke [A/m]
- einfallende Leistungsflussdichte [W/m²]

Alternativ wurden für epidemiologische Studien auch die Dauer der Nutzung wie z. B. die kumulativen Stunden der Nutzung von HF-emittierenden Geräten oder für Fernfeldbedingungen die kumulative Lebenszeitexposition, die für die Person auf der Grundlage von gemessenen HF-EMF am Arbeitsplatz oder zu Hause und der Expositionsdauer berechnet wurde, akzeptiert.

Ausgeschlossen wurden Studien, welche Frequenzbereiche ober- oder unterhalb des relevanten Bereichs untersuchten. Ebenso wurden Studien ausgeschlossen, wenn die Anwendung von HF-EMF darin bestand Gewebe > 42 °C und somit über physiologische Werte hinaus zu erhitzen und zu schädigen/zerstören oder ausschließlich Ko-Expositionen untersuchten. Zudem wurde Kontaktstrom als Exposition ausgeschlossen.

Auch wurden Querschnittstudien aufgrund der Schwierigkeit wegen des fehlenden Zeitbezuges kausale Effekte nachzuweisen ausgeschlossen. Studien ohne eine mögliche Abschätzung individueller Exposition, beispielsweise ökologische Studien, wurden ebenfalls ausgeschlossen. Auch bei epidemiologischen Studien, welche zum Beispiel nur die selbstgeschätzte Exposition bei Basisstationen als einzige Metrik verwendeten wurden aufgrund der schlechten Korrelation mit der persönlichen Exposition nicht eingeschlossen.

Arten der Vergleichsexposition

Berücksichtigt wurden Studien, welche eine Kontrolle ohne Exposition (d.h. keine Exposition über das Hintergrundniveau hinaus) oder eine Kontrolle mit einer Expositionsbedingung auf niedrigerem Niveau zeigten. Idealerweise in experimentellen Studien sind Schein-Expositionen, d.h. ähnliche/möglichst identische Bedingungen zu den exponierten Tieren abgesehen von der Exposition an sich. Andere Expositionen wie beispielsweise Chemikalien oder eine Anästhesie oder Manipulationen wie beispielsweise Lärm durften in der Kontrollbedingung nicht vorhanden sein, wenn diese in der Expositionsgruppe nicht vorhanden waren. Käfigkontrollen waren erlaubt.

Arten von Ergebnissen

Da abgesehen von der thermischen Wirkung kein weiterer biologischer Mechanismus für HF-EMF Wirkungen bekannt ist, wurden alle berichteten Wirkungen eingeschlossen: potenziell schädliche, therapeutische/nützliche Wirkungen sowie auch Wirkungen von unklarer Relevanz. Diese konnten gesundheitsbezogene (z. B. Augenschäden, Krebs), physiologische (z. B. Gehirnaktivität), verhaltensbezogene (z. B. motorische Aktivität oder Angst) oder therapeutische Endpunkte beinhalten.

Arten von Studien

Tierexperimentelle Studien (experimental animal studies, EA), einfach oder doppelverblindete kontrollierte Humanstudien (human controlled trials, HCT) sowie epidemiologische Kohorten (epidemiological cohort, Co) und Fall-Kontroll-Studien (case-control, CaCo) wurden in das systematische Review einbezogen. Es wurden wie bereits kurz beschrieben nur Artikel in englischer und deutscher Sprache mit Peer-

Review-Prozess aufgenommen, es gab keine Einschränkung bezüglich des Veröffentlichungsdatums.

Ausgeschlossen wurden Reviews, Meta-Analysen, Kommentare, Stellungnahmen, Leitartikel, Forschungsberichte, Konferenz-Abstracts, dosimetrische Studien, Fallstudien, Studien zu elektromagnetischen Störungen bei Implantaten sowie Studien ohne Peer-Review.

Tabelle 2*:* Ein-und Ausschlusskriterien für das systematische Review nach PECOS

PECOS	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Population	- Angehörige der Allgemeinbevölkerung und berufstätige Personen (keine Einschränkung hinsichtlich Geschlecht, Alter oder anderer individueller Merkmale) * - Säugetiere (keine Einschränkung hinsichtlich Art, Geschlecht, Alter oder anderer individueller Merkmale)	- *In-vitro*-Studien (Studien an Zellen, isolierten Organen und Geweben) - *In-silico*-Studien
Exposition	- 5G-relevante HF-EMF (3–30 GHz) auf jedem Expositionsniveau, das durch gemessene oder berechnete Metriken unterstützt wird ** - Expositionssurrogate für die Dauer der Nutzung, wie z. B. kumulative Stunden der Nutzung von HF-emittierenden Geräten oder kumulative lebenslange Exposition, die für die Person auf der Grundlage von gemessenen HF-EMF am Arbeitsplatz oder zu Hause und der Expositionsdauer berechnet wird	- Statische oder extrem niederfrequente magnetische und/oder elektrische Felder - HF-EMF < 3 GHz oder > 30 GHz** - HF-EMF mit dem alleinigen Ziel, Gewebe deutlich über physiologisch relevante Werte (> 42°C) zu erhitzen und

		Gewebe zu schädigen oder zu zerstören - Kontaktstrom - Ko-Expositionen - Nicht spezifizierte Expositionsmetriken
Vergleichsexposition	- Nicht-exponierte Kontrollbedingung (d. h. keine Exposition über das Hintergrundniveau hinaus) oder eine Expositionsbedingung mit geringerer Belastung	- Keine Kontrollgruppe oder unklare Bedingungen
Ergebnis	- Alle gesundheitsbezogenen (z. B. Augenschäden, Krebs), physiologischen (z. B. Gehirnaktivität), verhaltensbezogenen (z. B. motorische Aktivität oder Angst) oder therapeutischen Endpunkte	-keine
Studiendesign	- Tierexperimentelle Studien (EA) - Kontrollierte Studien am Menschen (einfach- oder doppelblind)(HCT)*** - Epidemiologische Kohorten (Co)- und Fall-Kontroll-Studien (CaCo)	- Reviews und Meta-Analysen - Kommentare, Stellungnahmen, Leitartikel - Forschungsberichte - Konferenz-Abstracts - Dosimetrische Studien - Fallstudien - Studien zu elektromagnetischen Störungen bei Implantaten

		- Studien ohne Peer-Review

* in der Teilanalyse nicht berücksichtigt

** in der Teilanalyse nur ursprünglich festgelegten Frequenzbereich von 3–4 und 20–30 GHz berücksichtigt

***in der Teilanalyse nicht berücksichtigt

3.5.2 Volltext-Screening (2.Schritt)

Die nach dem ersten Screening eingeschlossenen Studien wurden nun einem Volltextscreening unterzogen. Auch hier erfolgte der Einschluss erneut über die oben genannten Einschlusskriterien, die anhand des PECOS-Schemas vorab erstellt wurden.

3.5.3 Studienselektion für die Teilanalyse des Reviews

Im Folgenden wurden für die Teilanalyse Studien aus dem systematischen Review selektiert, welche folgende Kriterien erfüllten:

- Tierexperimentelle Studien
- Exposition im Frequenzbereich 3–4 und 20–30 GHz

Studien, welche andere Frequenzbereiche oder Populationen untersuchten, wurden ausgeschlossen.

3.6 Datenextraktion

Die Extraktion der Daten der final eingeschlossenen Studien wurden erneut von zwei Autor*innen unabhängig extrahiert. Anschließend wurden beide Extraktionen in einem Consensus bei Covidence miteinander verglichen und die Autor*innen entschieden bei jedem einzelnen Extraktionselement zusammen, welche Daten vollständig und korrekt extrahiert wurden und einigten sich auf eine gemeinsame Antwort.

Die extrahierten Daten umfassen bibliografische Daten, Erklärung über konkurrierende Interessen, Finanzierung, Design der Studie, Spezies inkl. Geschlecht und Alter, Anzahl/Größe der Gruppen, versch. Expositionsparameter (bspw. Dauer und Frequenz), versch. Endpunkte der Studie sowie ihre Methoden, Ergebnisse und die Schlussfolgerung der Autor*innen.

Eine genaue Tabelle mit den extrahierten Studienparametern findet sich im Anhang des Studienprotokolls.

3.7 Bestimmung der internen Validität

Die Qualitätsbewertung der eingeschlossenen Studien erfolgte anhand der Empfehlung des OHAT des National Toxicology Program (NTP, 2015a, 2019).

Das OHAT Risk-of-Bias (RoB) Rating Tool for Human and Animal Studies wurde konzipiert, um jede Studie in Hinblick auf ihre Konzeption und Durchführung zu bewerten, welche wiederrum die Glaubwürdigkeit des Zusammenhangs zwischen Exposition und Ergebnis beeinflussen kann (Higgins et al., 2023; NTP, 2015a). Dies erfolgt durch eine Reihe von Leitfragen des OHAT, für die Beantwortung dieser eine genaue Anleitung zur Verfügung steht (NTP, 2015a).

3.7.1 Anpassung der Bewertungsinstrumente auf die eigene Fragestellung

Der Ansatz des OHAT wurde modifiziert verwendet und hat sich bereits in anderen systematischen Übersichtsarbeiten als geeignet gezeigt (Bodewein et al., 2022; Petri et al., 2017). Die ursprünglichen Leitfragen sowie die Domänen sind in nachfolgender Abbildung 4 zusammen mit Ihrer Anwendbarkeit auf diverse Studientypen dargestellt.

Bias Domains and Questions	**Experimental Animal[1]**	**Human Controlled**	**Cohort**	**Case-control[3]**	**Cross-sectional**	**Case Series**
Selection Bias						
1. Was administered dose or exposure level adequately randomized?	X	X				
2. Was allocation to study groups adequately concealed?	X	X				
3. Did selection of study participants result in appropriate comparison groups?			X	X	X	
Confounding Bias						
4. Did the study design or analysis account for important confounding and modifying variables?			X	X	X	X
Performance Bias						
5. Were experimental conditions identical across study groups?	X					
6. Were the research personnel and human subjects blinded to the study group during the study?	X	X				
Attrition/Exclusion Bias						
7. Were outcome data complete without attrition or exclusion from analysis?	X	X	X	X	X	
Detection Bias						
8. Can we be confident in the exposure characterization?	X	X	X	X	X	X
9. Can we be confident in the outcome assessment?	X	X	X	X	X	X
Selective Reporting Bias						
10. Were all measured outcomes reported?	X	X	X	X	X	X
Other Sources of Bias						
11. Were there no other potential threats to internal validity (e.g., statistical methods were appropriate and researchers adhered to the study protocol)?	X	X	X	X	X	X

[1]Experimental animal studies are controlled exposure studies. Non-human animal observational studies could be evaluated using the design features of observational human studies such as cross-sectional study design.
[2]Human Controlled Trials (HCTs): studies in humans with a controlled exposure, including Randomized Controlled Trials (RCTs) and non-randomized experimental studies
[3]Cross-sectional studies include population surveys with individual data (e.g., NHANES) and population surveys with aggregate data (i.e., ecological studies).

Abbildung 4: OHAT Risk of Bias Tool; aus dem OHAT-Handbuch (NTP, 2019)

Folgende Anpassungen der Fragen wurden vorgenommen:

Frage 1 und 2: Da OHAT keine Angabe zum Verfahren mit Cross-Over-Studien macht, werden wie im Protokoll beschrieben Bewertungskriterien für Cross-Over-Studien einbezogen.

Frage 4: Da die Endpunkte nicht eingeschränkt werden, musste folgende Fragestellung ebenfalls angepasst werden. Daher werden hier, entgegen der Empfehlung des OHAT-Tools, dass bei der Entwicklung des Studienprotokolls Störfaktoren festgelegt werden müssen (Confounding Bias), diese nicht festgelegt sowie auch nur zwei Risk-of-Bias-Kategorien (Co, CaCo) hier verwendet.

Frage 5: Dieses Kriterium ist relevant für eine gut kontrollierte Humanstudie, da systematische Unterschiede zwischen den Bedingungen der EMF-Exposition und der Schein-Exposition die Ergebnisse stark beeinträchtigen können. Daher muss diese Frage hier für Tier-als auch Humanstudien definiert und angewendet werden.

Frage 8: Hier wurden Details zu den Merkmalen der Exposition ergänzt, um die Frage zu spezifizieren.

Die Anpassungen der Fragen finden sich ebenfalls im Studienprotokoll.

Somit wurden folgende Fragen von zwei Autor*innen unabhängig voneinander beantwortet:

1. Wurde das verabreichte Expositionsniveau angemessen randomisiert? (EA*, HCT**)
2. Wurde die Zuweisung zu den Studiengruppen angemessen verblindet? (EA, HCT)
3. Wurden durch die Auswahl der Studienteilnehmer geeignete Vergleichsgruppen gebildet? (Co***, CaCo****)
4. Wurden im Studiendesign und in der Analyse wichtige Confounder und andere Einflussfaktoren berücksichtigt? (Co, CaCo)
5. **Waren die Versuchsbedingungen in allen Studiengruppen identisch? (EA, HCT)**
6. Wurden das Studienpersonal und die Versuchspersonen während der Versuche für die Exposition verblindet? (EA, HCT)
7. Waren die Ergebnisdaten vollständig, ohne Verlust oder Ausschluss von der Analyse? (EA, HCT, Co, CaCo)
8. **Ist die Charakterisierung der Exposition ausreichend? (EA, HCT, Co, CaCo)**
9. **Können wir der Auswertung der Ergebnisse trauen? (EA, HCT, Co, CaCo)**
10. Wurden alle gemessenen Ergebnisse berichtet? (EA, HCT, Co, CaCo)

11. Gab es andere potenzielle Bedrohungen für die interne Validität? (EA, HCT, Co, CaCo)

*EA=tierexperimentelle Studie **HCT= kontrollierte Humanstudien ***Co=epidemiologische Kohortenstudien ****CaCo= Fall-Kontroll Studien

Wie in der aufgeführten Abbildung 5 zu sehen, standen folgende Antwortmöglichkeiten standen zur Verfügung:

++	***Definitely Low*** *risk of bias*: There is direct evidence of low risk of bias practices (May include specific examples of relevant low risk of bias practices)
+	***Probably Low*** *risk of bias*: There is indirect evidence of low risk of bias practices **OR** it is deemed that deviations from low risk of bias practices for these criteria during the study would not appreciably bias results, including consideration of direction and magnitude of bias
- NR	***Probably High*** *risk of bias*: There is indirect evidence of high risk of bias practices **OR** there is insufficient information (e.g., not reported or "NR") provided about relevant risk of bias practices
--	***Definitely High*** *risk of bias*: There is direct evidence of high risk of bias practices (May include specific examples of relevant high risk of bias practices)

Abbildung 5: Antwortmöglichkeiten der Leitfragen des OHAT-Tools; aus (NTP, 2019)

Anschließend wurde jede Studie anhand der Beantwortung der Leitfragen in eine Qualitätskategorie eingeordnet (1st-, 2nd-, 3rd-tier). 1st-tier-Studien sind von hoher Qualität, 2nd-tier-Studien von moderater und 3rd-tier-Studien von niedriger Qualität. Dabei erhalten drei besonders kritische Kriterien bezüglich des Bias-Risikos, auch Schlüsselkriterien genannt, das größte Gewicht. Laut OHAT-Handbuch muss die Auswahl der Schlüsselkriterien studienspezifisch getroffen werden. Bei experimentellen Studien sind die Fragen nach 1. Vertrauen in die Expositionscharakterisierung, 2. Vertrauen in die Beurteilung des Outcomes sowie 3. identische Versuchsbedingungen der Studiengruppen stark gewichtet. (3) bezieht sich hier auf die Scheinexposition, welche bei experimentellen EMF-Studien hochrelevant ist. Bei epidemiologischen Studien sind neben der identischen 1. sowie 2. Frage noch als (3) Confounder und andere Einflussfaktoren relevant. Andere Kriterien werden weniger stark in der Beurteilung gewichtet. Weitere Details und Instruktionen zur Beurteilung der Fragen sind im OHAT-Handbuch aufgeführt (NTP, 2019).

3.8 Synthese der Studienergebnisse

Die einbezogenen Studien wurden gruppiert und geordnet in Tabellen. Hierzu wurden die Studien je nach untersuchtem Thema in Themengebiete unterteilt. Anschließend wurde unter Beibehaltung der Themengebiete eine Tabelle für Studien im FR1- und eine Tabelle für Studien im FR2-Frequenzbereich erstellt (Anhang 2 und 3).

Grundsätzlich ist sowohl eine narrative, qualitative Ergebnisanalyse als auch, bei hinreichender Homogenität, eine Metaanalyse als quantitative Analyse durchzuführen. Bestimmt wird die Art der Analyse anhand der Heterogenität der eingeschlossenen Studien. Aufgrund der fehlenden Einschränkung hinsichtlich des Ergebnisses (**o**utcome) wird hier eine hohe Heterogenität erwartet. Ist Heterogenität in einem relevanten Maß vorhanden, muss eine statistische Auswirkung sinnvoll abgewogen werden (Cooper, 2017; Egger, 2001; Siddaway et al., 2019). Bei starker Heterogenität sollte nicht die Metaanalyse, sondern die qualitative Auswertung der Ergebnisse bei systematischen Reviews im Vordergrund stehen (Egger, 2001).

3.8.1 Quantitative Ergebnisauswertung

Sollten ausreichend ähnliche Studien vorhanden sein, wird für eine bestimmte Kombination an PECOS-Kriterien eine Metaanalyse durchgeführt (z.B. bei gleicher Studienpopulation, Exposition, Ergebnis und Studienart).

Es wurde im Protokoll eine Mindestanzahl von zehn Studien für eine bestimmte Kombination von PECOS Kriterien für eine aussagekräftige Analyse festgelegt (Whaley et al., 2020).

Falls dies eintreffen sollte, werden - wie von den Autor*innen des OHAT-Handbuchs empfohlen – die mittlere Abweichung (MD) oder die mittlere Standardabweichung (SMD) für kontinuierliche Variablen und für dichotome Variablen Odds Ratios (OR) oder Risk Ratios (RR) als Effektgrößen verwendet (Shamseer et al., 2015; Vesterinen et al., 2014). Die quantitative Auswertung/Metaanalyse basiert auf einem „random effects model“, da dies in Anbetracht der zu erwartenden Unterschiede in den verschiedenen Studien angebracht ist.

3.8.2 Qualitative Ergebnisauswertung

Wie vom NTP vorgeschlagen, wird - insbesondere bei nicht möglicher quantitativer Analyse aufgrund der Heterogenität der Studien- eine qualitative, narrative Synthese

durchgeführt. Alle Ergebnisse wurden in die Kategorien „Effekt gefunden“/“kein Effekt gefunden“ übersetzt, welche gemeinsam mit der Studienqualität grafisch dargestellt werden.

Bestimmung der Evidenzqualität

Wie in Kapitel 3.7 beschrieben, wurde die Qualität der einzelnen Studien anhand des Risk of Bias bewertet. Anschließend muss zur Beantwortung der Forschungsfrage die Qualität der Evidenz der Studien ermittelt werden. Die im OHAT-Handbuch aufgeführte Strategie zur Eruierung der Qualität der Evidenz, welche auf dem GRADE Ansatz basiert, bildet die Grundlage für die qualitative Auswertung der Studienergebnisse (Balshem et al., 2011). Diese wird von Rooney und Kolleg*innen genauer beschrieben (Rooney et al., 2014).

In die Evidenzsynthese wurden nur 1st- und 2nd-tier Studien einbezogen. Die Bewertung der Evidenz erfolgt auf Endpunktebene.

Die Studien wurden zunächst nach den wichtigsten Merkmalen des Studiendesigns sowie den untersuchten Parametern gruppiert, jede Gruppe erhielt eine initiale Konfidenzbewertung. Diese initiale Bewertung wird anschließend durch Faktoren, die das Vertrauen in die Ergebnisse erhöhen (z.B. Konsistenz zwischen Studiendesign/Populationen) heraufgestuft und durch Faktoren, die das Vertrauen in die Ergebnisse vermindern (z.B. Bias Risiko) herabgestuft.

Um den Grad des Vertrauens in die Evidenz anzugeben, werden vier Deskriptoren verwendet: „hohes“, „mäßiges“, „geringes“ und „sehr geringes“ Vertrauen.

Hohes Vertrauen: Die tatsächliche Wirkung spiegelt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit in der gefundenen Beziehung wider.

Mäßiges Vertrauen: Die wahre Wirkung kann sich in der gefundenen Beziehung widerspiegeln.

Geringes Vertrauen: Die wahre Wirkung kann sich von der gefundenen Beziehung unterscheiden.

Sehr geringes Vertrauen: Die wahre Wirkung weicht höchstwahrscheinlich von der gefundenen Beziehung ab.

Das Vorgehen ist in der nachfolgenden Abbildung 6 dargestellt:

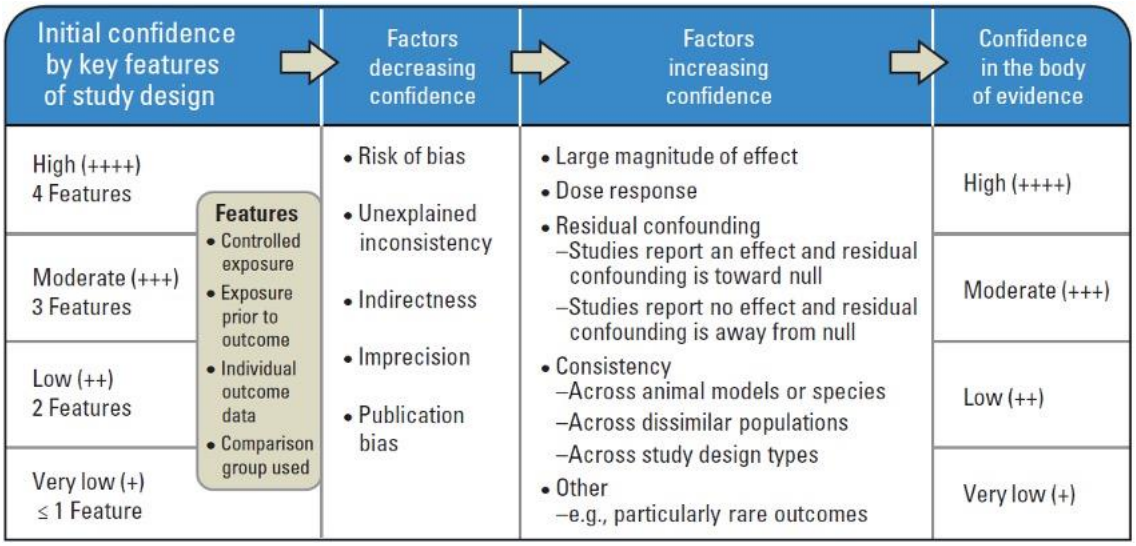


***Abbildung 6**:* Vertrauenswürdigkeit der Evidenz gemäß OHAT-Handbuch, aus (Rooney et al., 2014)

Rückschlüsse auf potenzielle Gesundheitsrisiken

Anschließend wird das Vertrauen in die Evidenz mit der Richtung der Wirkung („gesundheitliche Wirkung“ oder „keine gesundheitliche Wirkung“) kombiniert und folgend in fünf Evidenzqualitätsgrade übersetzt, welche die Evidenz der Exposition auf gesundheitliche Wirkungen beschreiben: „Hoch“, „mäßig“, „gering“, „Hinweise auf keine gesundheitlichen Auswirkungen“ und „unzureichende Evidenz einer gesundheitlichen Wirkung“. Die Evidenzqualitätsgrade „hoch“, „mäßig“ und „gering“ ergeben sich, sofern eine Verbindung zwischen Exposition und gesundheitlichen Wirkungen besteht, direkt aus dem Grad des Vertrauens in die Evidenz. Der Evidenzqualitätsgrad „unzureichende Evidenz einer gesundheitlichen Wirkung“ wurde als Deskriptor festgelegt, wenn nur ein „sehr geringes Vertrauen“ oder „kein Vertrauen“ in die Evidenz festgestellt werden konnte. Der Deskriptor „keine Evidenz einer gesundheitlichen Wirkung“ wird gemäß OHAT verwendet, um zu zeigen, dass die Exposition nicht mit einer gesundheitlichen Auswirkung verbunden ist. Aufgrund der Schwierigkeit nachweisen zu können, dass eine Wirkung nicht vorhanden ist, wird dieser Deskriptor nur dann verwendet, wenn ein hohes Vertrauensmaß in die Evidenz besteht. Dieser Prozess wird ebenfalls von Rooney und Kolleg*innen beschrieben und ist in Abbildung 7 dargestellt:

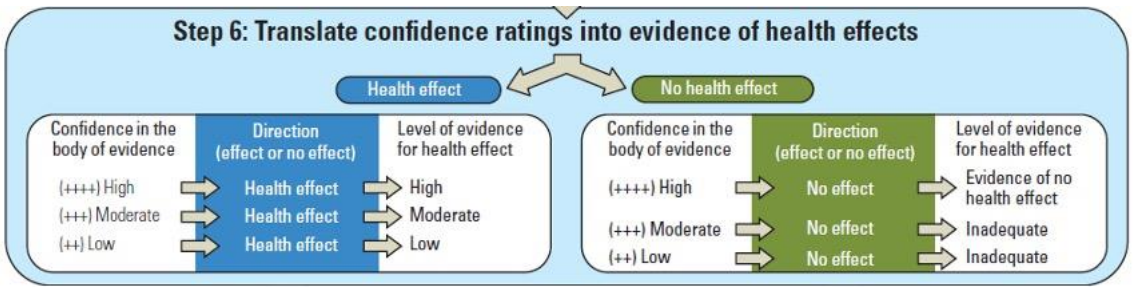


***Abbildung 7**:* Abschätzung von Gesundheitseffekten durch Nutzung der Evidenzbeurteilung, aus (Rooney et al., 2014)

Da hier nur tierexperimentelle Studien einbezogen wurden, entfiel hier die Einordung in eine Gefahrenkategorie wie in Schritt Sieben des OHAT-Handbuchs erläutert (NTP, 2019).

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Studienergebnisse der Teilanalyse vorgestellt.

4.1 Suche und Auswahlprozess: Eingeschlossene Studien

Die systematische Suche nach relevanter Literatur erfolgte gemäß der im Methodenteil beschriebenen Vorgehensweise. Anhand der initialen Suche sowie der späteren aktualisierten Suche und der Analyse von Referenzen, fanden sich in PubMed 21.965 Ergebnisse, im EMF-Portal 15500 Ergebnisse und im Web of Science 8461 Ergebnisse. Aus 45926 Studien verblieben nach dem Entfernen von Duplikaten noch 16338 Studien, welche in den Screening Prozess einflossen.

Das Titel-/Abstract-Screening erfolgte wie beschrieben nach den in Kapitel 3.5 genannten Kriterien durch jeweils zwei Reviewer*innen des Teams. Nach Konsensfindung verblieben 1016 Studien, welche in das Volltextscreening einflossen. Von diesen wurden 909 Studien mit folgenden Gründen ausgeschlossen:

Frequenz nicht relevant, Stromanwendung, Co-Exposition oder Exposition nicht klar (n=760), Studientyp nicht relevant oder Studie nicht auf EMF/Gesundheit bezogen (n=91), keine Kontrolle (n=17), kein Peer-Review (n=13), keine Säugetiere/*In-Vitro*-Studie (n=12), Artikel nicht in englischer oder deutscher Sprache (n=10), HF-EMF zur Erhitzung (> 42 °C) und/oder Zerstörung von Gewebe (n=4), widerrufener Artikel (n=1), nicht verfügbar (n=1). Dabei wurden auch einige Artikel aufgrund mehrerer Ausschlusskriterien ausgeschlossen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde nur der wichtigste Ausschlussgrund in Covidence sowie im Flussdiagramm dokumentiert. Schließlich umfasste das gemeinsame systematische Review 107 Studien. Es konnten keine relevanten epidemiologischen Studien identifiziert werden.

Für die hier vorliegende Dissertation wurden die Studien anschließend in ihre untersuchten Frequenzbereiche sortiert und die Studien mit untersuchten Frequenzen von 3–4 und 20–30 GHz in die Teilanalyse eingeschlossen. Die einzige Humanstudie wurde aussortiert.

Letztendlich wurden somit in die Dissertation 33 Studien eingeschlossen, von denen 28 Studien den Frequenzbereich von 3–4 GHz und 5 Studien den Frequenzbereich von 20–30 GHz untersuchten.

Abbildung 8 zeigt ein modifiziertes Flussdiagramm des Studienauswahlprozesses nach PRISMA-Richtlinien.

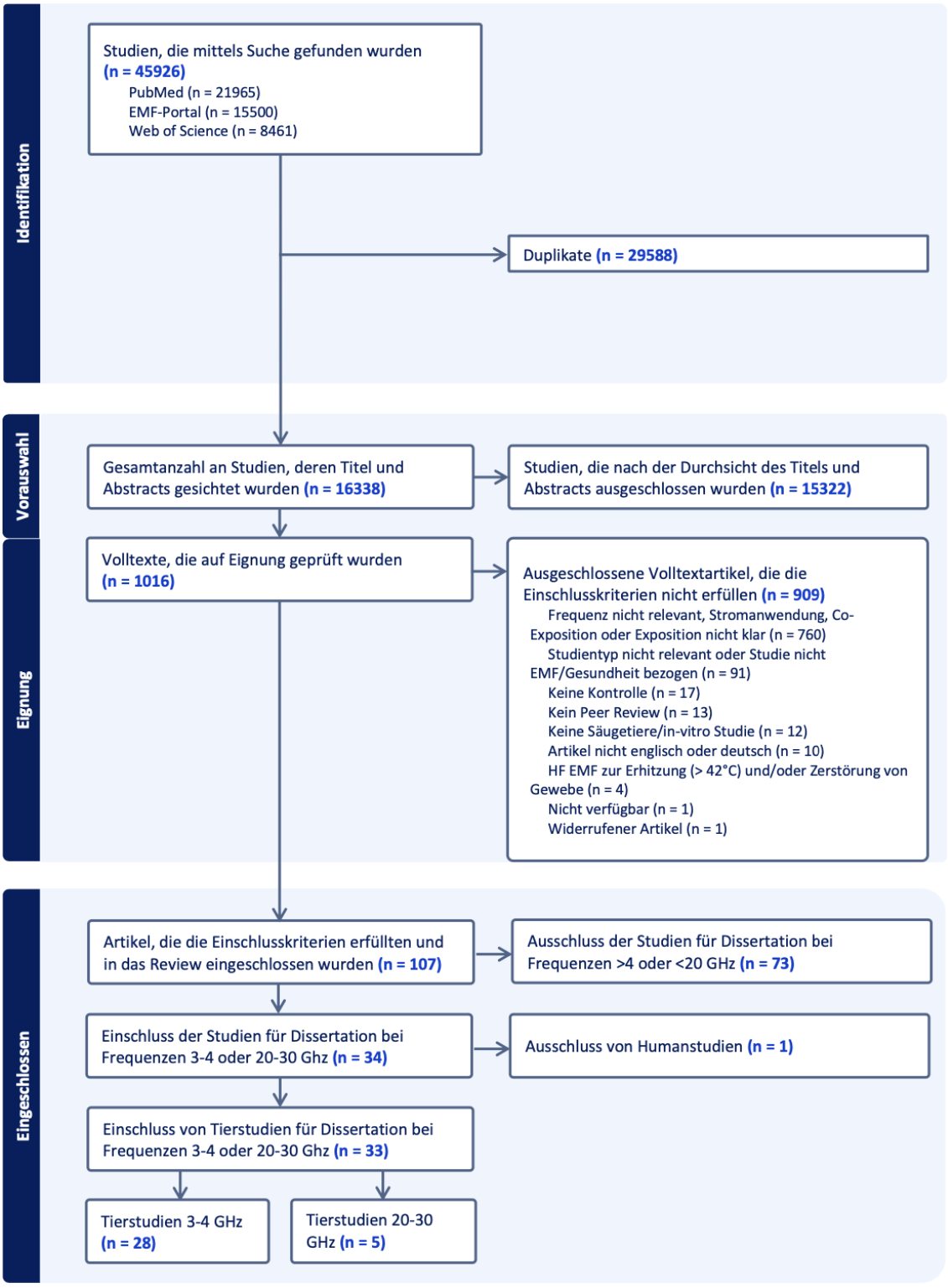


***Abbildung 8**:* Flussdiagramm des Studienauswahlprozesses nach PRISMA-Richtlinien; basierend auf (Moher et al., 2009)

4.2 Bestimmung der internen Validität (Risk of Bias)

Mithilfe des von OHAT empfohlenen und modifiziertem Risk-of-Bias-Tool, wurde anschließend die interne Validität und Qualität aller Studien bewertet.

Von den 33 in dieser Dissertation eingeschlossenen tierexperimentellen Studien waren vier Studien (12 %) (n=3 FR1, n=1 FR2) von hoher Qualität/1st-tier, sieben Studien (21 %) (n=6 FR1, n=1 FR2) von moderater Qualität/2nd-tier und 22 Studien (67 %) (n=19 FR1, n=3 FR2) von niedriger Qualität/3rd-tier.

Methodische Schwächen traten bei einigen der Kriterien besonders häufig auf:

97 % der Studien zeigten bei dem Kriterium „Verblindung der Gruppenzuweisung“ (selection bias) ein wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-) und bei 3 % der Studien ein definitiv hohes Risiko eines Bias (--), da entweder keine Information vorlag, ob eine Verblindung stattgefunden hat oder es sogar direkte Evidenz dafür gab, dass die Gruppenzuweisung nicht verblindet ablief. Auch das Kriterium „Verblindung von Studienpersonal/-teilnehmern“ (performance bias), wurde bei 97 % der Studien mit einem wahrscheinlich oder definitiv hohen Risiko für Bias bewertet.

Hauptschwäche der untersuchten Studien ist somit die fehlende oder mangelhafte Verblindung. Auch die Randomisierung der Exposition (selection bias) wurde bei 85 % der Studien mit einem „wahrscheinlich hohen Risiko eines Bias“ (-) bewertet.

Bei 30 % der Studien und somit am häufigsten wurde das Kriterium „Identische Versuchsbedingungen in allen Gruppen“ (performance bias) mit einem definitiv hohem Bias-Risiko bewertet. Bei weiteren 51,5 % der Studien wurde dieses Kriterium mit einem wahrscheinlich hohen Risiko eines Bias bewertet.

Am zweithäufigsten wurde das Kriterium „Charakterisierung der Exposition“ (detection bias) mit einem definitiv hohen Bias-Risiko bewertet.

Als Teil der Schlüsselkriterien führten diese Bewertungen häufig zu einer Qualitätsabstufung der Studien.

Einen Überblick über die Bewertung des Bias-Risikos sowie der daraus resultierenden Studienqualität findet sich in der folgenden Abbildung 9.

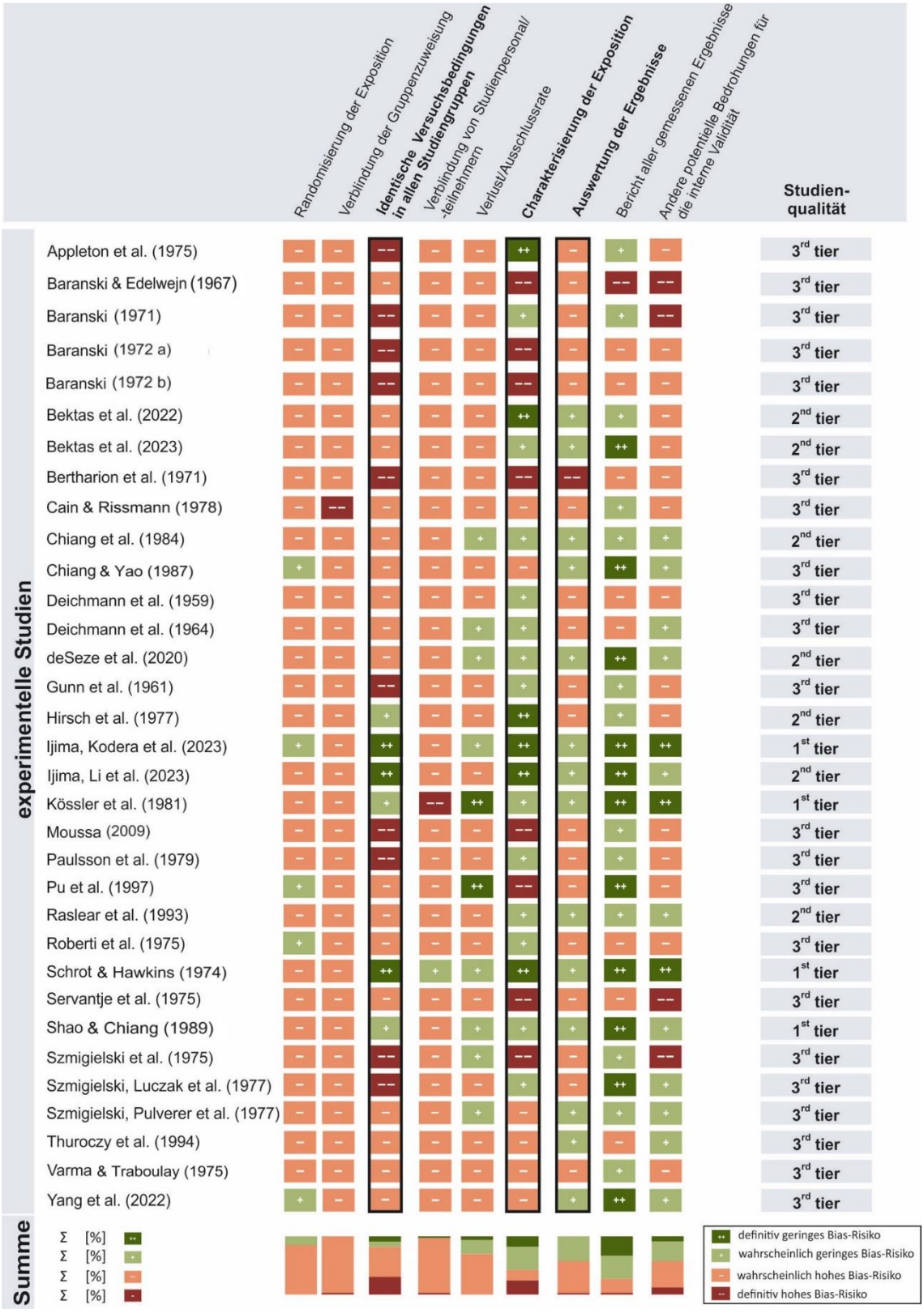


***Abbildung 9**:* Studienüberblick – Bewertung des Risk of Bias nach OHAT. *Die Bewertungen der Kriterien dienten als Basis für die Zuordnung der einzelnen Studien in eine der drei Qualitätskategorien (1st-, 2nd-, 3rd-tier). Die Schlüsselkriterien sind fettgedruckt bzw. schwarz umrandet. Summe (Σ [%]) stellt die Verteilung der 4 Bias-Risiko-Kategorien separat für jedes einzelne Kriterium über alle Studien hinweg in prozentualen Balkenanteilen dar.*

Etwas weniger als die Hälfte der Studien (45 %) wurde ausschließlich über öffentliche Gelder (beispielsweise von Universitäten oder staatlichen Behörden) gefördert. Bei den übrigen Studien war die Förderung nicht genannt oder nicht klar zuzuordnen, weshalb das Bias-Risiko hier nicht quantifizierbar ist.

Bezüglich des CoI der Studienautor*innen wurde nur in 18 % der Studien ein Interessenskonflikt explizit verneint, in 82 % der Studien fehlte jedoch ein Statement zu einem potenziellen CoI; damit ist bei der großen Mehrheit der Studien das Bias Risiko nicht quantifizierbar.

4.3 Synthese der Studienergebnisse: Qualitative Auswertung

Da die Kriterien zur Durchführung einer aussagekräftigen Meta-Analyse nicht zutrafen (siehe Kapitel 3.8.1), wurde, wie im OHAT-Handbuch vorgeschlagen, ausschließlich eine narrative Synthese durchgeführt.

Die 33 eingeschlossenen Studien wurden für eine klarere Struktur, soweit möglich und sinnvoll, anhand der schwerpunktmäßig untersuchten Endpunkte in Themengebiete unterteilt. Aufgrund von starker Heterogenität der Studien ist diese Einteilung jedoch nur eine grobe Annährung.

Die extrahierten Daten der FR1-Studien können in Anhang 2, der FR2-Studien in Anhang 3 gefunden werden, jeweils in tabellarischer Form.

Ein tabellarischer Überblick der Evidenzsynthese findet sich in Anhang 4.

Studien von geringer Qualität (3rd-tier) gehen mit einer eher zweifelhaften Aussagekraft einher und werden aufgrund ihres hohes Bias-Risikos nicht in die Evidenzsynthese mit einbezogen. Im Folgenden werden trotzdem zunächst alle Studien inhaltlich dargestellt, um auch die Inhalte der 3rd-tier-Studien besser nachvollziehen zu können.

Von den elf Studien hoher oder moderater Qualität untersuchten drei Studien die Wirkungen auf das zentrale Nervensystem (ZNS), das Verhalten und die Kognition und eine Studie Wirkungen auf das Immunsystem. Weiterhin gab es zwei Studien, welche die Wirkungen auf die Thermoregulation untersuchten, sowie eine Studie zur Untersuchung der Wirkungen auf die Augen. Vier weitere Studien untersuchten multiple Parameter & andere Themen.

Von den 22 3rd-tier-Studien untersuchten acht Studien Parameter zum ZNS, der Kognition und dem Verhalten, fünf Studien das Immunsystem, drei Studien die

Fortpflanzung und Teratogenität (davon eine Studie im FR2-Bereich), zwei Studien Wirkungen auf die Augen und vier Studien multiple Parameter & andere Themen (davon zwei Studien im FR2-Bereich).

4.3.1 Zentrales Nervensystem (ZNS), Kognition und Verhalten

Insgesamt drei Studien von moderater Qualität untersuchten schwerpunktmäßig Wirkungen von 5G-relevanter HF-EMF-Exposition (3,0–3,5 GHz) auf das ZNS, Kognition und Verhalten (Bektas et al., 2022; Chiang et al., 1984; Raslear et al., 1993). Die Gruppengröße in den Studien war mit 7–10 Tieren/Gruppe meist niedrig. Zusätzlich untersuchten zwei weitere Studien, eine 1st-tier-Studie (Kössler et al., 1981) und eine 2nd-tier-Studie (de Seze et al., 2020) aus dem Themenblock „Multiple Parameter & andere Themen“ auch teils Parameter zu diesem Thema. Die Untersuchungen fanden dabei entweder an Ratten oder Mäusen statt.

Nur eine Studie untersuchte die Wirkungen von Mikrowellen von dem expliziten Hintergrund von 5G und verwendete ebenfalls als einzige Studie einen 5G-Signalgenerator (Bektas et al., 2022). Alle anderen Studien dieses Themenblocks führten ihre Untersuchungen vor dem Hintergrund anderer Anwendungen wie beispielsweise Radar durch (Chiang et al., 1984). Keine Studie verwendete für die Exposition einen 5G-Signalgenerator.

Mit Ausnahme der Studie von Kössler und Kolleg*innen, fanden alle anderen Studien signifikante Wirkungen der 5G-relevanten HF-EMF-Exposition auf mindestens einen oder sogar mehrere untersuchte Parameter (Kössler et al., 1981).

Weiterhin untersuchten acht 3rd-tier-Studien Wirkungen von 5G-relevanter HF-EMF-Exposition (3,0–4,0 GHz) auf das ZNS, Kognition und Verhalten. Auch eine 3rd-tier Studie aus dem Themenblock „Fortpflanzung und Teratogenität“ untersuchte Parameter zu diesem Thema (Chiang & Yao, 1987). Nur eine einzige 3rd-tier-Studie in diesem Themenblock untersuchte die Wirkungen von Mikrowellen von dem expliziten Hintergrund von 5G (Yang et al., 2022).

Mit Ausnahme von Roberti und Kolleg*innen fanden alle anderen Studien signifikante Wirkungen auf einen oder mehrere der untersuchten Parameter (Roberti et al., 1975).

Die möglichen Endpunkte der Studien und der Fokus der Autor*innen war sehr heterogen. Teils wurden rein biochemische oder histopathologische Veränderungen untersucht, in einigen Studien wurden diese mit Untersuchungen zu möglichen funktionellen Folgen kombiniert. In anderen Studien wurden wiederum nur Parameter des Verhaltens oder der Kognition ohne begleitende Untersuchungen analysiert.

Kognitive Funktionen

Die Wirkungen auf kognitive Funktionen wurden in zwei 2nd-tier-Studien untersucht.

In einer Studie konnte nach einer gepulsten 3,0 GHz Exposition bei einem Ganzkörper-SAR von 0,072 W/kg eine verschlechterte Entscheidungsfindung der Ratten festgestellt werden. Es konnten sowohl in Bezug auf die verschlechterte Entscheidungsfindung als auch auf Null-Reaktionen (> 10 Sekunden für die Entscheidung) wiederholbare Dosis-Wirkungs-Effekte beobachtet werden (Raslear et al., 1993).

Auch die Studie von de Seze und Kolleg*innen aus dem Themenblock „Multiple Parameter und andere Themen“ untersuchte kognitive Funktionen bei Ratten. Sie stellten nach einer chronischen gepulsten Exposition bei 3,7 GHz (SAR 0,83 W/kg) eine verbesserte sensomotorische Aktivität der Ratten im Rotarod-Leistungstest fest (de Seze et al., 2020). Diese könnte laut Autor*innen durch leichte Erwärmung erklärbar sein. Vermutlich wurde hier der SAR-Wert verwechselt, da die Autor*innen von einer Erwärmung bei wiederholter gepulster Exposition bei einem SAR von 4,7 W/kg sprachen, die wiederholte Exposition betraf jedoch eine andere Gruppe mit einem SAR von 0,83 W/kg.

Verhalten

Die Wirkungen auf das Verhalten wie die spontane Aktivität im Ladrauftest oder das Erkundungsverhalten im Open-Field Test wurden in zwei 1st- bzw. 2nd-tier-Studien aus dem Themenblock „Multiple Parameter & andere Themen“ untersucht.

Die 1st-tier-Studie untersuchte die spontane Aktivität in einem Radlauftest nach einer 3,3 GHz Exposition (power density (PD) 2 mW/cm²) für zwölf Wochen, fand jedoch keine Veränderungen durch die HF-EMF-Exposition (siehe auch Kapitel 4.3.5) (Kössler et al., 1981).

Die 2nd-tier-Studie konnte nach einer wiederholten gepulsten 3,7 GHz-Exposition für acht Wochen (SAR 0,83 W/kg) in keinem der Verhaltenstests (Beam-walking-Test, T-

maze, Open-Field-Test) Veränderungen feststellen (de Seze et al., 2020). Durch akute Exposition bei einem starken Feld (22 W/kg), welches deutlich über dem Schwellenwert der ICNIRP von 4 W/kg liegt, konnte jedoch ein Vermeidungsreflex induziert werden. Dies bestätigt somit laut Autor*innen die Relevanz des Schwellenwertes. Außerdem zeigten die Ratten nach wiederholter Exposition eine geringere Lebensdauer, ein vermehrtes Auftreten von Tumoren (siehe Kapitel 4.3.5) sowie eine Zunahme an Entzündungen im Gehirn (siehe ebenfalls Kapitel 4.3.1).

Ebenfalls untersuchten zwei 3rd-tier Studien das Verhalten.
Eine Studie untersuchte bei einer 3,0 GHz Exposition sowohl die motorische Aktivität als auch die „Runway Performance“. Hierbei konnten keine Veränderungen festgestellt werden (Roberti et al., 1975).
Die zweite 3rd-tier-Studie führte einen Open-Field-Test zur Untersuchung des ängstlichen Verhaltens nach einer 3,5 GHz Exposition durch, konnte hier jedoch keine Veränderungen feststellen (Yang et al., 2022). Dies stimmt mit den Ergebnissen der 2nd-tier-Studie überein, welche ebenfalls keine Effekte im Open-Field-Test fanden (de Seze et al., 2020). Weiterhin fanden Yang und Kolleg*innen ultrastrukturelle Veränderungen und Zeichen für erhöhten oxidativen Stress (siehe ebenfalls Kapitel 4.3.1 sowie 4.3.5).

Strukturelle Veränderungen

Wirkungen auf strukturelle Gehirnveränderungen wurden in zwei 2nd-tier-Studien untersucht. Eine Studie untersuchte neben biochemischen Veränderungen (siehe ebenfalls 4.3.1) auch histologische Veränderungen im Gehirn von gesunden und diabetischen Ratten nach einer gepulsten 3,5 GHz Exposition des Kopfes bei einem Ganzkörper-SAR von 37 mW/kg für 30 Tage (Bektas et al., 2022). Hier konnten histologische Schäden in Form von vermehrten degenerierten Neuronen sowohl bei gesunden als auch bei den diabetischen Mäusen in der CA1-Region des Hippocampus festgestellt werden. Synaptophysin als neuroendokriner Tumormarker und das synaptische Protein als wichtiger Teil der synaptischen Plastizität zeigten keine Veränderungen.
Bei den histologischen Erkenntnissen ist darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse im Text und den Abbildungen widersprüchlich waren. Beispielsweise wurde ausgesagt, dass die Veränderungen in der Gruppe der gesunden und exponierten Ratten am

ausgeprägtesten waren, jedoch zeigten sich die zugehörigen histologischen Abbildungen widersprüchlich und auch die schriftlichen Ergebnisse in der Diskussion besagten, dass die Veränderungen bei diabetischen Ratten ausgeprägter waren als bei den gesunden Ratten. Zudem wurde hier keine Statistik angewandt.

De Seze und Kolleg*innen konnten zwei Tage nach einer akuten gepulsten 3,7 GHz Exposition (SAR 4,7 W/kg) vermehrt Entzündungen im ganzen Gehirn feststellen, was sich durch eine erhöhte Expression des sauren Gliafaserproteins (GFAP), als Anzeichen für geschädigtes oder dysfunktionales Hirngewebe, widerspiegelte (de Seze et al., 2020). Auch weitere Untersuchungen zeigten Veränderungen durch die Exposition (siehe ebenfalls Kapitel 4.3.1 sowie 4.3.5).

Weiterhin konnten drei 3rd-tier-Studien strukturelle Gehirnveränderungen feststellen.
Nach einer chronischen Exposition bei 3,0 GHz für drei Monate konnte eine proliferative Reaktion der Gliazellen sowie auch morphologische Läsionen in der weißen Substanz des Gehirns und im Kleinhirn festgestellt werden. Dies deutet auf Stoffwechselstörungen in den Myelinscheiden und Gliazellen hin (Barański, 1972b). Nach akuter dreistündiger Exposition kam es zu thermalen Läsionen (siehe Kapitel 4.3.3). Es wurden jedoch keine Details zur Expositionsquelle oder Aufbau genannt und keine Statistik angewandt.
Ähnliche Ergebnisse zeigten sich in einer weiteren Studie: hier konnten insbesondere nach gepulster, chronischer 3,0 GHz Exposition für 60 Tage morphologische Veränderungen degenerativen Charakters (z.B. Proliferation an Gliazellen und perivaskuläre Veränderungen) im Cortex und Cerebellum festgestellt werden (Barański & Edelwejn, 1967). Ebenfalls zeigten sich Veränderungen der Gehirnaktivität (siehe ebenfalls Kapitel 4.3.1). Die Autor*innen vermuteten eine Wärmewirkung als Ursache für die aufgetretenen Veränderungen.
Die recht aktuelle Studie von Yang und Kolleg*innen stellte nach einer 3,5 GHz Exposition ultrastrukturelle Veränderungen im auditorischen Kortex von Meerschweinchen fest, welche sich abhängig von der Intensität des SAR anhand von geschwollenen Mitochondrien und geschichteten Myelinscheiden zeigten (Yang et al., 2022). Sie vermuteten, dass diese Schäden durch veränderte Indizes für oxidativen Stress induziert wurden (siehe Kapitel 4.3.5).

Biochemische Veränderungen

Zwei 2nd-tier-Studien untersuchten biochemische Veränderungen wie Enzymaktivitäten oder den Energiestoffwechsel.

Eine Studie untersuchte neben den histologischen Veränderungen von gesunden und diabetischen Ratten durch eine gepulste 3,5 GHz Exposition (Ganzkörper-SAR 37 mW/kg), auch Veränderungen des Energiestoffwechsels und des oxidativen Stresses anhand von dem Gesamt-Oxidant (TOS), Gesamt-Antioxidant (TAS), Wasserstoffperoxid, Nesfatin-1, Ghrelin und Irisin im ELISA (Bektas et al., 2022).

Die Exposition führte in beiden Gruppen zu oxidativem Stress (siehe Kapitel 4.3.5) und signifikanten Veränderungen im Energiehaushalt und im Appetit: Ghrelin, Wasserstoffperoxid und Gesamt-Oxidant waren signifikant erhöht, Nesfatin-1, Irisin und Gesamt-Antioxidant waren signifikant erniedrigt. Im Abstract wird von erhöhtem Irisin geschrieben, was sich als widersprüchlich zum Ergebnis im Text darstellt. Die Veränderungen waren laut Autor*innen bei diabetischen Ratten ausgeprägter als bei gesunden Ratten, jedoch konnte insgesamt keine eindeutige Schlussfolgerung bezüglich der Wechselwirkung mit dem Diabetes gezogen werden.

Eine weitere 2nd-tier Studie untersuchte nach einer gepulsten 3,0 GHz Exposition zwei mitochondriale Enzymgehalte (Succinat-Dehydrogenase (SDH) und die Monoamin-Oxidase (MAO)) im Gehirn von Mäusen (Chiang et al., 1984). Bei einer PD von mind. 0,5 mW/cm² oder höher konnte eine signifikante Erniedrigung beider Enzyme im Hippocampus und Hypothalamus festgestellt werden, was laut Autor*innen als eine Wirkung von HF-EMF auf den Energiestoffwechsel im Gehirn zu interpretieren ist. Bei einer PD von 0,3 mW/cm² konnte keine Veränderung festgestellt werden, sodass eine PD zwischen 0,3–0,5 mW/cm² einen Schwellenwert darstellen muss.

Weiterhin fanden vier 3rd-tier-Studien biochemische Veränderungen.

Bei tragenden und *in-utero* exponierten Mäusen (3,0 GHz, PW 1 oder 8 mW/cm²; siehe Kapitel 4.3.6) konnte ein vermindertes Level der Hypothalamus-Enzyme SDH und MAO festgestellt werden (Chiang & Yao, 1987). Dies gleicht den Ergebnissen der Untersuchungen von Chiang und Kolleg*innen, welche ebenfalls verminderte Level dieser Enzyme feststellten (Chiang et al., 1984).

Barański stellte, neben strukturellen Veränderungen, nach einer chronischen 3,0 GHz Exposition eine verminderte Aktivität von Acetylcholinesterase und SDH fest - in den zugehörigen Tabellen zeigten sich jedoch widersprüchliche Daten: nach akuter gepulster Exposition zeigte sich hier eine Verminderung von Acetylcholinesterase und SDH, während nach akuter kontinuierlicher Exposition (25 mW/cm²) die SDH erhöht war (Barański, 1972b).

Eine Studie beobachtete nach einer 3,0 GHz Exposition für sieben Tage eine signifikante Verminderung der ATP-Level und des mitochondrialen Markerenzyms SDH im Hippocampus und Hypothalamus (Pu et al., 1997). Zudem fanden sich Veränderungen der Gehirnaktivität (siehe ebenfalls Kapitel 4.3.1).

Somit gleichen sich die Ergebnisse der verminderten SDH bei 2nd- und 3rd-tier-Studien (Barański, 1972b; Chiang et al., 1984; Pu et al., 1997).

Yang und Kolleg*innen stellten nach einer 3,5 GHz Exposition neben strukturellen Veränderungen auch erhöhte Level an Malondialdehyd (MDA) sowie erniedrigter Aktivität der antioxidanten Enzyme reduziertes Glutathion (GSH), Superoxiddismutase (SOD) und Katalase (CAT) als Zeichen des oxidativen Stresses fest (Yang et al., 2022). Zudem konnte als Zeichen einer induzierten Apoptose eine Cytochrom-c Relokalisation, Caspase-9 und Aktivierung von gespaltener Caspase-3 detektiert werden (siehe Kapitel 4.3.5).

Gehirnaktivität

Fünf 3rd-tier-Studien untersuchten die Hirnaktivität und konnten Veränderungen durch eine EMF-Exposition feststellen. Eine Studie zeigte insbesondere nach chronischer, gepulster Exposition für 60 Tage, neben morphologischen Veränderungen, funktionale Veränderungen im EEG von Kaninchen wie die Desynchronisation des Grundrhythmus in der motorischen Region oder langsame Wellen und Spikes in den optischen Ableitungen (Barański & Edelwejn, 1967).

Eine weitere Studie exponierte Ratten bei gepulsten 3,0 GHz für 1–7 Tage, einen Monat oder fünf Monate und führte eine Elektrocorticografie (ECoG) durch. Es zeigten sich nach vier Tagen verschiedene Veränderungen (paroxystische Anfälle, Spikes, scharfer "Theta"-Rhythmus mit einigen isolierten „slow waves“), welche sich nach Beendigung der Exposition normalisierten (Bertharion et al., 1971)

Auch Servantie und Kolleg*innen untersuchten Veränderungen des ECoG nach einer gepulsten 3,0 GHz Exposition für zehn Tage und fanden eine mögliche Synchronisation der kortikalen Neurone bei den Ratten: Die Exposition führte zu einer erhöhten Frequenz des okzipitalen Elektrokortikogramms, die mit der „pulse repetition rate“ synchron war (Servantie et al., 1975).

Pu und Kolleg*innen untersuchten nach einer 3,0 GHz Exposition, neben biochemischen Veränderungen, die Gehirnaktivität anhand eines EEGs und implantierten Elektroden (Pu et al., 1997). Es fand sich eine signifikante Verminderung der Gehirnaktivität. Es wurde hier eine zugrundeliegende Wärmewirkung vermutet (siehe Kapitel 4.3.3).

Eine weitere Studie untersuchte die Hirnaktivität und den zerebralen Blutfluss bei einer 4,0 GHz Exposition des Kopfes für 30 Minuten (Thuróczy et al., 1994). Bei einer niedrigen Exposition (8,4 und 16,8 mW/g) konnten keine Veränderungen in der Hirnaktivität im EEG festgestellt werden, nur die Amplituden des REGs als Index des zerebralen Blutflusses stiegen an. Wirkungen auf die Hirnaktivität simultan mit Veränderungen auf den zerebralen Blutfluss, konnten erst bei einer Exposition SAR > 16,8 mW/g festgestellt werden, welche als thermisch klassifiziert wurden. Hier zeigte sich bei der Exposition mit SAR 42 mW/g ein signifikanter Anstieg des Deltawellenbandes (0,5–4 Hz) und ein leichter Anstieg des Thetawellenbandes (4,5–8 Hz) im EEG gleichzeitig mit der REG-Amplitude. Dabei ist unklar, ob immer dieselben oder unterschiedliche Tiere für die verschiedenen Parameter verwendet wurden.

Insgesamt konnten somit in 3rd-tier-Studien verschiedene Auswirkungen auf die Hirnaktivität in Form von Veränderungen des EEGs, ECoGs oder REGs festgestellt werden, es gibt jedoch keine 1st-oder 2nd-tier-Studien, die dies bestätigen oder widerlegen.

4.3.2 Immunsystem

Nur eine Studie von hoher Qualität untersuchte die Wirkungen einer 3,0 GHz Exposition auf das Immunsystem (Shao & Chiang, 1989). Die Untersuchungen fanden an Mäusen statt, wobei die Gruppengröße bei mind. zehn Tieren/Gruppe lag. Es konnten signifikante Veränderungen im Sinne einer kurzfristigen Stimulation des Immunsystems festgestellt werden. Expliziter Hintergrund der Wirkungen von Mikrowellen war jedoch

nicht 5G, sondern andere Anwendungen wie Radar. Für die Exposition wurde kein 5G-Signalgenerator verwendet.

Die Studie untersuchte die Antikörperreaktion bei Mäusen verschiedenen Alters anhand eines Antigentests. Dafür wurden die Mäuse mit Schafserythrozyten immunisiert und die Immunreaktion nach einer zweimaligen, 60-minütigen, gepulsten 3,0 GHz Exposition bei einer PD von 1–12 mW/cm² untersucht. Bei einer PD von 5 mW/cm² konnte eine verstärkte Immunreaktion anhand eines erhöhten Hämagglutinin-Titers bei den 9–10 und > 16 Wochen alten Mäusen beobachtet werden, nicht jedoch bei den jüngsten (4–5 Wochen alten) Mäusen. Bei einer PD von 7 und 12 mW/cm² konnte für acht Tage nach Exposition bei allen Mäusen eine verstärkte Immunreaktion festgestellt werden.

Weiterhin untersuchten fünf 3rd-tier-Studien im FR1-Bereich Parameter zum Immunsystem (Baranski, 1971; Barański, 1972a; Szmigielski et al., 1975; Szmigielski, Luczak, et al., 1977; Szmigielski, Pulverer, et al., 1977). Alle 3rd-tier Studien konnten Wirkungen feststellen.

Barański untersuchte 1971 in einer Studie die Exposition bei 3 GHz (pulsed wave (PW) und continuous wave (CW), PD 3,5 mW/cm²) für bis zu vier Monate (Baranski, 1971). Es zeigten sich in Kernstruktur und Mitose Anomalien in erythroblastischen Zellen im Knochenmark und in lymphoiden Zellen in Lymphknoten und Milz. Zudem konnte eine deutliche Stimulation des lymphozytären Systems sowie eine Verminderung der Pro-Erythroblasten und basophilen Erythroblasten festgestellt werden, die Reifungskurve verschob sich zu den poly-a und orthochromatischen Erythroblasten, insbesondere nach gepulster Exposition (siehe Kapitel 4.3.5).

In einer ähnlichen Studie aus dem Jahr 1972 konnte der Autor, ebenfalls bei einer PD von 3,5 mW/cm², neben einer induzierte Lymphopoese, histologische Veränderungen der Lymphknotenstruktur sowie ein Shift der Lymphozyten zu weniger differenzierten Formen in den blutbildenden Organen feststellen, welche möglicherweise durch eine Mobilisation der Immunzellen erklärbar ist (Barański, 1972a). Außerdem deutete der signifikant erhöhte mitotische Index in Lymphknoten und Milz auf eine erhöhte Proliferation der Zellen hin.

In einer anderen Studie zeigte sich nach einer Exposition bei einer PD von 3 mW/cm² bei Kaninchen eine verminderte Leuko- und Granulozytose, ein verminderter Reservepool im Knochenmark mit einem prozentual höherem Anteil an unreifen

Granulozytenformen sowie eine verminderte Lysozym-Aktivität im Serum (Szmigielski et al., 1975).

In zwei weiteren Studien konnte eine verringerte Wachstumsrate von Tumoren (Szmigielski, Pulverer, et al., 1977) sowie bei einer PD von 40 mW/cm² ± 10 % eine verminderte Mortalität bei HSV-1 infizierten Mäusen festgestellt werden, wenn die Exposition direkt nach Infektion stattfand (Szmigielski, Luczak, et al., 1977). Daraus schlussfolgerten die Autor*innen, dass die Hyperthermie durch Mikrowellen in den Vermehrungszyklus des Virus eingreift.

4.3.3 Thermoregulation

Eine neuere 1st- und eine 2nd-tier-Studie derselben Autor*innengruppe untersuchten die Thermoregulation im FR2-Bereich bei Ratten explizit vor dem Hintergrund von 5G und stellten signifikante Wirkungen fest (Ijima, Kodera, et al., 2023; Ijima, Li, et al., 2023). Während beide Studien die Temperatur an verschiedenen Körperstellen maßen, wurde der Blutfluss der Haut nur in einer Studie untersucht (Ijima, Kodera, et al., 2023).

In ihrer ersten Studie (2nd-tier) konnte festgestellt werden, dass es bei einer 26,5 GHz Exposition bei 500 W/cm^2 zum Anstieg der dorsalen Hauttemperatur um ca. 11,3 °C kam, während sich die rektale Temperatur sich nur um 0,6°C erhöhte, was auf stark lokalisierte Wirkungen hindeutete (Ijima, Li, et al., 2023). Es wurde eine signifikante Korrelation zwischen der absorbierten Leistungsdichte und dem Anstieg der Hauttemperatur genau an der Stelle und 1 cm entfernt von der Zielstelle der Exposition beobachtet. Über ein lineares Regressionsmodell schlussfolgerten die Autor*innen, dass der Schwellenwert für die Expositionsrichtlinien unter den vorliegenden Versuchsbedingungen mit Ratten gültig wäre (d.h. ein Temperaturanstieg von < 5 °C für 200 W/cm^2 exponierte Haut).

In ihrer zweiten Studie, konnten bei einer 28 GHz Exposition mit einem Ganzkörper-SAR bei 3,7 oder 7,2 W/kg ebenfalls intensitätsabhängige Temperaturerhöhungen an allen Messstellen (rektal, dorsal, Schwanz) gezeigt werden. Ebenfalls zeigte sich eine erhöhte Hautdurchblutung am Schwanz durch Erhöhung der Rektaltemperatur, was wiederrum zu einem Anstieg der Hauttemperatur am Schwanz führte. Die Autor*innen schlussfolgerten, dass die Ganzkörper-Exposition bei 28 GHz die Thermoregulation stimuliert, um die durch die Exposition erzeugte Wärme zu transportieren.

Neben den hier aufgeführten Studien, die explizit die Thermoregulation untersuchten, gab es außerdem einige Studien mit der Hypothese, dass die in den Studien beobachteten Wirkungen vermutlich mit einem durch die Exposition verursachten Temperaturanstieg zusammenhingen (Barański, 1972b; Barański & Edelwejn, 1967; Hirsch et al., 1977; Pu et al., 1997; Roberti et al., 1975; Thuróczy et al., 1994).

4.3.4 Wirkungen auf die Augen

Eine 2nd-tier-Studie untersuchte Wirkungen auf die Augen (Hirsch et al., 1977). Zusätzlich untersuchten zwei 3rd-tier-Studien Parameter zu diesem Thema (Appleton et al., 1975; Paulsson et al., 1979). Keine der Studien untersuchte die Wirkungen explizit vor dem Hintergrund von 5G. Alle drei Studien konnten Wirkungen der HF-EMF-Exposition auf einen oder mehrere ihrer untersuchten Parameter feststellen. Alle Studien dieses Themenblocks wurden an Kaninchen durchgeführt.

Hirsch und Kolleg*innen untersuchten das linke Auge von Kaninchen auf Anomalien der Kornea und Linse nach einer kontinuierlichen 3,0 GHz Exposition bei einer PD von 50–500 mW/cm für 30 Tage (Hirsch et al., 1977). Bei einer PD von 300 mW/cm² oder höher konnten eine Verstopfung der Limbusgefäße als auch eine Verengung der Pupillen, Iritiden, hintere subkapsuläre Irisierungen und hintere kortikale Katarakte beobachtet werden. Die Autor*innen schlussfolgerten, dass die Exposition ≥ 300 mW/cm² intensitätsabhängig die Iris schädigt und ein Katarakt entstehe. Es ist anzumerken, dass es in der Expositionsgruppe mit der höchsten PD von 500 mW/cm² zu Temperaturen > 42 °C (thermale Wirkung) gekommen sein könnte.

Eine 3rd-tier-Studie untersuchte ebenfalls bei 3 GHz (PD 100–500 mW/cm²) sowohl akute als auch langzeitige Veränderungen des linken Auges (Appleton et al., 1975). Bei einer PD von 300–500 mW/cm² für 15 min fanden sich reversible akute Veränderungen wie Miosis und Hyperämie. Bei einer Exposition für 15 min (PD 500 mW/cm²) starben 50 % der Tiere direkt nach der Exposition, Bei einer Exposition für 30 min (PD 300 mW/cm²) starben alle Tiere der Gruppe.

Eine weitere 3rd-tier-Studie untersuchte die Morphologie und Histologie der Retina nach einer gepulsten Exposition des Kopfes bei 3,1 GHz und einer PD von 550 mW/cm² (Paulsson et al., 1979). Die elektronenmikroskopische Untersuchung zeigte

insbesondere in der Retina wiederholt exponierter Tiere (ca. 50-stündige Exposition) ausgeprägte degenerative Veränderungen sowie leichte Veränderungen in Tieren mit nur einstündiger Exposition. Bei der ebenfalls untersuchten Blut-Hirn-Schranke und Blut-Retina Schranke konnten keine statistisch signifikanten Veränderungen festgestellt werden. Die Autor*innen schlussfolgerten, dass ultrastrukturelle Veränderungen in der Retina von Kaninchen aufgrund wiederholter Exposition bei PD 550 mW/cm² auftreten können.

4.3.5 Multiple Parameter & andere Themen

Multiple Parameter

Es gab mehrere Studien, welche die Wirkungen von HF-EMF thematisch breit und anhand verschiedenster Parameter untersuchten.

In einer 1st-tier-Studie von Kössler und Kolleg*innen konnte bei den untersuchten Parametern keine Wirkung gefunden werden (Kössler et al., 1981). Das Verhalten, untersuchte Blutparameter sowie Enzymaktivitäten waren unauffällig, einzig die Aspartat-Aminotransferase war nach einer 3,3 GHz Exposition (PD 2 mW/cm^2) erhöht (siehe ebenfalls Kapitel 4.3.5). Die Autorinnen schlossen jedoch nicht auf eine spezifische Mikrowellenwirkung.

In einer 2nd-tier Studie wurden Auswirkungen von Hochleistungs-Mikrowellen, welche zur Störung der Elektronik von militärischen oder zivilen Fahrzeugen eingesetzt werden, untersucht (de Seze et al., 2020). Die Autor*innen konnten bei Ratten nach einer 3,7 GHz Exposition (SAR 0,83–22 W/kg) sowohl Veränderungen der sensomotorischen und kognitiven Funktionen als auch einen Anstieg der Krebsprävalenz sowie eine verkürzte Überlebenszeit feststellen (siehe ebenfalls Kapitel 4.3.5).

Zudem untersuchte eine 3rd-tier-Studie aus dem FR2-Bereich ebenfalls multiple Parameter, jedoch nicht explizit vor dem Hintergrund von 5G. Deichmann und Kolleg*innen untersuchten nach einer gepulsten 24 GHz Exposition verschiedene lokale und systemische Wirkungen (Deichmann et al., 1959). Dabei konnten durch akute Exposition deutliche Wirkungen (meist ohne Statistik) in den Ratten und Mäusen beobachtet werden. Eine Exposition einer Ratte bei 0,02 W/cm² für fünf Minuten führte zu einer leichten Stauung der Lunge, einer 35 °C Temperatur des subkutanen Hodengewebes und zu einem Temperaturanstieg von 1 °C an der Dura des

Frontallappens eines intakten Schädels. Eine Exposition bei 0,024 W/cm² für sieben Stunden verursachte einen deutlichen Abfall der Leukozyten sowie einen Anstieg der Erythrozyten. Die Haut zeigte je nach Intensität der Exposition Hyperämie bis starke Verbrennungen. Die Anfälligkeit gegenüber der Exposition hing von der exponierten Stelle am Körper ab. Dabei nahm der Schweregrad der pathologischen Veränderungen mit abnehmender Leistungsdichte ab. Die Beziehung von PD und der letalen Expositionszeit war dabei ebenfalls umgekehrt proportional.

Einige weitere Daten wurden aufgrund der Ein-/Ausschlusskriterien nicht weiter extrahiert (z.B. Daten zu Letalität, da hier die Erwärmung > 42 °C betrug).

Mortalität

Der Parameter „Mortalität“ wurde in einer 1st- sowie auch in einer 2nd- und 3rd-tier-Studie untersucht.

Schrot & Hawkins untersuchten in ihrer Studie die Mortalität von Ratten nach einer kontinuierlichen 3,0 GHz Exposition des Kopfes für 30, 60, 120 und 240 Sekunden (Schrot & Hawkins, 1974). Hier wurde eine PD von 0,35–2,6 W/cm² zur besseren Vergleichbarkeit berechnet, da die meisten Daten in W-min/cm² veröffentlicht waren. Als Endpunkt wurde der LD50-Wert herangezogen, also die Menge der Strahlung bei der 50 % der Tiere sterben. Da die LD50 ein international anerkannter Parameter der Toxikologie ist und somit für eine systematische Analyse von allgemeinem Interesse ist, wurde diese Studie trotz der geltenden Ausschlusskriterien miteingeschlossen - jedoch nicht in die Evidenzsynthese einbezogen. Die Autor*innen fanden bei jeder untersuchten Expositionsdauer eine Zunahme der Sterblichkeit (%) mit zunehmender Leistungsdichte (PD). Mit zunehmender Dauer war ein höheres Energieniveau erforderlich, um die gleiche Sterblichkeitsrate zu erreichen (eine Verlängerung der Dauer hatte den gegenteiligen Effekt auf die tödliche Leistungsdichte, die von 30 bis 240 Sekunden Dauer um 85 % abnahm). Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass Tiere mit einem höheren Körpergewicht anfälliger für die Exposition waren. Die tödliche Leistungsdichte variierte laut Autor*innen zwischen 2,36 W/cm² und 0,42 W/cm² für Expositionsdauern zwischen 30 s und 240 s.

Eine 2nd-tier-Studie konnte wie bereits beschrieben ein verringertes Überleben nach der Exposition feststellen (de Seze et al., 2020).

In einer 3rd-tier-Studie konnte eine verminderte Mortalität bei HSV-1 infizierten und anschließend direkt exponierten Mäusen festgestellt werden (Szmigielski, Luczak, et al., 1977).

Wirkungen auf die Knochen

Nach einer Studie von Bektas und Kolleg*innen aus dem Jahr 2022, wurde im Jahr 2023 eine weitere Studie dieser Autor*innen mit identischer Protokollnummer und Tieranzahl, vermutlich sogar mit identischen Tieren, veröffentlicht (Bektas et al., 2023). Hintergrund dieser 2nd-tier-Studie ist explizit 5G. Die Autor*innen untersuchten auch hier gesunde und (Streptozotocin-induzierte) diabetische Ratten nach eine 3,5 GHz Exposition. Dabei untersuchten sie sowohl die Wirkungen der Exposition auf die Biomechanik der Knochen als auch auf die Skelettmuskulatur. Es konnten negative Effekte auf die Biomechanik der Knochen in Form von einem reduzierten Elastizitätskoeffizienten und Elastizitätsmodul sowie einer erhöhten maximalen Verdrängung und einer verminderten Widerstandsfähigkeit sowohl bei diabetischen als auch bei gesunden Mäusen festgestellt werden. Auch die Parameter für oxidativen Stress waren, insbesondere bei den diabetischen Ratten, verändert (siehe ebenfalls Kapitel 4.3.5). Die Ergebnisse in Bezug auf MDA und CAT gleichen sich mit denen von Yang und Kolleg*innen, zeigen sich jedoch widersprüchlich in Bezug auf das GSH (Yang et al., 2022).

Die Autor*innen schlussfolgerten daraus, dass die Exposition potenziell die Knochenqualität und die strukturelle Integrität verändern kann.

Oxidativer Stress

Parameter des oxidativen Stresses wurden von mehreren Studien an Nagetieren untersucht und meist von anderen Untersuchungen begleitet. In allen Studien konnte signifikante Veränderungen der oxidativen Stress-Parameter festgestellt werden.

Die bereits erwähnten 2nd-tier-Studien von Bektas und Kolleg*innen untersuchten jeweils eine 3,5 GHz Exposition bei einem PD von 1,6 W/m^2 (Bektas et al., 2022, 2023).

Die Studie aus dem Jahr 2022 ergab eine potenzielle Veränderung des Energiestoffwechsels. Diese manifestierte sich in einem Anstieg der Gesamtoxidantien- sowie Wasserstoffperoxidspiegel im Gehirn, während der Gesamtantioxidantienspiegel abnahm (Bektas et al., 2022).

Auch in der Studie aus dem Jahr 2023 konnten neben Veränderungen an den Knochen, Veränderungen in den Parametern des oxidativen Stresses in den Muskeln gesunder und diabetischer Ratten festgestellt werden (Bektas et al., 2023).

Eine 3rd-tier-Studie fand ebenfalls veränderte Indizes für oxidativen Stress, welcher als Hauptmechanismus für die Induktion ultrastruktureller Schäden im auditorischen Kortex und Zellapoptose verantwortlich gemacht wurde (Yang et al., 2022).

Auch in der Leber, Niere und am Hämoglobin konnten Zeichen für oxidativen Stress im Rahmen einer weiteren 3rd-tier-Studie festgestellt werden (Moussa, 2009). Die untersuchten Parameter für oxidativen Stress zeigten sich teilweise erhöht (MDA) und teils erniedrigt (GSH). Dies gleicht den Ergebnissen der Studie von Yang und Kolleg*innen (Yang et al., 2022). Das Hämoglobin zeigte eine signifikant erhöhte elektrische Leitfähigkeit und intrinsische Viskosität. Auch die Leberenzyme und Nierenparameter waren erhöht. Ob dies nur nach 8-wöchiger Exposition oder auch bereits nach vierwöchiger Exposition der Fall war, zeigte sich in den Daten allerdings widersprüchlich. Anzumerken ist, dass dieser Studie nicht klar zu entnehmen war, ob eine Exposition bei 3,5 oder 10 GHz vorlag.

Wirkungen auf das auditorische System

Eine 3rd-tier-Studie aus dem FR1-Bereich untersuchte das auditorische Systems von Katzen, Hunden, Chinchillas (und Menschen) nach einer gepulsten 3,0 GHz Exposition des Kopfes (Cain & Rissmann, 1978). Die Daten zu Menschen wurden aufgrund des Ausschlusses von Humanstudien nicht weiter analysiert. Auffällig ist eine sehr kleine Gruppengröße mit nur ein bis zwei Tieren/Gruppe. Die Autor*innen schlussfolgerten, dass bei den untersuchten Pulsbreiten die Schwellenwerte der erforderlichen Energiedichte pro Puls für die Hörreaktionen Tiere nahezu konstant blieb, wenn Pulsbreite und Spitzenleistung variiert wurden.

Wirkungen auf Blutparameter

Eine einzige 1st-tier-Studie aus dem Themenblock „Multiple Parameter und andere Themen“ untersuchte verschiedene Blutparameter an Mäusen. Nach einer 3,3 GHz Exposition (PD 2mW/cm²) für zwölf Wochen wurden keine signifikanten Veränderungen der untersuchten Blutparameter gefunden (Kössler et al., 1981).

Im Gegensatz dazu konnten alle 3rd-tier-Studien, welche Blutparameter untersuchten, Veränderungen des Blutbildes feststellen.

Eine Studie aus dem FR2-Bereich untersuchte Wirkungen auf das Blut, jedoch nicht explizit vor dem Hintergrund von 5G. Die Autor*innen untersuchten hämatopoetische Wirkungen nach einer gepulsten Exposition bei 24,0 GHz (PD 20 mW/cm²) für zehn Minuten (Deichmann et al., 1964). Es kam zu einer signifikanten Verminderung an Gesamtleukozyten. Die Schlussfolgerung der Autor*innen zeigte sich jedoch widersprüchlich, da die Exposition laut dieser Schlussfolgerung eine Leukozytose induzierte. Die Daten der anderen Experimente der Studie wurden aufgrund einer fehlenden adäquaten Kontrollgruppe nicht extrahiert.

Ebenfalls untersuchte eine bereits beschriebene Studie aus dem Themenblock Immunsystem im FR1-Bereich teils Blutparameter (Baranski, 1971).

Weitere 3rd-tier-Studien fanden im Zusammenhang mit anderen durchgeführten Untersuchungen diverse Veränderungen im Blutbild (Barański, 1972a; Deichmann et al., 1959; Szmigielski et al., 1975).

4.3.6 Fortpflanzung und Teratogenität

Das Thema Fortpflanzung und Teratogenität untersuchten zwei 3rd-tier-Studien aus dem FR1-Bereich (Chiang & Yao, 1987; Varma & Traboulay, 1975) sowie eine 3rd-tier-Studie aus dem FR2-Bereich (Gunn et al., 1961). Die Studien wurden an Ratten und Mäusen durchgeführt. Alle drei Studien fanden dabei Wirkungen auf untersuchte Parameter.

Die Studie von Chiang & Yao fokussierte sich auf die Wirkungen auf das Gehirn. Hier konnte nach einer 3,0 GHz Exposition (PD 1 oder 8 mW/cm²) bei tragenden und *in-utero*-exponierten Mäusen, ein vermindertes Level an Enzymen des Hypothalamus (SDH, MAO) und der Leber (SDH) festgestellt werden (Chiang & Yao, 1987).

Die anderen beiden Studien konnten nach einer 3 bzw. 24 GHz Exposition leichte histologische Schädigungen des Hodens feststellen (Gunn et al., 1961; Varma & Traboulay, 1975).

Zusätzlich stellten Gunn und Kolleg*innen nach der Exposition bei 24 GHz verminderte Androgenlevel fest, welche laut Autor*innen vermutlich durch eine insuffiziente Produktion des luteinisierenden Hormons durch die Hypophyse verursacht wurde (Gunn et al., 1961).

4.4 Einordnung nach Wirkungen

31 Studien konnten Wirkungen auf die untersuchten Endpunkte feststellen, während nur zwei Studien keine Wirkungen fanden. Anhand der nachfolgenden Tabelle 3, welche einen Überblick über die Studienqualität und die gefundenen Wirkungen der eingeschlossenen Studien gibt, ist zu erkennen, dass insbesondere nahezu alle 3rd-tier-Studien Wirkungen fanden.

Tabelle 3*:* Überblick über die Studienqualität und die gefundenen Wirkungen der eingeschlossenen Studien. *Je Studie ist anhand einer Zahl dargestellt, welche auf die Studienqualität nach OHAT hinweist (1/grün = 1st-tier, 2/gelb = 2nd-tier, 3/rot = 3rd-tier). Jede Studie ist eine Kategorie („Wirkung" vs. „Keine Wirkung") anhand der Schlussfolgerung der Studienautor*innen zugeordnet. Es ist anzumerken, dass Studien, welche auch in den Ergebnissen inhaltlich mehreren Themen zugeordnet wurden, mehrmals aufgeführt worden sind.*

Thema	Wirkung	Keine Wirkung
ZNS, Kognition und Verhalten		
Kognitive Funktionen	2 2	
Verhalten	2	1 3 3
Strukturelle Veränderungen	2 2 3 3 3	
Biochem. Veränderungen	2 2 3 3 3 3	
Gehirnaktivität	3 3 3 3 3	
Immunsystem	1 3 3 3 3 3	
Thermoregulation	1 2	
Wirkungen auf die Augen	2 3 3	
Andere Themen		
Mortalität	1 2 3	
Knochen	2	
Oxidativer Stress	2 2 3 3	
Auditorisches System	3	
Blutparameter	3 3	1
Fortpflanzung und Teratogenität	3 3 3	

4.5 Subgruppenanalyse

Für eine Subgruppenanalyse auf Grundlage der übergeordneten Themengebiete können keine sinnvollen Subgruppen gebildet werden, da die Studien und ihre Endpunkte zu verschieden sind.

Daher stellte sich die Frage, ob möglicherweise alternativ eine Subgruppenanalyse anhand der Spezies durchgeführt werden kann. Dazu wurde folgende Tabelle 4 der 1st- und 2nd-tier-Studien sortiert nach Spezies erstellt:

Tabelle 4: 1st- und 2nd-tier-Studien sortiert nach Spezies

Spezies	Unterthemen	Wirkung	Keine Wirkung	Zitation
Ratte	ZNS	2 Studien		(Bektas et al., 2022; Raslear et al., 1993)
	Knochen/Muskel	1 Studie		(Bektas et al., 2023)
	Mortalität	1 Studie		(Schrot & Hawkins, 1974)
	Thermoregulation	2 Studien		(Ijima, Kodera, et al., 2023; Ijima, Li, et al., 2023)
	Multiple Parameter	1 Studie		(de Seze et al., 2020)
Maus	ZNS	1 Studie		(Chiang et al., 1984)
	Multiple Parameter		1 Studie	(Kössler et al., 1981)
	Antikörper-Produktion (Immunsystem)	1 Studie		(Shao & Chiang, 1989)
Kaninchen	Augen	1 Studie		(Hirsch et al., 1977)

Anhand der Tabelle 4 lässt sich erkennen, dass es auch bei der Unterteilung nach Spezies keine ausreichende Anzahl an Studien für eine valide Subgruppenanalyse ergibt. Da zudem die Endpunkte der Studien innerhalb einer Spezies thematisch stark heterogen sind und die Vergleichbarkeit erschweren, ist eine Subgruppenanalyse auch anhand dieser Einteilung nicht wissenschaftlich sinnvoll.

4.6 Einordnung der Exposition im Verhältnis zu den Grenzwerten

Es ist wissenschaftlich bewiesen, dass HF-EMF grundsätzlich biologische Wirkungen hervorrufen kann. Dies zeigt sich vor allem in Form einer thermischen Wirkung (de Seze et al., 2020). Da die thermische Wirkung der bisher einzig anerkannte Wirkmechanismus ist, sind dementsprechend auch die Grenzwerte so festgelegt, dass sie davor schützen. Wie bereits in vorherigen Kapiteln erläutert, ist jedoch weiterhin umstritten, ob es auch

zu Wirkungen unterhalb der Grenzwerte kommt, die nicht durch einen thermischen Wirkmechanismus zu begründen sind.

Zum besseren Verständnis und Einordnung, welche Studien für die Diskussion um nicht-thermische Wirkungen relevant sein könnten, wurden die 1st-und 2nd-tier-Studien im Vergleich zu den Grenzwerten der ICNIRP-Leitlinie 2020 (ICNIRP, 2020a) eingeteilt:

1. Exposition oberhalb der Grenzwerte
2. Exposition unterhalb der Grenzwerte
3. Exposition ober- und unterhalb der Grenzwerte
4. Exposition exakt bei Grenzwert

Bei unklaren Angaben seitens der Autor*innen auf welchen Teil des Körpers sich die Metriken beziehen, wurde dies versucht anhand des Versuchsaufbaus zu ermitteln.

Es ist anzumerken, dass die Einteilung in diese Gruppen mit Unsicherheit behaftet ist.

In der vorliegenden Teilanalyse des Reviews wurden ausschließlich Tierstudien analysiert. Grundsätzlich sind ICNIRP-Grenzwerte auf den menschlichen Körper abgestimmt und nicht einfach auf jede Spezies übertragbar, u.a. auf folgenden Gründen:

1. Lokaler SAR-Grenzwert

   Definiert ist dieser ICNIRP-Grenzwert in Form der maximalen über 10 g Gewebe gemittelten SAR. Für den Menschen bedeutet eine Exposition an diesem Grenzwert meist keine thermische Ganzkörperlast. Anders ist es bei kleinen Tieren wie z.B. Mäusen: Da das 10 g Mittelungsvolumen einem großen Teil der Gesamtmasse des Tieres entspricht, liegt hier eine bedeutende thermische Last vor.
2. Ganzkörper SAR-Grenzwert

   Weil das Oberflächen-/Volumenverhältnis bei kleinen Tieren wie z.B. Mäusen viel günstiger als bei einem Menschen für die Wärmeabgabe nach außen ist, überhitzen kleine Tiere nicht so schnell. Daher kann z.B. eine Maus eine deutlich höhere Ganzkörper-SAR tolerieren als ein Mensch.
3. Referenzwerte

   Bei 3–4 GHz liegen die Körperdimensionen von kleinen Tieren innerhalb der Wellenlänge. Dadurch wirken sie wie „Antennen“ und absorbieren hier HF-EMF viel effizienter als Menschen.

Der Mensch kommt im Bereich 10–400 MHz in die Nähe der Wellenlänge, weshalb hier auch die ICNIRP-Grenzwerte niedriger sind als in angrenzenden Frequenzbereichen.

4. Thermoregulation

   Während Menschen v.a. Schweißdrüsen zur Wärmeabgabe besitzen, gibt es bei Tieren teils andere Mechanismen wie Hecheln oder stark durchblutete Körperteile wie Ohren zur Wärmeabgabe.

Daher soll die vorgenommene Einteilung nur als grobe Orientierung dienen. Eine Übersicht findet sich tabellarisch in Anhang 5.

4.7 Evidenzsynthese

4.7.1 Erläuterungen zur Evidenzsynthese

Die Evidenzsynthese wurde auf Ebene der Themengebiete durchgeführt. Es wurden nur 1st- und 2nd-tier-Studien einbezogen. Dabei wurde auch die Einstufung der Exposition der Studien in die Gruppen „oberhalb der Grenzwerte“ und „unterhalb der Grenzwerte“ mit einbezogen (siehe Kapitel 4.6).

Das initiale Vertrauen in die Evidenz wird anhand der Schlüsselkriterien kontrollierte Exposition, Exposition vor dem Outcome, individuelle Outcome Daten und eine angemessene Vergleichsgruppe festgelegt. (Tier-) experimentelle Studien erhalten generell eine hohe anfängliche Vertrauensbewertung (++++) nach OHAT (National Toxicology Program, 2019).

Nachdem eine initiale Vertrauensbewertung erfolgt war, wurden die Gruppen nach den Kriterien des OHAT-Handbuches und zusätzlich eingeführten Faktoren beurteilt und daraufhin Auf-und Abstufungen des Vertrauens in die Evidenz vorgenommen.

Als weitere zusätzliche abwertende Faktoren sind zu nennen:

1. Geringe Anzahl an Studien
   a. ≤ drei Studien + mindestens ein weiterer Faktor für Abstufung → einfache Abstufung
   b. nur eine Studie zu einem Themengebiet → doppelte Abstufung

2. Heterogenität
    a. Heterogenität bzgl. Spezies, Exposition oder untersuchte Parameter → einfache Abstufung
    b. Inhaltlich sehr heterogen, wie Einzelstudien zu werten → doppelte Abstufung
3. Inkonsistenz
    a. Wenn ein signifikanter Anteil der Studien in einem Themengebiet eine andere Richtung der Evidenz (Wirkung bzw. keine Wirkung) berichtete als die übrigen Studien, wurde dies als Unsicherheitsfaktor für die Evidenz gewertet, die zu einer einfachen Abstufung der Konfidenz führte → einfache Abstufung
4. Gleiche Arbeitsgruppe
    a. Keine unabhängige Bestätigung durch eine andere Arbeitsgruppe + mind. Ein weiterer Faktor für Abstufung → einfache Abstufung
5. Kleine Gruppengröße
    a. < zehn Tiere bei einem Großteil der Studien → einfache Abstufung
6. Risiko für Bias
    a. Größter Teil der Studien als 2nd-tier bewertet → einfache Abstufung der Evidenz

Als weitere zusätzliche aufwertende Faktoren sind zu nennen:

1. Dosis-Wirkungs-Beziehung
    a. Studien eines Themengebietes zeigten eine konsistente Dosis-Wirkungs-Beziehung → einfache Hochstufung

Anschließend wurde, wie in den Methoden beschrieben, das Vertrauen in die Evidenz unter Berücksichtigung der Richtung der Wirkung in Evidenzqualitätsgrade übersetzt.
Da sämtliche Parameter der Studien wie Spezies, Exposition und Endpunkte sehr heterogen waren, kann auch hier die resultierende Evidenzsynthese anhand der Themengebiete nur als grobe Annährung verstanden werden.

4.7.2 Evidenzsynthese nach Themengebieten

Im Folgenden wird die qualitative Evidenzsynthese für alle Themengebiete präsentiert. Eine tabellarische Übersicht findet sich in Anhang 4.

Wirkungen auf Kognition

Es wurden zwei Studien (2nd-tier) in die Evidenzsynthese des Themengebietes Kognition eingeschlossen. Diese fanden Wirkungen sowohl ober- als auch unterhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund von Risiko für Bias, der geringen Anzahl an Studien sowie Heterogenität in Bezug auf die untersuchten Parameter dreimal abgestuft. Damit ergab sich eine sehr geringe Konfidenz für eine Wirkung und die die **Datenlage wurde insgesamt als unzureichend für eine Schlussfolgerung zu Wirkungen auf die Kognition** bewertet.

Wirkungen auf das Verhalten

Im Themengebiet Wirkungen auf das Verhalten wurden zwei Studien (1st-tier, 2nd-tier) in die Evidenzsynthese einbezogen. Eine Studie fand Wirkungen oberhalb der Grenzwerte. Die andere Studie untersuchte Parameter unterhalb der Grenzwerte und konnte keine Wirkungen hier feststellen. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund von der geringen Anzahl der Studien und Heterogenität der untersuchten Parameter zweifach herabgestuft. Es ergab sich eine geringe Konfidenz und somit eine **geringe Evidenz für eine Wirkung auf das Verhalten oberhalb der Grenzwerte**.

Strukturelle Veränderungen im ZNS

Es wurde eine Studie (2nd-tier) in die Evidenzsynthese für strukturelle Änderungen des ZNS eingeschlossen. Diese fand Wirkungen unterhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund von Risiko für Bias, kleiner Gruppengröße und weil es nur eine Einzelstudie gab, viermal herabgestuft. Somit wurde eine sehr geringe Konfidenz für eine Wirkung gefunden und die **Datenlage insgesamt als unzureichend für eine Schlussfolgerung zu strukturellen Änderungen des ZNS** bewertet.

Hirnstoffwechsel/biochemische Veränderungen im Gehirn

Es wurden zwei Studien (2nd-tier) in die Evidenzsynthese des Themengebietes Hirnstoffwechsel/biochemische Veränderungen eingeschlossen. Diese fanden

Wirkungen sowohl ober- als auch unterhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund von Risiko für Bias, der geringen Anzahl an Studien sowie Heterogenität in Bezug auf die untersuchten Parameter dreimal abgestuft. Damit ergab sich eine sehr geringe Konfidenz für eine Wirkung und die die **Datenlage wurde insgesamt als unzureichend für eine Schlussfolgerung zu Wirkungen auf den Hirnstoffwechsel/biochemische Veränderungen** bewertet.

Antikörper-Produktion

In die Evidenzsynthese des Themengebiets Antikörperproduktion wurde eine Studie (1st-tier) einbezogen. Die Studie fand Wirkungen oberhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund der nur vorliegenden Einzelstudie doppelt herabgestuft. Somit wurde eine geringe Konfidenz und eine **geringe Evidenz für eine Wirkung auf die Antikörperproduktion oberhalb der Grenzwerte** gefunden.

Thermoregulation

Es wurden zwei Studien (1st-tier, 2nd-tier) in die Evidenzsynthese für die Thermoregulation eingeschlossen. Sie stammten von derselben Arbeitsgruppe und waren auch inhaltlich sehr ähnlich. Beide Studien fanden Wirkungen oberhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund der geringen Anzahl der Studien und aufgrund dessen, dass beide aus derselben Arbeitsgruppe waren und die Ergebnisse somit nicht unabhängig bestätigt werden konnten, zweimal herabgestuft. Aufgrund einer konsistenten Disis-Wirkungs-Beziehung der Ergebnisse, konnte jedoch eine einfache Hochstufung der Konfidenz erfolgen. Es wurde eine moderate Konfidenz und damit eine **moderate Evidenz für eine Wirkung auf die Thermoregulation für Feldstärken oberhalb der Grenzwerte** gefunden. Die gefundenen Wirkungen oberhalb der Grenzwerte sind plausibel und im Einklang mit den bekannten Wirkmechanismen (thermische Wirkung). Die Quantifizierung der thermischen Wirkung kann aufgrund der geringen Studienanzahl nicht beurteilt werden.

Wirkungen auf die Augen

Es wurde eine Studie (2nd-tier) in die Evidenzsynthese für Wirkungen auf die Augen eingeschlossen. Diese fand Wirkungen oberhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund von Risiko für Bias, kleiner Gruppengröße und weil es nur

eine Einzelstudie gab, viermal herabgestuft. Somit wurde eine sehr geringe Konfidenz für eine Wirkung gefunden und die **Datenlage insgesamt als unzureichend für eine Schlussfolgerung zu Wirkungen auf die Augen** bewertet.

Mortalität

In die Evidenzsynthese des Themengebiets Mortalität wurde eine Studie (2nd-tier) einbezogen. Die Studie fand eine Wirkung oberhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund von Risiko für Bias und der hier nur vorliegenden Einzelstudie dreifach herabgestuft. Damit wurde eine sehr geringe Konfidenz der Evidenz für eine Wirkung abgeleitet. Die **Datenlage wird insgesamt als unzureichend für eine Schlussfolgerung zu Wirkungen auf die Mortalität** bewertet.

Die Studie von Schrot und Hawkins (Schrot & Hawkins, 1974) wurde nicht mit in die Evidenzsynthese aufgenommen. Es ist unumstritten, dass Mikrowellen bei sehr hohen Feldstärken zum Tod führen können. Da in dieser Studie als einziger Parameter die LD50 für akute und sehr starke Expositionen bestimmt wurde, ist die Studie nicht mit der anderen zu vergleichen.

Wirkungen auf die Knochen

Es wurde eine Studie (2nd-tier) in die Evidenzsynthese für Wirkungen auf die Knochen eingeschlossen. Diese fand Wirkungen unterhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund von Risiko für Bias, „Imprecision“ und weil es nur eine Einzelstudie gab, viermal herabgestuft. Somit wurde eine sehr geringe Konfidenz für eine Wirkung gefunden und die **Datenlage insgesamt als unzureichend für eine Schlussfolgerung zu Wirkungen auf die Knochen** bewertet.

Oxidativer Stress

In die Evidenzsynthese des Themengebiets oxidativer Stress wurden zwei Studien (2nd-tier) einbezogen. Beide Studien fanden Wirkungen unterhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund der geringen Anzahl an Studien, dem Risiko für Bias und der Heterogenität in Bezug auf die Studienparametern dreimal herabgestuft. Damit wurde eine sehr geringe Konfidenz der Evidenz für eine Wirkung abgeleitet. Die **Datenlage wird insgesamt als unzureichend für eine Schlussfolgerung zu Wirkungen auf oxidativen Stress** bewertet.

Allgemeine Blutparameter

In die Evidenzsynthese des Themengebiets allgemeine Blutparameter wurde eine Studie (1st-tier) einbezogen. Die Studie fand keine Wirkungen unterhalb der Grenzwerte. Die anfänglich hohe Konfidenz wurde aufgrund der nur vorliegenden Einzelstudie doppelt herabgestuft. Somit wurde eine geringe Konfidenz gefunden, was aufgrund der Richtung des Effekts (keine Wirkung) zu einer **Bewertung der Datenlage als unzureichend und zu einem inadäquaten Evidenzlevel für Schlussfolgerungen zu Wirkungen auf allgemeine Blutparameter** führt.

4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt wurden 33 tierexperimentelle Studien in die Teilanalyse eingeschlossen. Es konnten keine relevanten epidemiologischen Studien identifiziert werden.

Ein Großteil der Studien (28 Studien) untersuchten Frequenzen im Bereich 3–4 GHz, während Frequenzen zwischen 20 und 30 GHz kaum (fünf Studien) untersucht wurden.

31 Studien (93,9 %) konnten Wirkungen der HF-EMF-Exposition auf untersuchte Parameter feststellen, während zwei Studien für keinen der untersuchten Parameter signifikanten Wirkungen fanden.

Nur vier Studien konnten qualitativ als 1st-tier Studien bewertet werden (12 %), was für ein signifikantes Bias-Risiko bei der Mehrheit der Studien spricht.

Die meisten Studien untersuchten die Auswirkungen auf das zentrale Nervensystem (ZNS), die Kognition und das Verhalten (elf Studien) sowie das Immunsystem (fünf Studien).

Zusammenfassend ließ sich eine moderate Evidenz für Wirkungen auf die Thermoregulation sowie eine geringe Evidenz für Wirkungen auf das Verhalten und auf die Antikörperproduktion bei nicht-menschlichen Säugetieren jeweils für Feldstärken oberhalb der Grenzwerte finden.

Eine Evidenz für gesundheitliche Wirkungen unterhalb der geltenden Grenzwerte gibt es nicht. Jedoch gilt, dass für den Beweis, dass 5G sicher unschädlich ist, eine hohe Studienqualität erforderlich ist, welche hier qualitativ und quantitativ nicht gegeben ist. Zudem bleibt der Transfer der Ergebnisse von Tierstudien auf den Menschen zu diskutieren.

5 Diskussion

5.1 Ergebnisse im Kontext bestehender Literatur

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vorliegenden Teilanalyse des systematischen Reviews mit denen anderer Reviews sowie Empfehlungen relevanter öffentlicher Institutionen verglichen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für alle folgenden Themenbereiche, in denen eine Evidenz für Wirkungen gefunden wurde, diese nur bei Expositionen oberhalb der derzeit geltenden Grenzwerte beobachtet wurden. Somit sind die gefundenen Wirkungen voraussichtlich unter alltäglichen Bedingungen nicht relevant. Zudem muss die Übertragbarkeit tierexperimenteller Studien auf den Menschen kritisch berücksichtigt werden (siehe Kapitel 5.2).

Thermoregulation

In der vorliegenden Analyse zeigte sich eine moderate Evidenz für eine Wirkung von HF-EMF auf die Thermoregulation oberhalb der Grenzwerte. Die Ergebnisse decken sich mit vorherigen Erkenntnissen, in welcher die Wärmewirkung als Wirkmechanismus anerkannt ist (ICNIRP, 2020a). Die geltenden Grenzwerte sind unter anderem daran festgemacht, dass Expositionen oberhalb dieser Grenzwerte nachweisbar zu einem Temperaturanstieg führen können. Die beiden Studien, welche in die Evidenzsynthese einflossen, setzten Expositionen deutlich über den von der ICNIRP empfohlenen Basisgrenzwerten ein. So überschritt die lokale Exposition bei 26,5 GHz (bis 500 W/m^2) den beruflichen Grenzwert (100 W/m^2) um das Fünffache und den für die Allgemeinbevölkerung (20 W/m^2) sogar um den Faktor 25. Bei der Ganzkörperexposition von 28 GHz betrug der SAR mit 3,7 und 7,2 W/kg das 9- bis 18-Fache des beruflichen Grenzwertes (0,4 W/kg) und das 46- bis 90-Fache des Grenzwertes für die Allgemeinbevölkerung (0,08 W/kg) (ICNIRP, 2020a). Dies sind somit thermische Reaktionen, welche die Annahmen der ICNIRP und die Notwendigkeit der geltenden Grenzwerte bestätigen, wonach erst bei deutlich höheren Leistungsdichten bzw. SAR-Werten messbare Erwärmungen auftreten. Anzumerken ist die verminderte Übertragbarkeit aufgrund der physiologischen Unterschiede zwischen Tieren und Menschen (siehe Kapitel 5.2). Trotzdem liegen die tatsächlichen Expositionen – sowohl alltäglich als auch beruflich – unter realistischen Bedingungen sogar weit unterhalb der Grenzwerte, sodass vergleichbare thermische Effekte nicht zu erwarten sind. Damit

stützen die Ergebnisse die bestehenden Grenzwerte und sprechen gegen eine Relevanz der beschriebenen Effekte für übliche Expositionen.

Antikörperproduktion

In der vorliegenden Analyse zeigte sich lediglich eine geringe Evidenz für Wirkungen auf die Antikörperproduktion oberhalb der Grenzwerte. Wichtig zu beachten ist, dass diese Evidenz hier auf einer Einzelstudie von 1989 beruht (Shao & Chiang, 1989). Untersucht wurde ausschließlich der Hämagglutinin-Titer als Immunparameter. Der Titer misst die Agglutination von Erythrozyten und dient in Tiermodellen als einfacher Marker für die Antikörperantwort (Ladics, 2007). Dies liefert zwar einen ersten Anhaltspunkt für die Antikörperreaktion auf ein Antigen, erlaubt jedoch keine umfassende Bewertung der Funktion und Reaktion des Immunsystems. Anders als Immunglobulin (Ig) E oder sekretorisches IgA, liefert dieser Titer keine direkte Information zu Allergien oder konkreten Erkrankungen. Der Hämagglutinin-Titer erlaubt somit keine umfassende Bewertung klinisch relevanter Immunfunktionen beim Menschen und hat daher eine beschränkte Aussagekraft. Die berichteten Wirkungen waren zudem nur kurzfristig (bis zu acht Tage) zu beobachten, weshalb die Reaktion hier keine Hinweise für längerfristige immunologische Veränderungen zulässt. Zudem zeigten sich die Wirkungen hier an Tieren und bei Expositionen oberhalb der geltenden Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung und teils sogar oberhalb der Grenzwerte bei beruflicher Exposition auf. Methodisch ist die Studie zudem limitiert, da zum Zeitpunkt der Durchführung (1989) viele übliche Standards laborexperimenteller Studien wie präzise Dosimetrie oder Randomisierung nicht systematisch etabliert waren. Damit ist eine Übertragbarkeit auf alltägliche Expositionsbedingungen voraussichtlich nicht gegeben.

Ein Abgleich mit anderen Reviews unterstützt diese Einschätzung (Piszczek et al., 2021; Yadav et al., 2022).

Die herangezogenen Reviews untersuchen jedoch EMF-Expositionen allgemein (meist < 6 GHz) und nicht gezielt 5G spezifische Frequenzen, zudem handelt es sich am ehesten um narrative Reviews. Soweit recherchierbar, existiert nach jetzigem Stand kein eigenes systematisches Review, das speziell 5G-Frequenzen in Bezug auf die Antikörperproduktion untersucht.

Das systematische Review von Yadav und Kolleg*innen schlussfolgert, dass es zwar anhand multipler Parameter als Endpunkte Hinweise auf Veränderungen der

Immunantwort unter HF-EMF gibt, jedoch meist oxidativer Stress als Mechanismus genannt wird (Yadav et al., 2022). Zudem betonen die Autor*innen die gravierenden methodischen Differenzen der untersuchten Studien in Bezug auf Frequenz, Modulation, Expositionsdauer oder SAR. Auch seien die Ergebnisse der Studien selbst bei ähnlichen Studiendesigns teils widersprüchlich.

Ein weiteres Review berichtet ebenfalls von einer möglichen Modulation der Immunantwort durch EMF anhand von *in-vitro*- und *in-vivo*-Studien, wobei sich die Effekte stark je nach EMF-Parametern, dem untersuchten Organismus und äußeren Faktoren unterscheiden (Piszczek et al., 2021). Gleichzeitig betont das Review jedoch auch, dass diese immunmodulatorischen Effekte nicht konsistent und reproduzierbar sind. Aufgrund von methodischer Heterogenität seien Mechanismen und die klinische Relevanz weiterhin unklar. Das SCHEER greift die Ergebnisse von Piszczek und Kolleg*innen auf – bemängelt werden die fehlenden standardisierten Einschlusskriterien sowie die fehlende systematische Qualitätsbewertung der eingeschlossenen Studien (SCHEER, 2023). SCHEER betont, dass narrative Reviews mit gutem methodischem Design fehlen und keine systematischen Reviews oder Metaanalysen in der Literatur verfügbar sind, um die Effekte von HF-EMF auf das Immunsystem zu beurteilen. Daher kommt es zu dem Schluss, dass die Evidenz für Wirkungen von HF-EMF auf das Immunsystem unklar ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Evidenz für die Antikörperproduktion oder andere immunologische Endpunkte unterhalb der Grenzwerte unzureichend ist. Die einzig gefundene Studie dieser Analyse zeigt einen kurzfristigen Effekt oberhalb der Grenzwerte mit stark eingeschränkter Übertragbarkeit. Dies deckt sich mit den Bewertungen anderer Reviews und institutioneller Stellungnahmen. Die Ergebnisse unterstreichen den Bedarf an modernen, qualitativ hochwertigen Studien mit replizierbaren Ergebnissen in realistischen Expositionsszenarien unter Berücksichtigung relevanter immunologischer Endpunkte. Zukünftige Studien sollten somit alltagsrelevante klassenspezifische Antikörperreaktionen wie IgE unter längeren Nachbeobachtungszeiten sowohl ober- als auch unterhalb der Grenzwerte erfassen.

Verhalten

In der vorliegenden Analyse fand sich in Bezug auf das Verhalten lediglich oberhalb der Grenzwerte eine geringe Evidenz. Es fanden sich hier lediglich zwei Studien und die

untersuchten Parameter zeigten sich sehr heterogen. Eine der Studien untersuchte eine Exposition unterhalb der Grenzwerte und konnte keine Wirkungen feststellen.

Der Vergleich mit aktuellen systematischen Reviews bestätigt diese Einschätzung. Ein von der WHO in Auftrag gegebenes Review analysierte 5 Studien zum Zusammenhang von HF-EMF (Mobiltelefonnutzung, meist ≤ 3 GHz) und kognitiven Beeinträchtigungen (Benke et al., 2022, 2024). Es fanden sich keine Hinweise auf kognitive Beeinträchtigungen, die Evidenzqualität wurde jedoch als sehr niedrig bewertet.

Ein weiteres Review im WHO-Auftrag kam bei der Analyse humanexperimenteller Studien zu ähnlichen Ergebnissen: es konnten keine signifikanten Zusammenhänge unterhalb der geltenden Grenzwerte gefunden werden. Eingeschlossen wurden jedoch letztendlich nur Studien mit Frequenzen um 900 MHz (Pophof et al., 2021, 2024).

Ein anderes Review zeigte eine inadäquate bis sehr geringe Evidenz für Wirkungen auf das Verhalten bei Kindern und Jugendlichen (Bodewein et al., 2022).

Die Ergebnisse stimmen insoweit überein, dass keine klare Evidenz für Wirkungen unterhalb der Grenzwerte vorliegt, während mögliche Wirkungen oberhalb der Grenzwerte durch thermische Wirkungen erklärt werden. Zugleich unterstreichen die vorliegenden Ergebnisse die Forschungslücke von Studien im FR2-Bereich, welcher mit 5G und zukünftigen Anwendungen schnell an Bedeutung gewinnt. Zukünftige Studien sollten daher insbesondere Studien im FR2-Bereich durchführen und hier standardisierte und somit besser vergleichbare Expositionsparameter verwenden.

Themen mit unzureichender Datenlage

Für die anderen Themenbereiche dieser Analyse (Kognition, strukturelle Veränderungen im ZNS, Hirnstoffwechsel/biochemische Veränderungen, Augen, Knochen, Mortalität, oxidativer Stress und allgemeine Blutparameter) war die Datenlage insgesamt unzureichend für eine Schlussfolgerung. Hauptgründe hierfür war die geringe Studienanzahl (oft sogar nur Einzelstudien) sowie eine starke Heterogenität der untersuchten Parameter (Frequenzen, SAR, Studiendesign, Endpunkte) und ein teils sehr hohes Bias-Risiko der Studien durch kleine Gruppengrößen oder fehlende Verblindung und Randomisierung. Anders als in anderen Stellungnahmen könnte die stark eingeschränkte Studienlage zusätzlich durch den spezifischen Fokus auf 5G im Bereich von 3–4 und 20–30 GHz sowie klare Ein- und Ausschlusskriterien zu erklären sein. Dadurch wurde eine höhere methodische Qualität angestrebt, reduziert jedoch die

Anzahl der eingeschlossenen Studien zusätzlich und führt bei mehr Themen der Analyse zu einer unzureichenden Datenlage. Stellungnahmen wichtiger Institutionen bezogen sich meist nicht speziell auf 5G und beschrieben die Datenlage (falls thematisch eingeschlossen) jedoch teils ebenfalls als unzureichend oder zeigten unterhalb der geltenden Grenzwerte keine gesundheitlichen Wirkungen auf (siehe unten).
Insbesondere auf die Themen, zu denen sich die Datenlage in der hier vorliegenden Analyse als unzureichend zeigte, sollte in zukünftigen Studien ein besonderer Fokus gelegt werden, um eine belastbare Evidenz zu schaffen.

Thematische Ergänzung durch weitere WHO-Reviews

Einige thematisch relevante Reviews der WHO konnten nicht im Vergleich mit den hier vorliegenden Ergebnissen berücksichtigt werden, da keine thematisch passenden Studien gemäß der festgelegten Einschlusskriterien vorlagen. Dennoch sollen zentrale Ergebnisse dieser Reviews im Folgenden kurz zusammengefasst werden, um einen Überblick über die aktuelle wissenschaftliche Datenlage zu ermöglichen.

Zwei systematische Reviews untersuchten mögliche Zusammenhänge zwischen HF-EMF unterhalb der geltenden Grenzwerte und akuten Symptomen (IEI-EMF) oder der Wahrnehmung dieser.
Bosch-Capblanch und Kolleg*innen analysierten 41 humanexperimentelle Studien, konnten jedoch keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Exposition und den primären Endpunkten Kopfschmerzen, Schlafstörungen oder kombinierten Symptomen feststellen (Bosch-Capblanch et al., 2022, 2024). Auch zur vermehrten Wahrnehmung von EMF zeigten sich keine konsistenten Hinweise, wobei Personen mit IEI-EMF eine höhere Sensitivität, jedoch geringere Spezifität gegenüber der Allgemeinbevölkerung zeigten.
Röösli und Kolleg*innen kamen in ihrer Analyse von 13 Beobachtungsstudien ebenfalls zu dem Schluss, dass kein Zusammenhang zwischen HF-EMF (≤ 2,45 GHz) und untersuchten Symptomen (Tinnitus, Migräne, Kopfschmerzen, Schlafstörungen oder Symptomkombinationen) besteht (Röösli et al., 2021, 2024).
Aufgrund methodischer Mängel war das Vertrauen in die Evidenz in beiden Reviews gering. Insgesamt erscheint ein kausaler Zusammenhang nach aktueller wissenschaftlicher Datenlage jedoch unwahrscheinlich.

Drei systematische Reviews untersuchten eine mögliche Karzinogenität von HF-EMF. Mevissen und Kolleg*innen analysierten 52 tierexperimentelle Studien anhand von Bioassays (Mevissen, Ducray, et al., 2025; Mevissen et al., 2022). Bei guter Evidenz zeigte sich eine erhöhte Inzidenz für maligne Schwannome des Herzens und Gliome bei einer Exposition ≤ 2,45 GHz. Dies gleicht den Ergebnissen der NTP- und Ramazzini-Studie (Falcioni et al., 2018; NTP, 2018b, 2018a). Die Autor*innen wiesen jedoch auch darauf hin, dass die direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse von Bioassays auf das Risiko für Menschen kritisch gesehen werden muss. Eine Metaanalyse konnte aufgrund starker Heterogenität verschiedener Parameter nicht durchgeführt werden.
Karipidis und Kolleg*innen analysierten 63 epidemiologische Studien, konnten hier jedoch weder bei beruflicher Exposition gegenüber HF-EMF noch bei der Exposition durch Mobiltelefone ein erhöhtes Risiko für ZNS-Tumore oder weitere Kopftumore bei Kindern und Erwachsenen feststellen (Karipidis et al., 2024, 2025; Lagorio et al., 2021). Auch bei Exposition durch ortsfeste Anlagen ergab sich für Leukämien und Hirntumore bei Kindern kein erhöhtes Risiko. Das Vertrauen in die Evidenz wurde als moderat bis gering eingestuft. Für andere untersuchte Neoplasmen konnte im darauffolgenden Review ebenfalls keine Evidenz für einen Zusammenhang mit HF-EMF gefunden werden (Karipidis et al., 2025). Kritikpunkte betrafen unter anderem die Berücksichtigung älterer Mobilfunkstandards (1G/2G), ein möglicher Selektionsbias aufgrund von individuellen Risikofaktoren sowie die ausschließliche Nutzung epidemiologischer Daten (Di Ciaula et al., 2025; Frank et al., 2025; Hardell & Nilsson, 2025).

Zwei Reviews untersuchten die Auswirkungen von HF-EMF (meist < 3 GHz oder unklar) auf die männliche bzw. weibliche Fertilität. Aufgrund methodischer Mängel und geringer Beweislange zeigte sich die Evidenz als sehr gering, weshalb in beiden Reviews keine klaren Schlussfolgerungen zogen (E. E. Johnson et al., 2024; Kenny et al., 2024).
Auch Cordelli und Kolleg*innen untersuchten in zwei Reviews sowohl nicht-menschliche Säugetiere sowie humanes Sperma *in vitro* in insgesamt über 200 Studien mit dem Fokus auf Reproduktion, Schwangerschaft und Spermienqualität (Cordelli et al., 2023, 2024; Pacchierotti et al., 2021). Der untersuchte Frequenzbereich der eingeschlossenen Studien lag hier meist bei ≤ 2,45 GHz. Lediglich bei einer Exposition klar oberhalb der Grenzwerte zeigte sich (vermutlich thermisch bedingt) ein reduziertes fetales Gewicht.

Eine mögliche Auswirkung auf Föten durch Erwärmung wurde bereits vor vielen Jahren beschrieben (Edwards et al., 2003). Es zeigten sich bei niedriger und moderater Evidenz verminderte Schwangerschaftsraten sowie eine reduzierte Spermienzahl. Auch diese Wirkungen wurden jedoch bei Expositionsstärken oberhalb der Grenzwerte beobachtet. Zudem zeigte sich keine Dosis-Wirkung-Beziehung. Die Autor*innen kommen zu dem Schluss, dass mögliche Schlussfolgerungen auf Basis der vorliegenden Datenlage nicht hinreichend gesichert sind. Unklar bleibt weiter, ob Auswirkungen auch schon bei geringeren Expositionen bestehen.

In einem systematischen Review, in das 56 *in-vivo*- und *in-vitro*-Studien eingeschlossen wurden, wurden die Wirkungen von HF-EMF (800–2450 MHz) auf verschiedene Biomarker des oxidativen Stresses untersucht (Henschenmacher et al., 2022; Meyer et al., 2024). Die Studienergebnisse zeigten sich insgesamt inkonsistent, das Vertrauen in die Evidenz für oder gegen eine Wirkung von HF-EMF auf Parameter des oxidativen Stresses ist aufgrund hoher Bias-Risiken sehr gering.

Einordnung verschiedener Institutionen

Die Einschätzungen verschiedener nationaler und internationaler Institutionen stellen ebenfalls wichtige Referenzpunkte zum Vergleich der hier vorliegenden Ergebnisse dar. SCENIHR kam bereits 2015 zu dem Schluss, dass es auf Basis der verfügbaren Evidenz bei Einhaltung der geltenden Grenzwerte keine offensichtlichen gesundheitsschädlichen Auswirkungen gibt (SCENIHR, 2015). Gleichzeitig wurde jedoch auch die teils geringe und widersprüchliche Evidenzlage betont. SCHEER bestätigte diese Einschätzung als Nachfolgeausschuss im April 2023 erneut. Es lägen „keine mäßigen oder starken Belege für gesundheitsschädliche Auswirkungen infolge chronischer oder akuter HF-EMF-Exposition durch bestehende Technologien bei Werten unterhalb der in den Anhängen der Empfehlung 1999/519/EG des Rates und der Richtlinie 2013/35/EU festgelegten Grenzwerte“ vor (SCHEER, 2023).

Diese Einschätzung wird auch national von Gremien wie der SSK und dem BfS unterstützt. In einer Stellungnahme vom Dezember 2021 folgerte die SSK, dass in Bezug auf 5G auf Basis des aktuellen Forschungsstandes und unter Einhaltung der Grenzwerte im Frequenzbereich FR1 bis 7 GHz keine gesundheitlichen Risiken vorliegen, da sich

diese Frequenzen nicht wesentlich in ihrer Struktur etc. von denen des bisherigen Mobilfunkstandards 4G unterscheiden (SSK, 2021).
Die Ergebnisse der vorliegenden Analyse stimmen mit der Einschätzung der Institutionen überein, dass nach jetzigem Stand unterhalb der geltenden Grenzwerte keine starke Evidenz für gesundheitliche Risiken besteht.

Gleichzeitig wird jedoch auch auf Unsicherheiten bezüglicher Langzeitwirkungen, insbesondere zur Karzinogenität bei Kindern, verwiesen (BfS, 2024a).
Einige Studien liefern erste Hinweise für eine Einschätzung: Schüz und Deltour zeigten beispielsweise in einer Auswertung von Krebsregisterdaten (1979–2016), dass die Inzidenz von Gliomen, bei welchen Mobilfunknutzung als Ursache häufig diskutiert wurde, bei Erwachsenen zwischen 20–59 Jahren konstant blieb, obwohl die Mobilfunknutzung in diesem Zeitraum deutlich zugenommen hat (Schüz & Deltour, 2022). Lediglich bei Personen über 60 Jahren wurde ein Anstieg der Gliom-Neuerkrankungsrate über diesen Zeitraum beobachtet, dies lässt sich jedoch vermutlich durch verbesserte Diagnostik und Fallregistrierungen erklären und nicht durch Mobilfunknutzung, da unter anderem keine geschlechterspezifischen Unterschiede erkennbar waren, obwohl es zu Beginn der Mobiltelefonnutzung starke Unterschiede zwischen den Geschlechtern gab.
Der STOA-Bericht kommt zu dem Schluss, dass im Frequenzbereich FR1 Hinweise auf eine mögliche Karzinogenität und reproduktionstoxische Wirkungen vorliegen (Belpoggi, 2021). Das BfS kritisiert, dass es sich nicht um einen systematischen Review handle und methodische Schwächen bezüglich der Studienauswahl und fehlender Qualitätsbewertung vorliegen, was die Diskrepanz zu anderen Studienergebnissen erklären kann. Auch seien mögliche thermische Wirkungen nicht beachtet worden (BfS, 2023).
Zum Bereich FR2 deckt sich der Bericht mit den Schlussfolgerungen der vorliegenden Analyse: die Studienlage in höheren Frequenzbereichen sei insgesamt für eine Bewertung unzureichend.

Trotz der Einschätzung offizieller Institutionen, dass unterhalb der geltenden Grenzwerte keine gesundheitlichen Risiken durch HF-EMF bestehen, besteht

insbesondere für neue Technologien wie 5G teils nur ein geringes öffentliches Vertrauen in diese Bewertungen.

Ein aktueller Review von Weller und McCredden untersuchte, wie Wissenschaftler*innen, Institutionen und Bürger*innen in die öffentliche Diskussion um 5G eingebunden sind (S. Weller & McCredden, 2024). Es zeigte sich, dass die Kritik vieler Menschen nicht auf Verschwörungsideologien, sondern auf einem Wunsch nach unabhängigen und nachvollziehbaren Informationen beruht. Ein wichtiger Punkt des Reviews betrifft die unzureichende Offenlegung von Interessenskonflikten, wie es anhand der Studien von Simkó und Mattsson sowie von Karipidis gezeigt wird (Karipidis et al., 2021; Simkó & Mattsson, 2019). Simkó und Mattsson seien in einem Unternehmen beschäftigt, welches teils Aufträge für Telekommunikationsunternehmen durchführe. Karipidis wiederum sei „Doppelmitglied" – bei der australischen Strahlenschutzbehörde (ARPANSAS) und der ICNIRP. Dies ist laut Weller und McCredden von besonderer Relevanz, wenn Studien mit Null- oder negativen Ergebnisse unterrepräsentiert werden, was ein Confirmation-Bias erzeugen könne. Dies verdeutlicht, wie essenziell eine transparente Nennung von möglichen Interessenskonflikten ist.

Sie argumentieren, dass die wissenschaftlichen Bewertungen in institutionell eng verbundenen Netzwerken zirkulieren, in denen Personen mehrfach vertreten sind. Dadurch könnten unpassende Meinungen einfach systematisch ausgeblendet werden.

De Vocht und Albers teilen die Bedenken, beziehen sich jedoch eher auf einen methodischen Ansatz (de Vocht & Albers, 2022). Sie betonen, dass eine Mitgliedschaft in mehreren Institutionen nicht zwangsläufig zu einer absichtlichen Manipulation der Ergebnisse führt, jedoch eine inhaltliche „Verengung" der Diskussion begünstigen kann. Sie weisen darauf hin, dass nicht nur finanzielle Förderung der Industrie zu einem Bias führen kann, sondern auch vorbestehende Meinungen im Sinne eines „White Hat Bias" zu überzogenen Schlussfolgerungen führen können. Weder eine systematische Überschätzung noch eine Unterschätzung der Risiken durch bestimmte Gruppen sei jedoch abschließend sicher belegbar. Sie fordern eine methodisch kontrollierte Darstellung aller Studien sowie transparente Nennung potenzieller COIs.

Grundsätzlich ist somit bei der Bewertung hier zu berücksichtigen, dass Stellungnahmen öffentlicher Institutionen im Zusammenhang mit bestehenden rechtlichen, gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen entstehen. Je nach Zielsetzung (Vorsorgeprinzip, regulatorische Vorgaben, etc.) kann dies gegebenenfalls die

Gewichtung wissenschaftlicher Evidenz beeinflussen. Unterschiede zwischen wissenschaftlichen Reviews und institutionellen Bewertungen sind daher nicht nur methodischen Ursprungs, sondern können auch Ausdruck verschiedener Zielsetzungen sein.

Insgesamt stimmen die Ergebnisse der vorliegenden Teilanalyse in weiten Teilen mit bestehenden Reviews und institutionellen Bewertungen überein. Für Expositionen unterhalb der Grenzwerte konnte keine klare Evidenz für Wirkungen festgestellt werden. Oberhalb der geltenden Grenzwerte gab es teilweise Hinweise auf Wirkungen, beispielsweise im Bereich der Thermoregulation. Sowohl die vorliegende Teilanalyse als auch die WHO-Reviews zeigen, dass es wenige Studien zu Expositionen > 3 GHz gibt. Oft ist das Vertrauen in die Evidenz stark eingeschränkt: bei nahezu allen herangezogenen Reviews und Bewertungen der Institutionen zeigen sich deutliche methodische Schwächen in den analysierten Studien sowie insbesondere in höheren Frequenzbereichen eine unzureichende Datenlage. Mögliche Diskrepanzen der Ergebnisse können durch viele Parameter beeinflusst werden, z.B. Art der Exposition, Feldstärke, gewählte Tierart, Endpunkte oder Bewertungsmethoden.
Vor diesem Hintergrund wird erneut deutlich, dass weiterführende Forschung, vor allem in Bezug auf das Studiendesign, standardisiert, transparenter und methodisch hochqualitativ erfolgen muss. Wichtig sind:

1. Präzise und einheitliche Dokumentation der Expositionsbedingungen mit der Angabe wichtiger Expositionsparameter wie Frequenz, Modulationsart, SAR bzw. Leistungsflussdichte
2. Anwendung experimenteller Standards wie Verblindung und Randomisierung
3. Verwendung validierter Endpunkte, wenn möglich mit Statistik
4. Orientierung an dem OHAT-Handbuch und anerkannten Guidelines wie beispielsweise ARRIVE (siehe Kapitel 5.4).

5.2 Einschränkungen des Reviews/Limitationen

Im Folgenden werden die Limitationen der Arbeit dargelegt, um die Aussagekraft der Ergebnisse transparent und kritisch zu reflektieren sowie anschließend auch zukünftigen Arbeiten zu diesem Thema Ansatzpunkte für mögliche Verbesserungen aufzuzeigen.

Eine Einschränkung ist, dass möglicherweise einige Studien nicht durch die gewählte Suchstrategie identifiziert werden konnten, da beispielsweise relevante Schlüsselbegriffe nicht im Titel oder Abstract enthalten waren. Zudem wurden nur Artikel in deutscher und englischer Sprache mit durchlaufenem Peer-Review-Prozess berücksichtigt. Studien in anderen Sprachen oder aus sogenannter „grauer Literatur" sind daher nicht enthalten – dies könnte einige Studien ausgeschlossen haben. Aufgrund der Dominanz von Englisch als wissenschaftliche Sprache und der internationalen Diskussion zur 5G ist jedoch unwahrscheinlich, dass eine große Anzahl von relevanten Studien übersehen wurde. Die verwendeten Datenbanken decken relevante internationale Literatur umfassend ab und die Suchstrategie wurde über eine Testung mit Kernstudien validiert. Daher ist das Risiko einer wesentlichen Verzerrung der Ergebnisse als eher gering einzuschätzen.

Ein relevanter Anteil an ursprünglich potenziell relevant eingestuften Studien wurde aufgrund der Ausschlusskriterien nicht in das Review aufgenommen (n=910). Bei 761 dieser Studien war entweder die Frequenz nicht relevant, es erfolgte eine Stromanwendung oder Co-Exposition, oder die Art der Exposition war nicht klar. Beispielsweise wurde die Studie von Perov und Kolleg*innen, die eine Exposition von 3,6 GHz, 28 GHz und 37 GHz an Ratten untersuchte, ausgeschlossen, da keine separate Auswertung für den Zielfrequenzbereich erfolgte (Perov et al., 2022). Auch einige epidemiologische Studien konnten aus diesem Grund nicht berücksichtigt werden, obwohl sie zusätzliche Daten zur Wirkung von 5G-relevanter HF-EMF auf die Gesundheit liefern könnten (Bayatli, 2022; Zhang et al., 2023). Studien mit Co-Expositionen (Ausschlusskriterium) zeigten oft bei Einzelexpositionen keine relevanten Ergebnisse, im Zusammenhang mit den Ko-Expositionen jedoch schon, wodurch teils synergistische Wirkungen denkbar wären (Kostoff et al., 2020). Eine Pilotstudie des Fraunhofer Instituts ließ zunächst synergistische Effekte vermuten. Während in der durchgeführten Studie EMF allein keine karzinogene Wirkung zeigte, kam es in Kombination mit einem Kanzerogen zu einer wachstumsfördernden Wirkung (Tillmann et al., 2010). Eine vom BfS geförderte Folgestudie bestätigte dies zunächst: es zeigte sich eine tumorfördernde Wirkung in Lunge und Leber durch EMF in Kombination mit einem chemischen Karzinogen (Lerchl et al., 2015). Neuere Untersuchungen liefern jedoch differenziertere Ergebnisse: Lerchl und Kolleg*innen konnten im gleichen Tiermodell keine Zunahme von

DNA-Schäden nachweisen. Dies spricht gegen eine co-karzinogene Wirkung durch direkte genotoxische Mechanismen. Die Autor*innen schlossen daraus, dass die in früheren Studien beobachtete Tumorförderung vermutlich durch indirekte Mechanismen bedingt sei (Lerchl et al., 2020).

Ein wesentlicher methodischer Aspekt betrifft die Übertragbarkeit tierexperimenteller Studien auf den Menschen. Aktuell geltende Grenzwerte bezüglich HF-EMF sind auf Menschen abgestimmt. Kleine Tiere wie Mäuse weisen jedoch ein anderes Oberflächen-/Volumenverhältnis auf, welches günstiger für die Wärmeabgabe ist. Dies führt dazu, dass sie höhere Ganzkörper-SAR-Werte tolerieren können.
Anders verhält es sich beim lokalen SAR: hier ist der ICNIRP-Grenzwert in Form der maximalen über 10 g Gewebe gemittelten SAR definiert. Das bedeutet, dass bei einer Maus im Gegensatz zu Menschen meist eine bedeutende thermische Last besteht, da ihr Körpervolumen fast dem Mittelungsvolumen entspricht. Außerdem hängt die Energieaufnahme zusätzlich von den Körperdimensionen und entsprechenden Resonanzeffekten ab: Die maximale Energieabsorption tritt auf, wenn die Körpergröße etwa der halben Wellenlänge der Strahlung entspricht. Kleine Tiere wie Ratten und Mäuse absorbieren bei einer Frequenz von 3–4 GHz somit viel effizienter als Menschen. Der menschliche Körper wiederum kommt bei 30 MHz bis 100 MHz in den Resonanzbereich, weshalb auch der ICNIRP-Referenzwert in diesem Bereich deutlich niedriger als in anderen Frequenzbereichen festgelegt ist (EMF-Portal | Hochfrequenz (10 MHz–300 GHz)). Es besteht die Gefahr, dass Wirkungen bei tierexperimentellen Studien als Exposition unterhalb der Grenzwerte eingeordnet, obwohl faktisch die SAR auf Zielgewebe-Ebene eventuell sogar über dem liegen kann, was bei einem Menschen bei Einhaltung des Grenzwertes der Fall wäre.
Auch durch Unterschiede in wichtigen physiologischen Funktionen ist die Übertragbarkeit eingeschränkt. So verfügen viele Tiere kaum über funktionelle Schweißdrüsen und regulieren die Wärmeabgabe primär über andere Mechanismen wie Hecheln, während Schweißdrüsen beim Menschen eine zentrale Rolle für die Thermoregulation spielen (Gordon, 1993; Jablonski, 2010).
Rund 73 % der 2023 für wissenschaftliche Zwecke untersuchten Tiere in Deutschland, waren laut des Bundesinstituts für Risikobewertung Mäuse (Deutsches Zentrum zum Schutz von Versuchstieren (Bf3R), 2023). Mäuse sind in tierexperimentellen Studien

aufgrund ihrer schnellen Reproduktion, genetischer Ähnlichkeiten mit dem Menschen und leichter genetischer Veränderbarkeit weit verbreitet (Informationsinitiative Tierversuche verstehen). Tierversuche an den Augen werden oft an Kaninchen durchgeführt, da diese aufgrund von großen zugänglichen und anatomisch ähnlichen Augen besonders gut geeignet sind (Zernii et al., 2016)

Eine weitere relevante Limitation ist die mangelhafte Studienqualität der eingeschlossenen Studien – insbesondere das Bias-Risiko der Schlüsselkriterien. Aufgrund der Bewertung des Bias-Risikos jeder Studie als Ganzes gemäß dem OHAT-Handbuch, wird in einzelnen Fällen möglicherweise nicht das tatsächliche Bias-Risiko für jeden bewerteten Parameter dargestellt. Ein gutes Beispiel ist das Kriterium „Vertrauen in die Ergebnisbewertung“, wenn in einer Studie die Bewertung nur für einen Teil der Ergebnisse verblindet war, für den anderen Teil jedoch nicht. Hier wurde das Kriterium insgesamt als „nicht verblindet“ bewertet. Dies könnte in einzelnen Studien zu einer Über- oder Unterschätzung des Bias-Risikos geführt haben. Eine separate Bewertung jedes einzelnen Parameters hinsichtlich seines möglichen Bias-Risikos einzuordnen, hätte jedoch die angestrebte einheitliche Bewertung und Vergleichbarkeit der ohnehin heterogenen Studien deutlich erschwert. Vor diesem Hintergrund erscheint das etablierte Vorgehen gemäß dem OHAT-Handbuch als methodisch sinnvolle Wahl.
Ebenfalls zu berücksichtigen ist, dass Studien im untersuchten Frequenzbereich bewertet wurden, diese Expositionsszenarien jedoch möglicherweise aufgrund verschiedener Feldstärken und Amplitudenmodulationen gegenüber realen 5G-Expositionen nur eine begrenzte Aussagekraft haben. Die biologischen Wirkungen hängen wie von Kostoff und Kolleg*innen beschrieben nicht nur von der Frequenz, sondern auch von anderen Faktoren und technischen Besonderheiten wie dem „Beamforming“ bei 5G ab (Kostoff et al., 2020).
Zusätzlich verringert der Mangel an ausreichend homogenen Daten die Vergleichbarkeit der eingeschlossenen Studien und die Aussagekraft der Evidenz, da keine sinnvolle Metaanalyse durchgeführt werden konnte.

Für diese Dissertation erfolgte zudem eine Beschränkung auf die Frequenzbereiche FR1 und FR2. Für zukünftige 5G-Anwendungen im höheren Millimeterwellenbereich können auf diese Grundlage keine Rückschlüsse gezogen werden.

Schließlich konnten aktuelle Studien, welche nach August 2023 (Beendigung der Suche) veröffentlicht wurden, nicht in das Review und somit auch die Teilanalyse eingeschlossen werden.

Beispielhaft sind hier folgende Studien zu nennen:

- Intestinal microbiota via NLRP3 inflammasome dependent neuronal pyroptosis mediates anxiety-like behaviour in mice exposed to 3.5 GHz radiofrequency radiation (Zhou et al., 2024)
- Compound exposure of 2.8 GHz and 9.3 GHz microwave causes learning and memory impairment in rats (Sun et al., 2025)

Zhou und Kolleg*innen fanden bei Mäusen ein Angst-ähnliches Verhalten nach einer 3,5 GHz Exposition, begleitet von neuronalen Schäden im Hippocampus sowie Veränderungen der Darmflora. Sie stellten die Hypothese auf, dass ein Zusammenhang zwischen den Wirkungen bestehen könnte (Zhou et al., 2024). Die verwendete Leistungsflussdichte lag beim Fünffachen des geltenden ICNIRP-Referenzwertes. Sun und Kolleg*innen untersuchten an Ratten die Auswirkungen einer kombinierten Exposition mit 2,8 und 9,3 GHz auf kognitive Funktionen (Sun et al., 2025). Es zeigten sich vorübergehende Beeinträchtigungen des Lernens und Gedächtnis sowie EEG-Veränderungen und strukturelle Schädigungen des Hippocampus. Diese zeigten sich am dritten Tag nach Exposition am ausgeprägtesten und bildeten sich innerhalb von 28 Tagen vollständig zurück. Auch hier lag die Leistungsflussdichte mit dem 10-fachen des ICNIRP-Referenzwertes sehr hoch.

Beide Studien wurden somit unter Expositionsbedingungen durchgeführt, welche deutlich oberhalb der ICNIRP-Referenzwerte liegen und bestätigen lediglich bereits bekannte Hinweise zu möglichen Wirkungen bei ähnlichen Expositionen. Für die ebenfalls in dieser Teilanalyse betrachteten Endpunkte – kognitive Funktionen, Verhalten, strukturelle sowie biochemische ZNS-Veränderungen – besteht weiterhin entweder eine unzureichende Datenlage oder geringe Evidenz oberhalb der geltenden Grenzwerte. Die Ergebnisse der neuen Studien sind methodisch zudem nicht den hier analysierten Studien überlegen und rechtfertigen keine Neubewertung der Evidenz.

5.3 Konsequenzen für die Praxis

Vor dem Hintergrund des schnell fortschreitenden Ausbaus neuer Mobilfunkgenerationen und der damit einhergehenden zunehmenden individuellen und gesellschaftlichen Exposition gegenüber HF-EMF, kommt der wissenschaftlichen Untersuchung potenzieller Gesundheitsrisiken eine zentrale Rolle zu – es handelt sich um ein gesamtgesellschaftliches Gesundheits-und Sicherheitsthema.

Die vorliegende Dissertation im Rahmen des systematischen Reviews bestätigt die Ergebnisse bisheriger Reviews: Eine einheitliche Abschätzung der Studien und Evidenzbewertung ist aufgrund der Heterogenität nur schwer möglich, die Evidenz daher meist schwach. Auf Basis der gegenwärtigen Datenlage gibt es keine belastbare Evidenz für gesundheitlichen Auswirkungen durch 5G-relevante HF-EMF-Exposition im Bereich 3–4 und 20–30 GHz unterhalb der geltenden Grenzwerte. Gleichzeitig gilt jedoch auch: Für den Beweis, dass 5G sicher unschädlich ist, ist eine hohe Studienqualität erforderlich, welche hier nicht gegeben ist.

Für den Alltag bedeutet dies: auch wenn keine akute Gefährdung der Gesundheit erkennbar ist, ist es sinnvoll, unnötige Expositionen zu vermeiden - beispielsweise, indem man technische Geräte nachts nicht direkt neben das Bett legt – dies entspricht dem Vorsorgeprinzip.

In der medizinischen Praxis spielt HF-EMF bislang keine Rolle in der Ätiologie und Diagnostik von Erkrankungen, da bislang ein nicht-thermischer Wirkmechanismus nicht bestätigt werden konnte. Dennoch zeigt sich aber beispielsweise bei Menschen mit IEI-EMF ein subjektiver Leidensdruck durch ihre Symptome, auch wenn ein kausaler Zusammenhang zwischen EMF-Exposition und berichteten Symptomen nicht nachgewiesen werden konnte (siehe Kapitel 2.1). Da diese Patient*innengruppe mit 1–2 % einen relevanten Teil der Bevölkerung darstellt, sind Angebote wie umweltmedizinische Sprechstunden in der Uniklinik in Aachen mit Thematisierung der Symptome wichtig für eine unterstützende Versorgung. Sie stehen im Sinne einer ganzheitlichen Gesundheitsförderung im Gegensatz zu einer alleinigen Symptombekämpfung. Gleichzeitig zeigen Studien jedoch auch, dass vorbeugende Messungen und Studien paradoxerweise auch die Empfindungen und Wahrnehmungen intensivieren können, anstatt diese zu dämpfen (World Health Organization, 2011).

Für die ärztliche Beratung ergeben sich dadurch Schwierigkeiten: einerseits fehlt eine wissenschaftliche Grundlage für konkrete medizinische Maßnahmen, auf der anderen

Seite bestehen durchaus reale Symptome bei den betroffenen Personen. Dadurch kommt es auch auf ärztlicher Seite zu Unsicherheiten und führt insbesondere für Hausärzt*innen, welche meist als primäre Ansprechpartner*innen für verunsicherte Patient*innen dienen, zu herausfordernden Beratungssituationen. Ein Forschungsprojekt der LMU in München zeigte, dass ca. 60 % der Haus- und Kinderärzt*innen sich schlecht über die aktuelle Studienlage zu möglichen gesundheitlichen Wirkungen von EMF informiert fühlen. Auch Informationsmaterialien für betroffene Patient*innen würden fehlen (Forster et al., 2024). Um diese Unsicherheit ärztlicherseits zu reduzieren und eine wissenschaftlich fundierte Beratung sicherzustellen, ist die Etablierung und Wahrnehmung gezielter Weiterbildungs- und Schulungsangebote sinnvoll. Ein Beispiel ist das ursprünglich von der Ärztekammer Berlin zertifizierte ärztliche Schulungsangebot „Mobilfunk aus Sicht von Arzt und Patient“.

Auf Basis der hier vorliegenden Arbeit sowie der aktuellen Literaturlage, welche insbesondere unterhalb der Grenzwerte keine starke Evidenz für gesundheitliche Risiken aufzeigen, ergeben sich keine Hinweise auf einen Anpassungsbedarf gesetzlich geltender Grenzwerte oder Regulierungen. Feldmessungen in der Umgebung von 5G-Mobilfunksendeanlagen in Nordrhein-Westfalen zeigten klar, dass die gemessenen Expositionswerte deutlich unter den von der ICNIRP empfohlenen Grenzwerten lagen (Kopacz et al., 2023). Auch eine Studie aus Rumänien zeigte vergleichbare Ergebnisse (Ursăchianu et al., 2022).

Ein Monitoring der Exposition ist nach bisherigen Erkenntnissen klar für die ionisierende Strahlung relevant, welche wissenschaftlich nachgewiesen karzinogen ist (IARC, 2000). Trotzdem sollten im Sinne des Vorsorgeprinzips Arbeitsplätze mit möglicher HF-EMF-Exposition im hohem GHz-Bereich regelmäßig überprüft und Beschäftigte sollten über neue relevante wissenschaftliche Erkenntnisse informiert werden. Auch hier wäre ein Monitoring denkbar – insbesondere falls Techniken wie 5G in der Zukunft vermehrt eingesetzt werden oder andere Wirkmechanismen identifiziert werden. Hier wäre eine Kombination aus einem orts- und personenbezogenen Monitoring sowie standardisierten Symptomfragebögen denkbar. Für das personenbezogene Monitoring bieten sich Dosimeter wie das SMP2 von Wavecontrol an, welches auch Frequenzen im FR2-Bereich erfasst und gemessene Werte in Bezug auf ICNIRP-Grenzwerte einordnen

kann („Wavecontrol - SMP2“). Für das ortsbezogene Monitoring wären Geräte wie das SRM-3006 von narda Safety Test Solutions geeignet, welche codeselektiv 5G messen können und auch hier die gemessenen Werte im Verhältnis zu Grenzwerten einordnen kann (narda Safety Test Solutions - SRM-3006). Um langfristige Wirkungen in Korrelation mit Expositionsmustern zu bringen, wären strukturierte Datenerhebungen digital denkbar.

Forschungsergebnisse sollten transparent und niederschwellig der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Nur auf dieser Basis können diese als Mediator für einen aufgeklärten gesellschaftlichen Diskurs über den Nutzen sowie aber auch die Risiken von HF-EMF-Exposition und dem Aufbau neuer Mobilfunktechnologien dienen.

5.4 Forschungsaktivitäten und Forschungsbedarf

Die derzeitige Studienlage ist durch eine erhebliche methodische Inhomogenität gekennzeichnet. Dies erschwert die Vergleichbarkeit von Ergebnissen und führt im Rahmen der Evidenzsynthese häufig zu der Schlussfolgerung „inadäquat in Hinblick auf eine Wirkung“. Auch aktuelle Reviews (siehe Kapitel 1) sowie Einzelstudien sehen Forschungslücken und kommen zu dem Schluss, dass die aktuelle Forschungslage unzulänglich für eine abschließende Bewertung möglicher gesundheitlicher Risiken, insbesondere im Hinblick auf höhere Frequenzbänder im Kontext zukünftiger Mobilfunkgenerationen (z.B. 6G) ist (Lin, 2023; Redmayne & Maisch, 2023; Torkan et al., 2025).

Die Relevanz weiterer Forschung wurde in den vergangenen Jahren zunehmend anerkannt. In diesem Zusammenhang entstand im Jahr 2022 unter anderem das europäische Netzwerk CLUE-H (Cluster on Electromagnetic fields Exposure and Health), das mehr als 70 europäische Forschungsorganisationen in vier Forschungskonsortien (ETAIN, GOLiAT, NextGEM, SEAWave) vereint (CLUE-H Netzwerk).

Was sind aber nun identifizierte Forschungslücken bzw. wo besteht Forschungsbedarf und welche Empfehlungen können zukünftig zur Verbesserung der Studienqualität beachtet werden?

Eine zentrale Feststellung der vorliegenden Analyse besteht darin, dass kaum Studien im Frequenzbereich FR2 (20–30 GHz) vorliegen, was sich auch in anderen aktuellen Arbeiten zeigt (Mevissen, Fröhlich, et al., 2025). Dabei ist gerade dieser Bereich für

zukünftige Mobilfunkanwendungen von besonderer Bedeutung (Bundesnetzagentur, 2019; Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), 2019). Darüber hinaus wurde bei keiner der Studienexpositionen aus dieser Teilanalyse spezifisch die Verwendung eines 5G-Signalgenerators beschrieben.
Methodisch auffällig ist auch die oftmals geringe oder nicht dokumentierte Größe der Expositionsgruppen in den untersuchten Studien, was die Aussagekraft zusätzlich limitiert.

Eine weitere signifikante Feststellung ist die geringe Zahl an Humanstudien. Bereits im systematischen Review bestand der Großteil der eingeschlossenen Artikel aus tierexperimentellen Studien. Auch wenn solche Studien wichtige Hinweise liefern könne, ist die Übertragbarkeit auf den Menschen nur eingeschränkt möglich.
Die Mehrzahl der bisherigen Studien untersuchen meist kurzzeitige Expositionen. Angesichts der zu erwartenden lebenslangen Nutzung von Mobilfunktechnologien wären jedoch Langzeitstudien mit entsprechenden Follow-Up-Untersuchungen (> 10 Jahre) sinnvoll, um potenzielle Langzeitwirkungen erfassen zu können. Nach Einschätzung des BfS sind Langzeitwirkungen nach jetzigem Stand nicht sicher abzuschätzen – insbesondere Krebserkrankungen zeigen sich teilweise erst nach einem Zeitraum von 20–30 Jahren, wofür die Technologie „zu jung“ sei (BfS, 2024a).

Alleinige 5G-Expositionen kommen in der Realität nur selten vor. Mischexpositionen durch verschiedene EMF-Quellen im Alltag gewinnen an Bedeutung, weshalb zukünftig auch die kumulative Belastung in Studien berücksichtigt werden sollte. Dies ist, neben ethischen und datenschutzrechtlichen Aspekten, auch methodisch eine Herausforderung: Die Expositionsquellen unterscheiden sich in Nähe zum Körper und Nutzungsverhalten. Für die Summation verschiedener Expositionen wie WLAN und 5G im gleichen Frequenzbereich existiert zudem keine einheitliche Metrik. Auch mögliche additive oder synergistische Effekten durch andere Umweltfaktoren sind grundsätzlich denkbar (Kostoff et al., 2020).
Die Anzahl epidemiologischer Studien (mit guter Qualität), welche insbesondere für die Beurteilung von solchen kumulierten und langzeitigen Expositionen relevant wären, ist gering (S. G. Weller et al., 2025). Für eine gute Risikobewertung sind einerseits Studien mit alleiniger 5G-Exposition zur Analyse 5G-spezifischer Wirkungen notwendig, damit

diese in Mischexpositionsszenarien nicht überdeckt werden und zunächst isoliert bewertet werden können - im Zweifel auch anhand von kontrollierten Laborstudien. Andererseits sind realitätsnahe Studien mit typischen Mischexpositionsmustern notwendig, um reale Alltagsexpositionen zu untersuchen.

Für höhere Frequenzen, welche vermehrt oberflächlich wirken, wäre es zudem naheliegend, gezielt Organe wie die Haut oder die Augen in den Fokus zukünftiger Untersuchungen der Frequenzen zu stellen. Zu diesem Schluss kommt ebenfalls Leszczynski: Haut und Augen seien die biologisch relevantesten Zielorgane zukünftiger Expositionen (Leszczynski, 2020). Der Autor bemängelt die aktuelle Datenlage zu den Auswirkungen auf die Haut im Frequenzbereich 6–100 GHz. Diese sei unzureichend, um sowohl positive als auch negative Wirkungen zu beurteilen und sichere Empfehlungen abzugeben zu können.

Zur Verbesserung der methodischen Qualität zukünftiger Studien sollte bereits in der Planungsphase auf eine Minimierung potenzieller Bias-Risiken geachtet werden. Hierfür können neben den im OHAT-Handbuch beschriebenen Qualitätskriterien auch international anerkannte Guidelines wie CONSORT (für randomisierte Studien), STROBE (für Beobachtungsstudien) und ARRIVE (für Tierstudien) als wichtige Orientierungshilfen dienen. Diese über das EQUATOR-Netzwerk (Enhancing the QUAlity and Transparency Of health Research) verfügbaren Leitlinien helfen methodisch häufig auftretende Schwächen wie eine fehlende Verblindung oder unklare Expositionsmetriken zu vermeiden und die Transparenz und Qualität von Studien zu stärken (EQUATOR-Netzwerk).

Ein weiterer wichtiger und bisher nicht benannter Aspekt ist die Transparenz hinsichtlich potenzieller Interessenskonflikte und die Angabe von Finanzierungsquellen. In den untersuchten Studien legten die Autor*innen diese bisher nur selten offen. Keine Studie gab explizit eine Förderung aus der Industrie an.
Die „fehlende“ industrielle Förderung senkt zwar grundsätzlich das Bias-Risiko, dieses ist jedoch letztendlich aufgrund der Intransparenz bezüglich der finanziellen Förderung bei mehr als 50 % der Studien nicht quantifizierbar. Zudem besteht selbst bei öffentlicher

Förderung das Risiko eines Publikationsbias. Auch nicht-finanzielle „Conflict of Interest“ (CoI) können bspw. aufgrund von akademischen Interessen Ergebnisse verzerren. Laut Viswanathan und Kolleg*innen sollten diese bei fehlender Angabe auch als mögliche Ursache für eine Inkonsistenz der Evidenz in Erwägung gezogen werden. Gleichzeitig gilt: ein offen gelegter Interessenkonflikt oder Finanzierung durch die Industrie sollte nicht direkt zu einer Einstufung des Bias-Risikos als „hoch“ führen, sondern differenziert interpretiert und im Kontext der Ergebnisbewertung berücksichtigt werden (Viswanathan et al., 2012, 2017).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass relevanter Forschungsbedarf besteht. Nur durch methodisch hochwertige, umfassend dokumentierte und transparent durchgeführte Studien kann eine bessere Evidenz geschaffen werden, um potenzielle Gesundheitsrisiken hochfrequenter elektromagnetischer Felder in Zukunft adäquat zu beurteilen, insbesondere in höheren Frequenzbereichen wie FR2.

6 Zusammenfassung

Einleitung und Zielsetzung: Der neueste Mobilfunkstandard der 5. Generation (5G) löst Kontroversen zu möglichen Gesundheitsrisiken aus. Für etablierte Frequenzen (< 3 GHz) liegen zahlreiche Studien vor, nach denen unterhalb der empfohlenen Expositionsgrenzwerte kein Gesundheitsrisiko besteht. Für 5G (> 3 GHz) sind mögliche Wirkungen unklar. Ziel dieser Arbeit war es, tierexperimentelle Studien bei 3–4 und 20–30 GHz und beschriebene gesundheitsrelevante Wirkungen zu analysieren.

Methodik: Die Analyse ist Teil eines systematischen Reviews zu den gesundheitlichen Wirkungen von HF-EMF (3–30 GHz) auf Menschen und Säugetiere und fokussiert sich auf tierexperimentelle Studien zu den in Europa relevanten Frequenzbereichen FR1 und FR2 (3–4, 20–30 GHz). Das Review wurde gemäß PRISMA-Richtlinien erstellt und bei PROSPERO registriert (CRD42022374434). Die Literatursuche erfolgte in PubMed, dem Web of Science und dem EMF-Portal. Die Studienqualität und der Risk of Bias wurde anhand der empfohlenen Vorgehensweise des OHAT bewertet.

Ergebnisse: Es wurden 28 tierexperimentelle Studien im FR1- und fünf weitere im FR2-Bereich für die Analyse identifiziert. 22 Studien wiesen ein hohes Risiko für Bias auf (3rd-tier; Ausschluss aus der Evidenzsynthese). Weiterhin fanden sich sieben 2nd-tier-Studien und vier 1st-tier-Studien. 94% der Studien berichteten von Wirkungen. Es zeigte sich eine moderate Evidenz für Effekte auf die Thermoregulation sowie geringe Evidenz für Effekte auf Verhalten und Antikörperproduktion – jeweils oberhalb der Grenzwerte. Unterhalb der Grenzwerte ergab sich keine belastbare Evidenz.

Schlussfolgerungen: Die Studien zeigen sich inhomogen mit deutlichem Bias-Risiko. Insbesondere viele 3rd-tier-Studien berichten von Wirkungen. Unterhalb der geltenden Grenzwerte fand sich keine Evidenz, oberhalb sind thermische Effekte plausibel. Die Datenlage im FR2-Bereich ist qualitativ und quantitativ unzureichend; Schlussfolgerungen zu gesundheitlichen Wirkungen sind nicht möglich. Die Übertragbarkeit tierexperimenteller Studien auf den Menschen ist kritisch zu diskutieren. Ein regulatorischer Anpassungsbedarf besteht derzeit nicht, Vorsorge ist dennoch sinnvoll. Zukünftige Forschung sollte sich auf den FR2-Bereich, Langzeit- und Humanstudien mit realistischen Expositionen konzentrieren sowie die methodische Qualität verbessern.

Introduction and aim: The latest 5th generation (5G) mobile communications standard is causing controversy regarding possible health risks. Numerous studies are available for established frequencies (< 3 GHz), according to which there is no health risk below the recommended exposure limits. For 5G (> 3 GHz), the possible effects are unclear. The aim was to analyse animal studies at 3–4 and 20–30 GHz and the health effects described.

Methods: The analysis is part of a systematic review on the health effects of RF-EMF (3–30 GHz) on humans and mammals and focuses on animal studies within the frequency ranges FR1 and FR2 (3–4, 20–30 GHz), which are relevant in Europe. The review was generated in accordance with PRISMA-guidelines and registered in PROSPERO (CRD42022374434). The literature search was conducted in PubMed, Web of Science and the EMF-Portal. Study quality and risk of bias were assessed using the recommended OHAT-tool.

Results: Twenty-eight animal studies in FR1 and five additional studies in FR2 were identified for analysis. Twenty-two studies were at high risk of bias (3rd tier; excluded from the evidence synthesis). Furthermore, seven 2nd-tier studies and four 1st-tier studies were found. 94% of the studies reported effects. There was moderate evidence for effects on thermoregulation and low evidence for effects on behaviour and antibody production – in each case above the current limit values. Below the limit values, there was no reliable evidence.

Conclusion: The studies are heterogeneous with a clear risk of bias. Many 3rd-tier studies in particular report effects. No evidence was found below the limit values; above these values, thermal effects are plausible. The data available in the FR2 range are insufficient in terms of quality and quantity; it is not possible to draw conclusions about health effects. The transferability of animal studies to humans must be critically discussed. There is currently no need for regulatory adjustments, but precautionary measures are nevertheless advisable. Future research should focus on the FR2 range, long-term and human studies with realistic exposures, and improving methodological quality.

Literatur

5G-PPP. (2024). 5G Infrastructure Public-Private Partnership. https://5g-ppp.eu/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

5URVIVE. (2024). 5G-basierte Umfassende Strategie zuR Verbesserung des Überlebens In der NotfallVErsorgung. https://5urvive.de/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Agrawal, V., Agrawal, S., Bomanwar, A., Dubey, T., & Jaiswal, A. (2023). Exploring the Risks, Benefits, Advances, and Challenges in Internet Integration in Medicine With the Advent of 5G Technology: A Comprehensive Review. *Cureus*, *15*(11), e48767. https://doi.org/10.7759/cureus.48767

ANSES. (2022). *OPINION 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 - Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l’alimentation, de l’environnement et Du Travail. https://www.anses.fr/en/content/anses-opinion-population-exposure-electromagnetic-fields-associated-deployment-5g (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Appleton, B., Hirsch, S. E., & Brown, P. V. (1975). Investigation of single-exposure microwave ocular effects at 3000 MHz. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *247*, 125–134. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1975.tb35989.x

Asadi-Pooya, A. A. (2023). Havana syndrome: A scoping review of the existing literature. *Reviews on Environmental Health*, *38*(4), 655–661. https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0182

Balshem, H., Helfand, M., Schünemann, H. J., Oxman, A. D., Kunz, R., Brozek, J., Vist, G. E., Falck-Ytter, Y., Meerpohl, J., Norris, S., & Guyatt, G. H. (2011). GRADE guidelines: 3. Rating the quality of evidence. *Journal of Clinical Epidemiology*, *64*(4), 401–406. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2010.07.015

Baranski, S. (1971). Effect of chronic microwave irradiation on the blood forming system of guinea pigs and rabbits. *Aerospace Medicine*, *42*(11), 1196–1199. https://www.emf-portal.org/de/article/9038 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Barański, S. (1972a). [Effect of microwaves on the reactions of the WBC system]. *Acta Physiologica Polonica*, *23*(4), 619–629. https://www.emf-portal.org/de/article/9037 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Barański, S. (1972b). Histological and histochemical effect of microwave irradiation on the central nervous system of rabbits and guinea pigs. *American Journal of Physical Medicine*, *51*(4), 182–191. https://www.emf-portal.org/de/article/604 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Barański, S., & Edelwejn, Z. (1967). [Electroencephalographic and morphological studies on the effect of microwaves on the central nervous system]. *Acta Physiologica Polonica*, *18*(4), 517–532. https://www.emf-portal.org/de/article/3597 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Bayatli, E. (2022). Epidemiological Markers in Adult Glial Tumors: A Single-Center Experience and The Utility of the Classification System. *Turkish Journal of Oncology*. https://doi.org/10.5505/tjo.2021.3441

Bektas, H., Algul, S., Altindag, F., Yegin, K., Akdag, M. Z., & Dasdag, S. (2022). Effects of 3.5 GHz radiofrequency radiation on ghrelin, nesfatin-1, and irisin level in diabetic and healthy brains. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, *126*, 102168. https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2022.102168

Bektas, H., Dasdag, S., Nalbant, A., Akdag, M. B., Demir, C., & Kavak, S. (2023). 3.5 GHz radiofrequency radiation may affect biomechanics of bone and muscle of diabetics. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, *37*(1), 2199096. https://doi.org/10.1080/13102818.2023.2199096

Belpoggi, F. (2021). *Health impact of 5G: Current state of knowledge of 5G related carcinogenic and reproductive/developmental hazards as they emerge from epidemiological studies and in vivo experimental studies.* Publications Office. https://doi.org/10.2861/657478

Benke, G., Abramson, M. J., Brzozek, C., McDonald, S., Kelsall, H., Sanagou, M., Zeleke, B. M., Kaufman, J., Brennan, S., Verbeek, J., & Karipidis, K. (2024). The effects of radiofrequency exposure on cognition: A systematic review and meta-analysis of human observational studies. *Environment International*, *188*, 108779. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108779

Benke, G., Abramson, M. J., Zeleke, B. M., Kaufman, J., Karipidis, K., Kelsall, H., McDonald, S., Brzozek, C., Feychting, M., & Brennan, S. (2022). The effect of long-term radiofrequency exposure on cognition in human observational studies: A protocol for a systematic review. *Environment International*, *159*, 106972. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106972

Bertharion, G., Servantie, B., & Joly, R. (1971). Electro-Cortico-Graphic Modifications After Exposure to Microwave Fields, on the White Rat. *Journal of Microwave Power*, *6*(1), 62–63. https://doi.org/10.1080/00222739.1971.11688786

BfS. (2021a). *Langzeitstudie an Mäusen und Ratten zu Ganzkörperexposition mit Mobilfunkfeldern (NTP-Studie)*. Bundesamt für Strahlenschutz; BfS. https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/emf/stellungnahmen/ntp-studie/dossier-ntp-studie.html?cms_docId=12006154&cms_notFirst=true (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

BfS. (2021b). *Sensibel für Mobilfunk?* BfS. https://www.bfs.de/DE/mediathek/alltag/emf/emf-stimmen-von-der-strasse-elektrosensibilitaet.html (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

BfS. (2023). *STOA-Bericht Health Impact of 5G*. BfS. https://www.bfs.de/DE/themen/emf/kompetenzzentrum/berichte/berichte-mobilfunk/stoa.html (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

BfS. (2024a). *5G*. BfS. https://www.bfs.de/DE/themen/emf/mobilfunk/basiswissen/5g/5g.html (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

BfS. (2024b). *Langzeitstudie an Ratten zu Ganzkörperexposition mit Mobilfunkfeldern (Ramazzini-Studie)*. Bundesamt für Strahlenschutz; BfS. https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/emf/stellungnahmen/langzeitstudie-ratten-ramazzini.html (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

BfS. (2025). *Bundesamt für Strahlenschutz*. https://www.bfs.de/DE/home/home_node.html (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

BfS - Elektromagnetische Felder. (o. J.). https://www.bfs.de/DE/themen/emf/emf_node.html (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Birnbaum, L. S., Thayer, K. A., Bucher, J. R., & Wolfe, M. S. (2013). Implementing Systematic Review at the National Toxicology Program: Status and Next Steps. *Environmental Health Perspectives*, *121*(4), a108–a109. https://doi.org/10.1289/ehp.1306711

BMVU. (2025). *Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit*. https://www.bundesumweltministerium.de/WS1 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Bodewein, L., Dechent, D., Graefrath, D., Kraus, T., Krause, T., & Driessen, S. (2022a). Systematic review of the physiological and health-related effects of radiofrequency electromagnetic field exposure from wireless communication devices on children and adolescents in experimental and epidemiological human studies. *PLOS ONE*, *17*(6), e0268641. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268641

Bosch-Capblanch, X., Esu, E., Dongus, S., Oringanje, C. M., Jalilian, H., Eyers, J., Oftedal, G., Meremikwu, M., & Röösli, M. (2022). The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A protocol for a systematic review of human experimental studies. *Environment International*, *158*, 106953. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106953

Bosch-Capblanch, X., Esu, E., Oringanje, C. M., Dongus, S., Jalilian, H., Eyers, J., Auer, C., Meremikwu, M., & Röösli, M. (2024). The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A systematic review of human experimental studies. *Environment International*, *187*, 108612. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108612

Bruns, A., Harrington, S., & Hurcombe, E. (2020). 'Corona? 5G? or both?': the dynamics of COVID-19/5G conspiracy theories on Facebook. *Media International Australia*, *177*(1), 12–29. https://doi.org/10.1177/1329878X20946113

Bundesministerium für Digitales und Verkehr. (2024). *Deutschland spricht über 5G*. https://www.deutschland-spricht-ueber-5G.de/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Bundesnetzagentur. (2019). *Entwurf grundlegender Rahmenbedingungen zur Nutzung des Frequenzbereichs 24,25–27,5 GHz durch lokale Anwendungen*. Bundesnetzagentur. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/LokaleNetze/20191220_EntwurfGrundlegendeRahmenbedingen26GHz.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Cain, C. A., & Rissmann, W. J. (1978). Mammalian Auditory Responses to 3.0 GHz Microwave Pulses. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, *BME-25*(3), 288–293. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. https://doi.org/10.1109/TBME.1978.326343

Chiang, H., & Yao, G. D. (1987). Effects of Pulsed Microwave Radiation Pre -and Post-Natally on the Developing Brain in Mice. *Journal of Bioelectricity*, *6*(2), 197–204. https://doi.org/10.3109/15368378709027739

Chiang, H., Yao, G., & Zhou, S. (1984). Effects of Microwave Exposure at Various Power Densities on Mitochondrial Marker Enzymes in Mouse Brains. *Journal of Bioelectricity*, *3*(3), 361–366. https://doi.org/10.3109/15368378409027701

Chiaraviglio, L., Elzanaty, A., & Alouini, M.-S. (2021). Health Risks Associated With 5G Exposure: A View From the Communications Engineering Perspective. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, *2*, 2131–2179. IEEE Open Journal of the Communications Society. https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2021.3106052

CLUE-H Netzwerk. (o. J.). *European Cluster EMF and Health*. https://www.emf-health-cluster.eu/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Cooper, H. (2017). *Research Synthesis and Meta-Analysis: A Step-by-Step Approach*. SAGE Publications, Inc. https://doi.org/10.4135/9781071878644

Cordelli, E., Ardoino, L., Benassi, B., Consales, C., Eleuteri, P., Marino, C., Sciortino, M., Villani, P., Brinkworth, M. H., Chen, G., McNamee, J. P., Wood, A. W., Belackova, L., Verbeek, J., & Pacchierotti, F. (2023). Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) exposure on pregnancy and birth outcomes: A systematic review of experimental studies on non-human mammals. *Environment International*, *180*, 108178. https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108178

Cordelli, E., Ardoino, L., Benassi, B., Consales, C., Eleuteri, P., Marino, C., Sciortino, M., Villani, P., H. Brinkworth, M., Chen, G., P. McNamee, J., Wood, A. W., Belackova, L., Verbeek, J., & Pacchierotti, F. (2024). Effects of radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure on male fertility: A systematic review of experimental studies on non-human mammals and human sperm *in vitro*. *Environment International*, *185*, 108509. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108509

de Seze, R., Poutriquet, C., Gamez, C., Maillot-Maréchal, E., Robidel, F., Lecomte, A., & Fonta, C. (2020). Repeated exposure to nanosecond high power pulsed microwaves increases cancer incidence in rat. *PLoS ONE*, *15*(4), e0226858. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226858

de Vocht, F., & Albers, P. (2022). The population health effects from 5G: Controlling the narrative. *Frontiers in Public Health*, Sec. Radiation and Health, Vol. 10-2022 https://www.frontiersin.org/journals/public-health/articles/10.3389/fpubh.2022.1082031 https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1082031

Deichmann, W. B., Miale, J., & Landeen, K. (1964). EFFECT OF MICROWAVE RADIATION ON THE HEMOPOIETIC SYSTEM OF THE RAT. *Toxicology and Applied Pharmacology*, *6*, 71–77. https://doi.org/10.1016/0041-008x(64)90023-7

Deichmann, W. B., Stephens, F. H., Keplinger, M., & Lampe, K. F. (1959). Acute Effects of Microwave Radiation on Experimental Animals (24,000 Megacycles). *Journal of Occupational Medicine*, *1*(7), 369–381. https://www.emf-portal.org/de/article/50359 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Deutsche Bahn. (2022). *Digitale S-Bahn Hamburg*. https://digitale-schiene-deutschland.de/de/projekte/DigitaleS-Bahn-Hamburg (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Deutsches Zentrum zum Schutz von Versuchstieren (Bf3R). (2023). *Versuchstierzahlen 2023*. Deutsches Zentrum zum Schutz von Versuchstieren (Bf3R). https://www.bf3r.de/angebote/versuchstierzahlen/versuchstierzahlen-2023/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Devi, D. H., Duraisamy, K., Armghan, A., Alsharari, M., Aliqab, K., Sorathiya, V., Das, S., & Rashid, N. (2023). 5G Technology in Healthcare and Wearable Devices: A Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *23*(5), 2519. https://doi.org/10.3390/s23052519

Di Ciaula, A. (2018). Towards 5G communication systems: Are there health implications? *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, *221*(3), 367–375. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2018.01.011

Di Ciaula, A., Petronio, M. G., Bersani, F., & Belpoggi, F. (2025). Exposure to radiofrequency electromagnetic fields and risk of cancer: Epidemiology is not enough! *Environment International*, *196*, 109275. https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109275

Directive (EU) 2018/1972 (2018). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L1972 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Edwards, M. J., Saunders, R. D., & Shiota, K. (2003). Effects of heat on embryos and foetuses. *International Journal of Hyperthermia: The Official Journal of European Society for Hyperthermic Oncology, North American Hyperthermia Group*, *19*(3), 295–324. https://doi.org/10.1080/0265673021000039628

Egger, M. (2001). *Systematic Reviews in Health Care* (1. Aufl.). John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/9780470693926

Eltiti, S., Wallace, D., Russo, R., & Fox, E. (2018). Symptom Presentation in Idiopathic Environmental Intolerance With Attribution to Electromagnetic Fields: Evidence for a Nocebo Effect Based on Data Re-Analyzed From Two Previous Provocation Studies. *Frontiers in Psychology*, *9*, 1563. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01563

EMF-Portal | Elektromagnetisches Spektrum. (o. J.). https://www.emf-portal.org/de/cms/page/home/technology/general/electromagnetic-spectrum (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

EMF-Portal | Hochfrequenz (10 MHz–300 GHz). (o. J.). https://www.emf-portal.org/de/cms/page/home/effects/radio-frequency (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

EQUATOR-Netzwerk. (o. J.). *Enhancing the QUAlity and Transparency Of Health Research*. https://www.equator-network.org/ (Zuletzt abgerufen am 07.09.2025)

Europäische Kommission. (2016). *Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen 5G für Europa: Ein Aktionsplan*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016DC0588 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Europäische Kommission. (2020). *The Commission adopts Implementing Regulation to pave the way for high capacity 5G network infrastructure | Shaping Europe's digital future*. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/commission-adopts-implementing-regulation-pave-way-high-capacity-5g-network-infrastructure (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Europäische Kommission. (2023). *Bericht 2023 über den Stand der digitalen Dekade | Gestaltung der digitalen Zukunft Europas*. https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/library/2023-report-state-digital-decade (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

European 5G Observatory. (2023). *Report 19, October 2023 – 5G Observatory*. https://5gobservatory.eu/report-19-october-2023/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

European 5G Observatory. (2024). *Digital Decade 2024: 5G Observatory Report | Shaping Europe's digital future*. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/digital-decade-2024-5g-observatory-report (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Falcioni, L., Bua, L., Tibaldi, E., Lauriola, M., De Angelis, L., Gnudi, F., Mandrioli, D., Manservigi, M., Manservisi, F., Manzoli, I., Menghetti, I., Montella, R., Panzacchi, S., Sgargi, D., Strollo, V., Vornoli, A., & Belpoggi, F. (2018). Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission. *Environmental Research*, *165*, 496–503. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.037

Forster, F., Riesmeyer, C., Ermel, L., & Weinmann, T. (2024). *Risiken elektromagnetischer Felder aus Sicht von Allgemeinmediziner*innen und Kinderärzt*innen in Deutschland II - Vorhaben 3621EMF110*. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2024042343246 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Frank, J. W., Moskowitz, J. M., Melnick, R. L., Hardell, L., Philips, A., Héroux, P., & Kelley, E. (2025). The Systematic Review on RF-EMF Exposure and Cancer by Karipidis et al. (2024) has Serious Flaws that Undermine the Validity of the Study's Conclusions. *Environment International*, *195*, 109200. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109200

Frey, A. H., & Messenger, R. (1973). Human Perception of Illumination with Pulsed Ultrahigh-Frequency Electromagnetic Energy. *Science*, *181*(4097), 356–358. https://doi.org/10.1126/science.181.4097.356

Frick, U., Hauser, S., Landgrebe, M., & Eichhammer, P. (2009). *Untersuchung des Phänomens „Elektrosensibilität" mittels einer epidemiologischen Studie an*

„elektrosensiblen“ Patienten einschließlich der Erfassung klinischer Parameter. https://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/biologie/biologie_abges/bio_015.html/printversion.html (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Fu, Y., Ji, Z., Ding, W., Ye, F., & Lou, C. (2014). Thermoacoustic imaging over large field of view for three-dimensional breast tumor localization: A phantom study. *Medical Physics*, *41*(11), 110701. https://doi.org/10.1118/1.4898101

Gallucci, S., Fiocchi, S., Bonato, M., Chiaramello, E., Tognola, G., & Parazzini, M. (2022). Exposure Assessment to Radiofrequency Electromagnetic Fields in Occupational Military Scenarios: A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(2), 920. https://doi.org/10.3390/ijerph19020920

Gordon, C. J. (1993). *Temperature Regulation in Laboratory Rodents*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511565595

Granholm, A., Alhazzani, W., & Møller, M. H. (2019). Use of the GRADE approach in systematic reviews and guidelines. *British Journal of Anaesthesia*, *123*(5), 554–559. https://doi.org/10.1016/j.bja.2019.08.015

Gunn, S. A., Gould, T. C., & Anderson, W. A. (1961). The effect of microwave radiation on morphology and function of rat testis. *Laboratory Investigation; a Journal of Technical Methods and Pathology*, *10*, 301–314. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/13709782 (Zuletzt abgerufen am 10.09.2025)

Gupta, A. K., Venkataraman, M., Joshi, L. T., & Cooper, E. A. (2022). Potential use of microwave technology in dermatology. *Journal of Dermatological Treatment*, *33*(7), 2899–2910. https://doi.org/10.1080/09546634.2022.2089333

Hardell, L., & Nilsson, M. (2025). A Critical Analysis of the World Health Organization (WHO) Systematic Review 2024 on Radiofrequency Radiation Exposure and Cancer Risks. *Journal of Cancer Science and Clinical Therapeutics*, 09–26. https://doi.org/10.26502/jcsct.5079261

Heck, J. (2019). Macht Strahlung krank? Das sagt die Forschung. *quarks.de*. https://www.quarks.de/gesundheit/macht-strahlung-krank-das-sagt-die-forschung/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Henschenmacher, B., Bitsch, A., de las Heras Gala, T., Forman, H. J., Fragoulis, A., Ghezzi, P., Kellner, R., Koch, W., Kuhne, J., Sachno, D., Schmid, G., Tsaioun, K., Verbeek,

J., & Wright, R. (2022). The effect of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) on biomarkers of oxidative stress *in vivo* and *in vitro*: A protocol for a systematic review. *Environment International*, *158*, 106932. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106932

Higgins, J., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M., & Welch, V. (2023). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions version 6.4 (updated August 2023)*. https://training.cochrane.org/handbook (Zuletzt abgerufen am 14.04.2024)

Hinrikus, H., Koppel, T., Lass, J., Orru, H., Roosipuu, P., & Bachmann, M. (2022). Possible health effects on the human brain by various generations of mobile telecommunication: A review based estimation of 5G impact. *International Journal of Radiation Biology*, *98*(7), 1210–1221. https://doi.org/10.1080/09553002.2022.2026516

Hirsch, S. E., Appleton, B., Fine, B. S., & Brown, P. V. (1977). Effects of repeated microwave irradiations to the albino rabbit eye. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, *16*(4), 315–319. (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Huss, A., Poulsen, A. H., Sauter, C., Poutiller de Gannes, F., de Vocht, F., Schmidt, J.-A., Scarfi, M., & Pinto, R. (2025). *Recent Research on electromagnetic fields and Health Risk, nineteenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2024*. SSM's (Swedish Radiation Safety Authority) Scientifc Council on Electromagnetic Fields. https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/en/publications/reports/radiation-protection/2025/202504/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

IARC. (2000). Ionizing radiation, part 1: X- and gamma-radiation, and neutrons. Overall introduction. *Iarc Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, *75*(PT 1), 35–115. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK401325/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

IARC. (2013). *Non-ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields: Bd. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans* (Volume 102). International Agency for Research on Cancer. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304630/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

ICNIRP. (2020a). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, *118*(5), 483–524. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210

ICNIRP. (2020b). ICNIRP Note: Critical Evaluation of Two Radiofrequency Electromagnetic Field Animal Carcinogenicity Studies Published in 2018. *Health Physics*, *118*(5), 525–532. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001137

IEEE. (2019). IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. *IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019)*, 1–312. IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019). https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8859679

Ijima, E., Kodera, S., Hirata, A., Hikage, T., Matsumoto, A., Ishitake, T., & Masuda, H. (2023). Excessive whole-body exposure to 28 GHz quasi-millimeter wave induces thermoregulation accompanied by a change in skin blood flow proportion in rats. *Frontiers in Public Health*, *11*, 1225896. https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1225896

Ijima, E., Li, K., Hikage, T., Nagai, A., Murakami, Y., Arima, T., Ishitake, T., & Masuda, H. (2023). Intensity-dependent Temperature Rise Induced by Local Exposure to 26.5 GHz Quasi-Millimeter-Wave in Rat. *In Vivo (Athens, Greece)*, *37*(5), 2092–2099. https://doi.org/10.21873/invivo.13306

Informationsinitiative Tierversuche verstehen. (o. J.). Tierarten und ihr Einsatz in der Forschung. *Tierversuche verstehen*. https://www.tierversuche-verstehen.de/tierarten-und-ihr-einsatz-in-der-forschung/ (Zuletzt abgerufen am 06.09.2025)

Informationszentrum Mobilfunk. (2018). Was sagt der SAR-Wert aus? *Informationszentrum-Mobilfunk*. https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/2018/11/12/was-sagt-der-sar-wert-aus/ (Zuletzt abgerufen am 06.09.2025)

International Telecommunication Union. (2023). *Measuring Digital Development—Facts and Figures 2023*. ITU Hub. https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-ict_mdd-2023-1/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Jablonski, N. G. (2010). *The Naked Truth: Why Humans Have No Fur*. Scientific American. https://www.scientificamerican.com/article/the-naked-truth-why-humans-have-no-fur/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Jain, S., & Jain, P. K. (2022). 5G Technology for healthcare and its health effects: Wonders, dangers, and diligence. *Journal of Family Medicine and Primary Care*, *11*(11), 6683–6686. https://doi.org/10.4103/jfmpc.jfmpc_1426_22

Jazyah, Y. H. (2024). Thermal and Nonthermal Effects of 5 G Radio-Waves on Human's Tissue. *The Scientific World Journal*, *2024*(1), 3801604. https://doi.org/10.1155/2024/3801604

Johnson, E. E., Kenny, R. P. W., Adesanya, A. M., Richmond, C., Beyer, F., Calderon, C., Rankin, J., Pearce, M. S., Toledano, M., Craig, D., & Pearson, F. (2024). The effects of radiofrequency exposure on adverse female reproductive outcomes: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. *Environment International*, *190*, 108816. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108816

Johnson, P. I., Sutton, P., Atchley, D. S., Koustas, E., Lam, J., Sen, S., Robinson, K. A., Axelrad, D. A., & Woodruff, T. J. (2014). The Navigation Guide—Evidence-Based Medicine Meets Environmental Health: Systematic Review of Human Evidence for PFOA Effects on Fetal Growth. *Environmental Health Perspectives*, *122*(10), 1028–1039. https://doi.org/10.1289/ehp.1307893

Joseph, A. M., Fernandez, V., Kritzman, S., Eaddy, I., Cook, O. M., Lambros, S., Jara Silva, C. E., Arguelles, D., Abraham, C., Dorgham, N., Gilbert, Z. A., Chacko, L., Hirpara, R. J., Mayi, B. S., & Jacobs, R. J. (2022). COVID-19 Misinformation on Social Media: A Scoping Review. *Cureus*, *14*(4), e24601. https://doi.org/10.7759/cureus.24601

Kang, C. C., Lee, T. Y., Lim, W. F., & Yeo, W. W. Y. (2023). Opportunities and challenges of 5G network technology toward precision medicine. *Clinical and Translational Science*, *16*(11), 2078–2094. https://doi.org/10.1111/cts.13640

Karipidis, K., Baaken, D., Loney, T., Blettner, M., Brzozek, C., Elwood, M., Narh, C., Orsini, N., Röösli, M., Paulo, M. S., & Lagorio, S. (2024). The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A systematic review of human observational studies - Part I: Most researched outcomes. *Environment International*, *191*, 108983. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108983

Karipidis, K., Baaken, D., Loney, T., Blettner, M., Mate, R., Brzozek, C., Elwood, M., Narh, C., Orsini, N., Röösli, M., Paulo, M. S., & Lagorio, S. (2025). The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A systematic review of human observational studies - Part II: Less researched outcomes. *Environment International*, *196*, 109274. https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109274

Karipidis, K., Mate, R., Urban, D., Tinker, R., & Wood, A. (2021). 5G mobile networks and health-a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, *31*(4), 585–605. https://doi.org/10.1038/s41370-021-00297-6

Kaul, G. (2009). *BAuA - Repositorium—Was verursacht „elektromagnetische Hypersensibilität“? - Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*. https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F5212.html (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Kaur, P., Rai, U., & Singh, R. (2023). Genotoxic Risks to Male Reproductive Health from Radiofrequency Radiation. *Cells*, *12*(4), 594. https://doi.org/10.3390/cells12040594

Kenny, R. P. W., Evelynne Johnson, E., Adesanya, A. M., Richmond, C., Beyer, F., Calderon, C., Rankin, J., Pearce, M. S., Toledano, M., Craig, D., & Pearson, F. (2024). The effects of radiofrequency exposure on male fertility: A systematic review of human observational studies with dose-response meta-analysis. *Environment International*, *190*, 108817. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108817

Kopacz, T., Schiffarth, A.-M., Wuschek, M., & Bornkessel, C. (2023). *Elektromagnetische Felder in NRW - Feldmessungen im Umfeld von 5G-Mobilfunksendeanlagen*. https://www.emf-portal.org/de/article/51667 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Kössler, F., Lange, F., Kupfer, J., & Rothe, R. (1981). [Effect of low-intensity microwave radiation on body weight, spontaneous activity and blood values in mice in a long-term experiment]. *Zeitschrift Fur Die Gesamte Hygiene Und Ihre Grenzgebiete*, *27*(1), 44–47. https://www.emf-portal.org/de/article/49443 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Kostoff, R. N., Heroux, P., Aschner, M., & Tsatsakis, A. (2020). Adverse health effects of 5G mobile networking technology under real-life conditions. *Toxicology Letters*, *323*, 35–40. https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.01.020

Koustas, E., Lam, J., Sutton, P., Johnson, P. I., Atchley, D. S., Sen, S., Robinson, K. A., Axelrad, D. A., & Woodruff, T. J. (2014). The Navigation Guide—Evidence-Based Medicine Meets Environmental Health: Systematic Review of Nonhuman Evidence for PFOA Effects on Fetal Growth. *Environmental Health Perspectives*, *122*(10), 1015–1027. https://doi.org/10.1289/ehp.1307177

Kurnaz, C., & Mutlu, M. (2020). Comprehensive radiofrequency electromagnetic field measurements and assessments: A city center example. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(6), 334. https://doi.org/10.1007/s10661-020-08312-3

Ladics, G. S. (2007). Primary Immune Response to Sheep Red Blood Cells (SRBC) as the Conventional T-Cell Dependent Antibody Response (TDAR) Test. *Journal of Immunotoxicology*, *4*(2), 149–152. https://doi.org/10.1080/15476910701337357

Lagorio, S., Blettner, M., Baaken, D., Feychting, M., Karipidis, K., Loney, T., Orsini, N., Röösli, M., Paulo, M. S., & Elwood, M. (2021). The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A protocol for a systematic review of human observational studies. *Environment International*, *157*, 106828. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106828

Lerchl, A., Klose, M., & Drees (née Grote), K. (2020). No Increased DNA Damage Observed in the Brain, Liver, and Lung of Fetal Mice Treated With Ethylnitrosourea and Exposed to UMTS Radiofrequency Electromagnetic Fields. *Bioelectromagnetics*, *41*(8), 611–616. https://doi.org/10.1002/bem.22301

Lerchl, A., Klose, M., Grote, K., Wilhelm, A. F. X., Spathmann, O., Fiedler, T., Streckert, J., Hansen, V., & Clemens, M. (2015). Tumor promotion by exposure to radiofrequency electromagnetic fields below exposure limits for humans. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *459*(4), 585–590. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2015.02.151

Leszczynski, D. (2020). Physiological effects of millimeter-waves on skin and skin cells: An overview of the to-date published studies. *Reviews on Environmental Health*, *35*(4), 493–515. https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0056

Li, D. (2019). 5G and intelligence medicine—How the next generation of wireless technology will reconstruct healthcare? *Precision Clinical Medicine*, *2*(4), 205–208. https://doi.org/10.1093/pcmedi/pbz020

Lin, J. C. (2022). The Microwave Auditory Effect. *IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology*, *6*(1), 16–28. IEEE Journal of Electromagnetics, RF and Microwaves in Medicine and Biology. https://doi.org/10.1109/JERM.2021.3062826

Lin, J. C. (2023). Incongruities in recently revised radiofrequency exposure guidelines and standards. *Environmental Research*, *222*, 115369. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115369

Marques, M. M., Berrington de Gonzalez, A., Beland, F. A., Browne, P., Demers, P. A., Lachenmeier, D. W., Bahadori, T., Barupal, D. K., Belpoggi, F., Comba, P., Dai, M., Daniels, R. D., Ferreccio, C., Grigoriev, O. A., Hong, Y.-C., Hoover, R. N., Kanno, J., Kogevinas, M., Lasfargues, G., … Guyton, K. Z. (2019). Advisory Group recommendations on priorities for the IARC Monographs. *The Lancet Oncology*, *20*(6), 763–764. https://doi.org/10.1016/S1470-2045(19)30246-3

Mevissen, M., Ducray, A., Ward, J. M., Kopp-Schneider, A., McNamee, J. P., Wood, A. W., Rivero, T. M., & Straif, K. (2025). Effects of radiofrequency electromagnetic field exposure on cancer in laboratory animal studies, a systematic review. *Environment International*, *199*, 109482. https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109482

Mevissen, M., Fröhlich, J., & Schürmann, D. (2025). *Elektromagnetische Felder im Frequenzbereich 5.8-200 GHz – Biologische Effekte und Konsequenzen für die Gesundheit*. https://www.emf-portal.org/de/article/59820 (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Mevissen, M., Ward, J. M., Kopp-Schneider, A., McNamee, J. P., Wood, A. W., Rivero, T. M., Thayer, K., & Straif, K. (2022). Effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF EMF) on cancer in laboratory animal studies: A protocol for a systematic review. *Environment International*, *161*, 107106. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107106

Meyer, F., Bitsch, A., Forman, H. J., Fragoulis, A., Ghezzi, P., Henschenmacher, B., Kellner, R., Kuhne, J., Ludwig, T., Sachno, D., Schmid, G., Tsaioun, K., Verbeek, J., & Wright, R. (2024). The effects of radiofrequency electromagnetic field exposure

on biomarkers of oxidative stress in vivo and in vitro: A systematic review of experimental studies. *Environment International*, *194*, 108940. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108940

Ministerie van Volksgezondheid, W. en S. (2020). *5G and health—Advisory report—The Health Council of the Netherlands* [Publicatie]. Ministerie van Volksgezondheid, Welzijn en Sport. https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2020/09/02/5g-and-health (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, *6*(7), e1000097. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097

Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., Stewart, L. A., & PRISMA-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Systematic Reviews*, *4*(1), 1. https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1

Morgan, R. L., Whaley, P., Thayer, K. A., & Schünemann, H. J. (2018). Identifying the PECO: A framework for formulating good questions to explore the association of environmental and other exposures with health outcomes. *Environment International*, *121*, 1027–1031. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.015

Moussa, S. (2009). Oxidative stress in rats exposed to microwave radiation. *Rom J Biophys*, *19*. https://www.rjb.ro/articles/240/art07Moussa.pdf (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Narda Safety Test Solutions—SRM-3006. (o. J.). https://www.narda-sts.com/de/produkte/emf-selektiv-messgeraete/srm-3006/ (Zuletzt abgerufen am 22.09.2025)

National Toxicology Program. (2019). *Handbook for Conducting a Literature-Based Health Assessment Using OHAT Approach for Systematic Review and Evidence Integration*. https://ntp.niehs.nih.gov/whatwestudy/assessments/noncancer/handbook/index.html (Zuletzt abgerufen am 22.09.2025)

NTP. (2015a). *OHAT Risk of Bias Rating Tool for Human and Animal Studies*. https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/ntp/ohat/pubs/riskofbiastool_508.pdf (Zuletzt abgerufen am 22.09.2025)

NTP. (2015b). *Handbook for Preparing Report on Carcinogens Monographs*. https://ntp.niehs.nih.gov/whatwestudy/assessments/cancer/handbook (Zuletzt abgerufen am 22.09.2025)

NTP. (2018a). Toxicology and carcinogenesis studies in B6C3F1/N mice exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (1,900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. *National Toxicology Program Technical Report Series*, *596*, NTP-TR-596. https://doi.org/10.22427/NTP-TR-596

NTP. (2018b). Toxicology and carcinogenesis studies in Sprague Dawley (Hsd:Sprague Dawley SD) rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. *National Toxicology Program Technical Report Series*, *595*, NTP-TR-595. https://doi.org/10.22427/NTP-TR-595

NTP. (2019). *Handbook for Conducting a Literature-Based Health Assessment Using OHAT Approach for Systematic Review and Evidence Integration*. https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/ntp/ohat/pubs/handbookmarch2019_508.pdf (Zuletzt abgerufen am 22.09.2025)

Nyberg, N. R., McCredden, J. E., Weller, S. G., & Hardell, L. (2022). The European Union prioritises economics over health in the rollout of radiofrequency technologies. *Reviews on Environmental Health*. https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0106

Office of the Director of National Intelligence. (2023). *Updated Assessment of Anomalous Health Incidents*. National Intelligence Council. https://www.dni.gov/index.php/newsroom/reports-publications/reports-publications-2023/3673-dni-statement-on-the-intelligence-community-assessment-on-ahis (Zuletzt abgerufen am 02.09.2025)

Omer, H. (2021). Radiobiological effects and medical applications of non-ionizing radiation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *28*(10), 5585–5592. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.05.071

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2019). *The road to 5G networks: Experience to date and future developments* (OECD Digital Economy Papers No. 284; OECD Digital Economy Papers, Bd. 284). https://doi.org/10.1787/2f880843-en

Pacchierotti, F., Ardoino, L., Benassi, B., Consales, C., Cordelli, E., Eleuteri, P., Marino, C., Sciortino, M., Brinkworth, M. H., Chen, G., McNamee, J. P., Wood, A. W.,

Hooijmans, C. R., & de Vries, R. B. M. (2021). Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) exposure on male fertility and pregnancy and birth outcomes: Protocols for a systematic review of experimental studies in non-human mammals and in human sperm exposed in vitro. *Environment International*, *157*, 106806. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106806

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Paulsson, L. E., Hamnerius, Y., Hansson, H. A., & Sjöstrand, J. (1979). Retinal damage experimentally induced by microwave radiation at 55 mW/cm2. *Acta Ophthalmologica*, *57*(2), 183–197. https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.1979.tb00483.x

Perov, S. Y., Rubtsova, N. B., & Belaya, O. V. (2022). Status of the Neuroendocrine System in Animals Chronically Exposed to Electromagnetic Fields of 5G Mobile Network Base Stations. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, *174*(2), 277–279. https://doi.org/10.1007/s10517-023-05689-2

Petri, A.-K., Schmiedchen, K., Stunder, D., Dechent, D., Kraus, T., Bailey, W. H., & Driessen, S. (2017). Biological effects of exposure to static electric fields in humans and vertebrates: A systematic review. *Environmental Health*, *16*(1), 41. https://doi.org/10.1186/s12940-017-0248-y

Pinto, R., Ardoino, L., Villani, P., & Marino, C. (2023). In Vivo Studies on Radiofrequency (100 kHz-300 GHz) Electromagnetic Field Exposure and Cancer: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(3), 2071. https://doi.org/10.3390/ijerph20032071

Piszczek, P., Wójcik-Piotrowicz, K., Gil, K., & Kaszuba-Zwoińska, J. (2021). Immunity and electromagnetic fields. *Environmental Research*, *200*, 111505. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111505

Pophof, B., Burns, J., Danker-Hopfe, H., Dorn, H., Egblomassé-Roidl, C., Eggert, T., Fuks, K., Henschenmacher, B., Kuhne, J., Sauter, C., & Schmid, G. (2021). The effect of exposure to radiofrequency electromagnetic fields on cognitive performance in

human experimental studies: A protocol for a systematic review. *Environment International*, *157*, 106783. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106783

Pophof, B., Kuhne, J., Schmid, G., Weiser, E., Dorn, H., Henschenmacher, B., Burns, J., Danker-Hopfe, H., & Sauter, C. (2024). The effect of exposure to radiofrequency electromagnetic fields on cognitive performance in human experimental studies: Systematic review and meta-analyses. *Environment International*, *191*, 108899. https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108899

Pu, J. S., Chen, J., Yang, Y. H., & Bai, Y. Q. (1997). The Effects of 3000-Mhz Microwave Irradiation on Electroencephalic Energy and Energy Metabolism in Mouse Brain. *Electro- and Magnetobiology*, *16*(3), 243–247. https://doi.org/10.3109/15368379709015656

Raslear, T. G., Akyel, Y., Bates, F., Belt, M., & Lu, S. T. (1993). Temporal bisection in rats: The effects of high-peak-power pulsed microwave irradiation. *Bioelectromagnetics*, *14*(5), 459–478. https://doi.org/10.1002/bem.2250140507

Redmayne, M., & Maisch, D. R. (2023). ICNIRP Guidelines' Exposure Assessment Method for 5G Millimetre Wave Radiation May Trigger Adverse Effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *20*(7), 5267. https://doi.org/10.3390/ijerph20075267

Richardson, W. S., Wilson, M. C., Nishikawa, J., & Hayward, R. S. (1995). The well-built clinical question: A key to evidence-based decisions. *ACP Journal Club*, *123*(3), A12-13. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7582737/ (Zuletzt abgerufen 24.09.2025)

Roberti, B., Heebels, G. H., Hendricx, J. C., de Greef, A. H., & Wolthuis, O. L. (1975). Preliminary investigations of the effects of low-level microwave radiation on spontaneous motor activity in rats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *247*, 417–424. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1975.tb36017.x

Rooney, A. A., Boyles, A. L., Wolfe, M. S., Bucher, J. R., & Thayer, K. A. (2014). Systematic review and evidence integration for literature-based environmental health science assessments. *Environmental Health Perspectives*, *122*(7), 711–718. https://doi.org/10.1289/ehp.1307972

Röösli, M., Dongus, S., Jalilian, H., Eyers, J., Esu, E., Oringanje, C. M., Meremikwu, M., & Bosch-Capblanch, X. (2024). The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on tinnitus, migraine and non-specific symptoms in the general and

working population: A systematic review and meta-analysis on human observational studies. *Environment International*, *183*, 108338. https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108338

Röösli, M., Dongus, S., Jalilian, H., Feychting, M., Eyers, J., Esu, E., Oringanje, C. M., Meremikwu, M., & Bosch-Capblanch, X. (2021). The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on tinnitus, migraine and non-specific symptoms in the general and working population: A protocol for a systematic review on human observational studies. *Environment International*, *157*, 106852. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106852

Rowley, J., & Mazar, H. (2021). *Misunderstandings about radiofrequency electromagnetic field exposure and 5G misinformation*. 219–221. https://doi.org/10.1109/COMCAS52219.2021.9629063

Rubin, G. J., Hillert, L., Nieto-Hernandez, R., van Rongen, E., & Oftedal, G. (2011). Do people with idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields display physiological effects when exposed to electromagnetic fields? A systematic review of provocation studies. *Bioelectromagnetics*, *32*(8), 593–609. https://doi.org/10.1002/bem.20690

Russell, C. L. (2018). 5 G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications. *Environmental Research*, *165*, 484–495. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.016

SCENIHR. (2015). *Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF).* Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2772/75635 (Zuletzt abgerufen 24.09.2025)

SCHEER. (2023). *Opinion on the need of a revision of the annexes in Council Recommendation 1999/519/EC and Directive 2013/35/EU, in view of the latest scientific evidence available with regard to radiofrequency (100kHz—300GHz), adopted by written procedure on 18 April 2023*. https://health.ec.europa.eu/document/download/aaf66644-cfb2-4f9b-8a73-df7ef2b3a2a4_en?filename=scheer_o_044.pdf (Zuletzt abgerufen 24.09.2025)

Schmiedchen, K., Driessen, S., & Oftedal, G. (2019). Methodological limitations in experimental studies on symptom development in individuals with idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF) – a

systematic review. *Environmental Health*, *18*(1), 88. https://doi.org/10.1186/s12940-019-0519-x

Schrot, J., & Hawkins, T. D. (1974). Lethal effects of 3000 MHz radiation on the rat. *Radiation Research*, *59*(2), 504–512. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4417617/ (Zuletzt abgerufen 24.09.2025)

Schüz, J., & Deltour, I. (2022). *Nutzung von Mobiltelefonen und Verlauf der Gliom-Inzidenz seit 1979—Vorhaben 3618S00000*. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2022063033222 (Zuletzt abgerufen 24.09.2025)

Sciorio, R., Tramontano, L., & Esteves, S. C. (2022). Effects of mobile phone radiofrequency radiation on sperm quality. *Zygote*, *30*(2), 159–168. https://doi.org/10.1017/S096719942100037X

Servantie, B., Servantie, A. M., & Etienne, J. (1975). Synchronization of cortical neurons by a pulsed microwave field as evidenced by spectral analysis of electrocorticograms from the white rat. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *247*, 82–86. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1975.tb35985.x

Shamseer, L., Moher, D., Clarke, M., Ghersi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., Stewart, L. A., & PRISMA-P Group. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015: Elaboration and explanation. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, *350*, g7647. https://doi.org/10.1136/bmj.g7647

Shao, B.-J., & Chiang, H. (1989). *The Effects of Microwaves on the Immune System in Mice*. https://www.emf-portal.org/de/article/2335 (Zuletzt abgerufen 24.09.2025)

Siddaway, A. P., Wood, A. M., & Hedges, L. V. (2019). How to Do a Systematic Review: A Best Practice Guide for Conducting and Reporting Narrative Reviews, Meta-Analyses, and Meta-Syntheses. *Annual Review of Psychology*, *70*(1), 747–770. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102803

Simkó, M., & Mattsson, M.-O. (2019). 5G Wireless Communication and Health Effects—A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(18), 3406. https://doi.org/10.3390/ijerph16183406

Sofri, T., A Rahim, H., Abdulmalek, M., Rani, K. A., Omar, M. H., Yasin, M. N. M., Jusoh, M., & Soh, P. J. (2022). Health Effects of 5G Base Station Exposure: A Systematic Review. *IEEE Access*, *10*, 41639–41656. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3139385

SSK. (2021). *Elektromagnetische Felder des Mobilfunks im Zuge des aktuellen 5G-Netzausbaus – Technische Aspekte und biologische Wirkungen im unteren Frequenzbereich (FR1, bis ca. 7 GHz)*. Die Strahlenschutzkommission. https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/DE/2021/2021-12-10_Stgn_5G_Mobilfunk.html (Zuletzt abgerufen 24.09.2025)

SSK. (2024). *Strahlenschutzkommission*. https://www.ssk.de/DE/Home/home_node.html (Zuletzt abgerufen 22.09.2025)

SSM's (Swedish Radiation Safety Authority) Scientifc Council on Electromagnetic Fields. (2021). *Recent Research on EMF and Health Risk*. https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/e031f45648ed4b438a0535e350863707/2022-16-recent-research-on-emf-and-health-risk.pdf (Zuletzt abgerufen 20.09.2025)

Stam, R. (2018). *Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)*. https://www.emf-portal.org/en/article/34731 Zuletzt abgerufen 12.09.2025

Sun, L., Wang, X., Ren, K., Yao, C., Wang, H., Xu, X., Wang, H., Dong, J., Zhang, J., Yao, B., Wei, X., Peng, R., & Zhao, L. (2025). Compound exposure of 2.8 GHz and 9.3 GHz microwave causes learning and memory impairment in rats. *Heliyon*, *11*(1), e41626. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41626

Szmigielski, S., Jeljaszewicz, J., & Wiranowska, M. (1975). Acute staphylococcal infections in rabbits irradiated with 3-GHz microwaves. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *247*, 305–311. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1975.tb36006.x

Szmigielski, S., Luczak, M., Janiak, M., Kobus, M., Laskowska, B., de Clercq, E., & de Somer, P. (1977). In vitro and in vivo inhibition of virus multiplicaton by microwave hyperthemia. *Archives of Virology*, *53*(1–2), 71–77. https://doi.org/10.1007/BF01314848

Szmigielski, S., Pulverer, G., Hryniewicz, W., & Janiak, M. (1977). Inhibition of tumor growth in mice by microwave hyperthermia, Streptolysin S and Colcemide. *Radio Science*, *12*(6S), 185–189. https://doi.org/10.1029/RS012i06Sp00185

Tagesschau. (2023). *„Havanna-Syndrom“ bleibt ein Rätsel*. https://www.tagesschau.de/ausland/amerika/usa-havana-syndrom-geheimdienste-ursache-101.html (Zuletzt abgerufen am 06.09.2025)

Telefónica. (2025). *Netzabdeckung*. https://www.telefonica.de/netze/mobilfunknetz/netzabdeckung.html (Zuletzt abgerufen am 06.09.2025)

Theodorou, K., Tyrakis, C., Softa, V., & Kappas, C. (2021). 5G and human health. *Journal of B.U.ON.: Official Journal of the Balkan Union of Oncology*, *26*(5), 1698–1708. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34761572/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Thielens, A. (2021). *Environmental impact of 5G – A literature review of effects of radio-frequency electromagnetic field exposure of non-human vertebrates, invertebrates and plan*. European Parliament. https://doi.org/doi/10.2861/318352

Thuróczy, G., Kubinyi, G., Bodó, M., Bakos, J., & Szabó, L. D. (1994). Simultaneous response of brain electrical activity (EEG) and cerebral circulation (REG) to microwave exposure in rats. *Reviews on Environmental Health*, *10*(2), 135–148. https://doi.org/10.1515/reveh.1994.10.2.135

Tillmann, T., Ernst, H., Streckert, J., Zhou, Y., Taugner, F., Hansen, V., & Dasenbrock, C. (2010). Indication of cocarcinogenic potential of chronic UMTS-modulated radiofrequency exposure in an ethylnitrosourea mouse model. *International Journal of Radiation Biology*, *86*(7), 529–541. https://doi.org/10.3109/09553001003734501

Torkan, A., Zoghi, M., Foroughimehr, N., Yavari, A., & Jaberzadeh, S. (2025). Effects of Mobile Electromagnetic Exposure on Brain Oscillations and Cortical Excitability: Scoping Review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *25*(9), 2749. https://doi.org/10.3390/s25092749

Ursăchianu, M. V., Lăzărescu, C., Bejenaru, O., & Sălceanu, A. (2022). Assessment of human exposure to EMF generated by 5G mobile phone base stations. *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering, *1254*(1), 012026. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1254/1/012026

Valberg, P. A., van Deventer, T. E., & Repacholi, M. H. (2007). Workgroup Report: Base Stations and Wireless Networks—Radiofrequency (RF) Exposures and Health Consequences. *Environmental Health Perspectives*, *115*(3), 416–424. https://doi.org/10.1289/ehp.9633

van Moorselaar, I., Slottje, P., Heller, P., van Strien, R., Kromhout, H., Murbach, M., Kuster, N., Vermeulen, R., & Huss, A. (2017). Effects of personalised exposure on self-rated electromagnetic hypersensitivity and sensibility—A double-blind randomised controlled trial. *Environment International*, *99*, 255–262. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.031

Varma, M. M., & Traboulay, E. A. (1975). Biological effects of microwave radiation on the testes of Swiss mice. *Experientia*, *31*(3), 301–302. https://doi.org/10.1007/BF01922549

Verbeek, J., Oftedal, G., Feychting, M., van Rongen, E., Rosaria Scarfì, M., Mann, S., Wong, R., & van Deventer, E. (2021). Prioritizing health outcomes when assessing the effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A survey among experts. *Environment International*, *146*, 106300. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106300

Verordnung über elektromagnetische Felder—26. BImSchV. (2013). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/ (Zuletzt abgerufen am 06.09.2025)

Verrender, A., Loughran, S. P., Dalecki, A., Freudenstein, F., & Croft, R. J. (2018). Can explicit suggestions about the harmfulness of EMF exposure exacerbate a nocebo response in healthy controls? *Environmental Research*, *166*, 409–417. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.06.032

Vesterinen, H. M., Sena, E. S., Egan, K. J., Hirst, T. C., Churolov, L., Currie, G. L., Antonic, A., Howells, D. W., & Macleod, M. R. (2014). Meta-analysis of data from animal studies: A practical guide. *Journal of Neuroscience Methods*, *221*, 92–102. https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2013.09.010

Viswanathan, M., Ansari, M. T., Berkman, N. D., Chang, S., Hartling, L., McPheeters, M., Santaguida, P. L., Shamliyan, T., Singh, K., Tsertsvadze, A., & Treadwell, J. R. (2012). Assessing the Risk of Bias of Individual Studies in Systematic Reviews of

Health Care Interventions. In *Methods Guide for Effectiveness and Comparative Effectiveness Reviews*. Agency for Healthcare Research and Quality (US). http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK91433/ (Zuletzt abgerufen am 24.09.2025)

Viswanathan, M., Patnode, C. D., Berkman, N. D., Bass, E. B., Chang, S., Hartling, L., Murad, M. H., Treadwell, J. R., & Kane, R. L. (2017). *Assessing the Risk of Bias of Individual Studies in Systematic Reviews of Health Care Interventions*. Agency for Healthcare Research and Quality. https://doi.org/10.23970/AHRQEPCMETHGUIDE2

Wavecontrol—SMP2. (o. J.). *Wavecontrol*. https://wavecontrol.cn/en/products/smp2/ (Zuletzt abgerufen am 22.09.2025)

Weller, S. G., McCredden, J. E., Leach, V., Chu, C., & Lam, A. K. (2025). A scoping review and evidence map of radiofrequency field exposure and genotoxicity: Assessing in vivo, in vitro, and epidemiological data. *Frontiers in Public Health*, *13*. https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1613353

Weller, S., & McCredden, J. E. (2024). Understanding the public voices and researchers speaking into the 5G narrative. *Frontiers in Public Health*, *11*, 1339513. https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1339513

Wersényi, G. (2022). Health issues using 5G frequencies from an engineering perspective: Current review. *Open Engineering*, *12*(1), 1060–1077. https://doi.org/10.1515/eng-2022-0387

Whaley, P., Aiassa, E., Beausoleil, C., Beronius, A., Bilotta, G., Boobis, A., de Vries, R., Hanberg, A., Hoffmann, S., Hunt, N., Kwiatkowski, C. F., Lam, J., Lipworth, S., Martin, O., Randall, N., Rhomberg, L., Rooney, A. A., Schünemann, H. J., Wikoff, D., … Halsall, C. (2020). Recommendations for the conduct of systematic reviews in toxicology and environmental health research (COSTER). *Environment International*, *143*, 105926. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105926

Wood, A., Mate, R., & Karipidis, K. (2021). Meta-analysis of in vitro and in vivo studies of the biological effects of low-level millimetre waves. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, *31*(4), 606–613. https://doi.org/10.1038/s41370-021-00307-7

Woodruff, T. J., & Sutton, P. (2014). The Navigation Guide Systematic Review Methodology: A Rigorous and Transparent Method for Translating

Environmental Health Science into Better Health Outcomes. *Environmental Health Perspectives*, *122*(10), 1007–1014. https://doi.org/10.1289/ehp.1307175

World Health Organization. (2011). WHO Research Agenda for Radiofrequency Fields. *WHO Research Agenda for Radiofrequency Fields*, 54. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/44396/9789241599948_eng.pdf (Zuletzt abgerufen am 22.09.2025)

Yadav, H., Sharma, R. S., & Singh, R. (2022). Immunotoxicity of radiofrequency radiation. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, *309*, 119793. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119793

Yang, H., Zhang, Y., Wu, X., Gan, P., Luo, X., Zhong, S., & Zuo, W. (2022). Effects of Acute Exposure to 3500 MHz (5G) Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Anxiety-Like Behavior and the Auditory Cortex in Guinea Pigs. *Bioelectromagnetics*, *43*(2), 106–118. https://doi.org/10.1002/bem.22388

Zernii, E. Y., Baksheeva, V. E., Iomdina, E. N., Averina, O. A., Permyakov, S. E., Philippov, P. P., Zamyatnin, A. A., & Senin, I. I. (2016). Rabbit Models of Ocular Diseases: New Relevance for Classical Approaches. *CNS & Neurological Disorders Drug Targets*, *15*(3), 267–291. https://doi.org/10.2174/1871527315666151110124957

Zhang, Y., Zhang, Y., Ye, Z., Yang, S., Liu, M., Wu, Q., Zhou, C., He, P., & Qin, X. (2023). Mobile Phone Use, Genetic Susceptibility and New-Onset Chronic Kidney Diseases. *International Journal of Public Health*, *68*, 1605358. https://doi.org/10.3389/ijph.2023.1605358

Zhou, G.-Q., Wang, X., Gao, P., Qin, T.-Z., Guo, L., Zhang, Z.-W., Huang, Z.-F., Lin, J.-J., Jing, Y.-T., Wang, H.-N., Wang, C.-P., & Ding, G.-R. (2024). Intestinal microbiota via NLRP3 inflammasome dependent neuronal pyroptosis mediates anxiety-like behaviour in mice exposed to 3.5 GHz radiofrequency radiation. *The Science of the Total Environment*, *927*, 172391. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172391

Anhang

Anhang 1: Studienprotokoll mit zugehörigen Anhängen

Physiologische und gesundheitliche Wirkungen von 5G-relevanten Hochfrequenzfeldern (3-4 GHz und 20-30 GHz): ein Protokoll für ein systematisches Review von experimentellen und epidemiologischen Studien an Menschen und nicht-menschlichen Säugetieren

Lambert Bodewein (LB) [1,*], Dagmar Dechent (DD) [1], Tanja Emonds (TE) [1], David Graefrath (DG) [1], Julia Krabbe (JK) [2], Philine Johanna Scheelhaase (PJS) [2], Gernot Schmid (GS) [3], Pia Schneeweiss (PS) [3], Sarah Driessen (SD) [1]

[1] **Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit** (*femu*)-Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Medizinische Fakultät, RWTH Aachen, Aachen, Deutschland

[2] Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Medizinische Fakultät, RWTH Aachen University, Aachen, Deutschland

[3] Elektromagnetische Verträglichkeit, Seibersdorf Labor GmbH, Seibersdorf, Österreich

* Korrespondierender Autor

Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (*femu*)-Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Medizinische Fakultät, RWTH Aachen University, Pauwelsstraße 30, 52074 Aachen, E-Mail: bodewein@femu.rwth-aachen.de

ABSTRACT

Einleitung: Die Einführung des neuesten Mobilfunkstandards der fünften Generation (5G) wird von kontroversen Diskussionen über mögliche Gesundheitsrisiken begleitet. Nach derzeitigem Kenntnisstand besteht für Frequenzen im Bereich bestehender Mobilfunkanwendungen (ca. 800 MHz-3 GHz) unterhalb der empfohlenen internationalen Grenzwerte kein Gesundheitsrisiko. Für 5G werden jedoch höhere Frequenzen bis in den Millimeterwellenbereich (> 3 GHz) genutzt. Für diese Frequenzen gibt es deutlich weniger Studien zu physiologischen und gesundheitlichen Wirkungen als für die bereits genutzten Mobilfunkfrequenzen. Je höher die Frequenz, desto mehr Energie des elektromagnetischen Feldes wird an der Körperoberfläche absorbiert. Dies führt zu potenziell unterschiedlichen Wirkorten.

Zielsetzungen: Entwicklung eines Protokolls für ein systematisches Review experimenteller und epidemiologischer Studien, die die physiologischen und gesundheitsbezogenen Wirkungen von 5G-relevanten Hochfrequenzfeldern (3-4 GHz und 20-30 GHz) bei Menschen und Säugetieren untersuchen.

Methoden und Analyse: Das Protokoll wurde nach PRISMA-P "Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses Protocols"-Richtlinien erstellt. Das Risiko für Bias sowie die Qualität der eingeschlossenen Studien werden anhand der vom Office of Health Assessment and Translation (OHAT) des National Toxicology Program (NTP) empfohlenen Vorgehensweise bewertet.

Ethik und Öffentlichkeitsarbeit: Eine ethische Genehmigung ist nicht erforderlich. Die Dissemination des fertiggestellten Reviews erfolgt durch Konferenzpräsentationen und die Veröffentlichung in einem wissenschaftlichen Journal.

Das Protokoll wurde bei PROSPERO (CRD42022374434), einem Open-Source-System zur Protokollregistrierung, registriert, um die Transparenz zu fördern.

ZUSAMMENFASSUNG DES ARTIKELS

Stärken und Grenzen (Einschränkungen?) dieser Studie

- Dies ist ein Protokoll für ein systematisches Review, das zum ersten Mal die möglichen Wirkungen von 5G-relevanten Expositionen auf die Gesundheit durchgängig systematisch analysiert und bewertet.
- Das aus diesem Protokoll abgeleitete Review soll dazu dienen, mögliche gesundheitliche Auswirkungen einer neuartigen Exposition (5G) im frühesten Stadium zu identifizieren und einen möglichen Forschungsbedarf zu formulieren.
- Das aus diesem Protokoll abgeleitete Review wird wesentlich zur Versachlichung der öffentlichen Diskussion beitragen.
- Der potenzielle Mangel an ausreichend homogenen wissenschaftlichen Daten kann die Vergleichbarkeit der in Frage kommenden Studien und die Aussagekraft verringern.

1. EINLEITUNG

1.1 Hintergrund

Die Exposition bei hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF EMF) hat in den letzten Jahrzehnten stetig zugenommen [1–6]. Dies hat zu Bedenken hinsichtlich möglicher negativer Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit geführt.

Bisher ist die einzige wissenschaftlich anerkannte biologische Wirkung eine Temperaturerhöhung bei Frequenzen über 10 MHz. Diese wird durch die Absorption elektromagnetischer Energie im Körpergewebe verursacht. Dieser Wirkmechanismus (thermische Wirkung) ist die Grundlage für die derzeitigen Expositionsgrenzwerte gegenüber HF EMF [7,8]. Unterhalb der Grenzwerte werden keine gesundheitlich relevanten thermischen Wirkungen erwartet. Zahlreiche Studien haben jedoch gezeigt, dass bei Feldstärken unterhalb der Grenzwerte (nicht-thermische Wirkungen) potenziell gesundheitsschädliche Wirkungen auftreten können, insbesondere bei Langzeitexpositionen [9-13].

Eine häufig diskutierte Frage ist beispielsweise, ob HF EMF Krebs verursachen können. Aufgrund begrenzter Hinweise auf Karzinogenität bei Menschen und Tieren [14], stufte die IARC (International Agency for Research on Cancer) 2011 HF EMF in die Kategorie 2B "möglicherweise krebserregend für den Menschen" ein, was die Diskussion erheblich verschärfte. Die Ergebnisse der so genannten NTP-Studie [15,16] und der Ramazzini-Studie [17], die auf krebserregende Wirkungen der Exposition bei HF EMF von Mobiltelefonen bei Nagern hinwiesen, untermauerten diese Einschätzung. Einige Autor*innen wiesen jedoch auf methodische Mängel in diesen Studien und auf die mangelnde Übertragbarkeit auf den Menschen hin [18,19]. Der Neubewertung dieses Themas wurde von einer internationalen Beratergruppe des IARC eine hohe Priorität eingeräumt [20].

Weitere intensiv diskutierte nicht-thermische Wirkungen der HF EMF Exposition sind, z. B. die Gehirnaktivität, kognitive Funktionen und die Fruchtbarkeit [5]. Die Daten dieser Studien sind jedoch oft widersprüchlich und unterscheiden sich erheblich in ihrem potenziellen Bias Risiko [13,21-24]. Bis heute ist die Debatte über die nicht-thermischen Wirkungen von HF EMF noch nicht abschließend geklärt. Daher hat die WHO neun

systematische Reviews zu den sechs wichtigsten Themen in Auftrag gegeben [25], um potenzielle Auswirkungen von HF EMF unterhalb der Grenzwerte auf die menschliche Gesundheit zu bewerten [22-24,26-31].

In jüngster Zeit ist die Diskussion um mögliche Gesundheitsrisiken unterhalb der Grenzwerte durch die Einführung des neuesten Mobilfunkstandards der fünften Generation (5G) neu entfacht worden. Die Debatte ähnelt dabei in Art und Umfang den Protesten gegen den Ausbau der Mobilfunknetze in den 1990er und 2000er Jahren [32,33]. Für Frequenzen im Bereich bestehender Mobilfunkanwendungen (< 3 GHz), die teilweise bereits von früheren Mobilfunkstandards (z. B. UMTS und LTE) genutzt werden, liegt eine Vielzahl von Studien und Bewertungen internationaler Expertengruppen vor, um mögliche gesundheitliche Auswirkungen zu bewerten. Zukünftige 5G-Anwendungen werden jedoch höhere Frequenzen (5G FR1 und FR2; siehe Kapitel 1.3 Beschreibung der Exposition), bis hin zum Millimeterwellenbereich (> 30 GHz) nutzen. Für diese Frequenzen liegen deutlich weniger Studien zu physiologischen und gesundheitsbezogenen Wirkungen vor als für die bereits genutzten Mobilfunkfrequenzen. So sind, z. B. in der internationalen themenspezifischen Literaturdatenbank, dem EMF-Portal (https://www.emf-portal.org/), > 1600 experimentelle Studien zu Expositionen durch Mobilfunk[1] verzeichnet, während für Millimeterwellen (30 GHz-300 GHz) nur etwa 320 experimentelle Studien[2] vorliegen. Je höher die Frequenz, desto mehr HF EMF-Energie wird an der Körperoberfläche absorbiert, was zu potenziell unterschiedlichen Wirkorten führt.

Zudem werden gesundheitliche Bedenken häufig mit unsystematisch zusammengetragenen Informationen über andere vermeintliche Gefahren vermischt, von "Elektrosmog" bis hin zu Verschwörungstheorien (z. B. einem Zusammenhang zwischen der Einführung von 5G und der COVID-19-Pandemie) [34,35]. Die deutsche Bundesregierung hat, z. B. die Internet-Dialogplattform "Deutschland spricht über 5G" (https://www.deutschland-spricht-ueber-5g.de/) ins Leben gerufen, um die öffentliche

[1] https://www.emf-portal.org/de/article/overview/mobile-communications-med-bio#level-1 (accessed on 02.23.2023)

[2] https://www.emf-portal.org/de/article/overview/millimeter-waves/medical-biological#level-2 (accessed on 02.23.2023)

Diskussion zu versachlichen. Die systematische wissenschaftliche Aufarbeitung des aktuellen Wissensstandes leistet durch die Bereitstellung neutraler Informationen einen bedeutenden Beitrag zur Versachlichung solcher Diskussionen.

1.2 Beschreibung der Ergebnisse

Dieses Review beruht in gewisser Weise auf einem Paradoxon. Schädliche thermische Wirkungen im angestrebten Frequenzbereich (3-30 GHz) sollten durch die Grenzwerte per se ausgeschlossen sein und thermische Wirkungen sind der einzige bisher wissenschaftlich anerkannte Wirkmechanismus. Da die Exposition (3-30 GHz) durch die weit verbreitete Nutzung von 5G in Zukunft große Teile der Bevölkerung betreffen wird, ist die frühestmögliche Erkennung schädlicher Auswirkungen von HF EMF unterhalb der Grenzwerte, auch ohne Kenntnis eines zusätzlichen Wirkmechanismus, von großer Bedeutung. Die möglichen Auswirkungen können sehr vielfältig sein. [25] führte eine Umfrage unter 300 EMF-Experten durch, in der diese die aus ihrer Sicht wichtigsten von 34 möglichen schädlichen Wirkungen von HF EMF nennen sollten. In der Gesamtbewertung wurden Krebs, Wirkungen im Zusammenhang mit Wärme, Geburtsschäden, elektromagnetische Hypersensibilität, kognitive Beeinträchtigung und oxidativer Stress als die kritischsten Wirkungen einer HF EMF-Exposition bewertet. Es gab jedoch keine Kategorie, die nicht von mindestens 20 Experten als wichtig oder sogar kritisch eingestuft wurde. Daher sollte keine dieser oder mögliche andere Wirkungen bei der Bewertung möglicher gesundheitlicher Auswirkungen von vornherein ausgeschlossen werden. Unser Review soll dazu dienen, mögliche Folgen einer neuartigen Exposition (5G) im frühesten Stadium zu erkennen und einen möglichen Forschungsbedarf zu formulieren. Daher werden die untersuchten Wirkungen nicht im Voraus eingeschränkt, d.h. alle berichteten Wirkungen, ob potenziell schädlich, nützlich (therapeutisch) oder von unklarer gesundheitlicher Relevanz, werden im Review berücksichtigt. Die Endpunkte umfassen gesundheitsbezogene (z. B. Augenschäden, Krebs), physiologische (z. B. Gehirnaktivität), verhaltensbezogene (z. B. motorische Aktivität, Angst) und therapeutische Ergebnisse bei Menschen und Säugetieren. Das vorliegende systematische Review berücksichtigt somit alle potenziellen Auswirkungen und stellt eine Ergänzung zu den WHO-Reviews dar, die nur sechs spezifische Wirkungen untersuchen [25].

Obwohl dieser umfassende Ansatz für systematische Reviews eher ungewöhnlich ist, haben mehrere frühere Reviews mit einem ähnlich umfassenden Ansatz in Bezug auf die berücksichtigten Endpunkte ihren Wert bewiesen [36-40]. Dies zeigen die hohen Attention Scores auf Altmetric[3], die zu den besten 5-25 % aller bewerteten Publikationen gehören.

1.3 Beschreibung der Exposition

5G wird in mehreren verschiedenen Frequenzbändern betrieben. Im Jahr 2019 hat die Europäische Union drei 5G-"Pionierbänder" harmonisiert: 694-790 MHz, 3,4-3,8 GHz (5G FR1 (Frequenzbereich 1)) und 24,25-27,5 GHz (5G FR2). Weltweit ist 3,3-3,8 GHz zum meistgenutzten 5G-Frequenzband geworden [41]. Es werden jedoch auch weitere Frequenzen im Bereich von 3-30 GHz verwendet, z. B. 4,9 GHz in China [42].

Für die Frequenzen im Bereich der bestehenden Mobilfunkanwendungen (< 3 GHz) liegt eine große Anzahl von Studien und Bewertungen internationaler Expertengruppen zur Bewertung möglicher gesundheitlicher Auswirkungen vor (siehe Kapitel 1.1 Hintergrund). Daher konzentriert sich unser Review nur auf den neu eingeführten Frequenzbereich 3-30 GHz, insbesondere die Frequenzbänder 5G FR1 (3-4 GHz) und 5G FR2 (20-30 GHz).

Die Hauptquellen der 5G-Exposition sind Mobiltelefone, Mobilfunk-Basisstationen, 5G-Netzwerke und tragbare Geräte (Wearables). Außerdem werden Frequenzen in diesem Bereich teilweise von WLAN, Radaranwendungen (z. B. Militärradar) [43] und medizinischen Anwendungen [44] genutzt.

Die Exposition bei hochfrequenten elektromagnetischen Feldern induziert interne elektrische Felder im Körper und die Energie wird vom Gewebe absorbiert. Dies kann zu einer Erhöhung der Temperatur im Gewebe führen, die je nach Höhe und Dauer der Exposition thermische biologische Wirkungen hervorruft. Um die Bevölkerung zu

[3] Bodewein et al., 2022: https://www.altmetric.com/details/129161057, Dongus et al., 2022: https://www.altmetric.com/details/110469503, Petri et al., 2017: https://www.altmetric.com/details/18904900, Schmiedchen et al., 2018: https://www.altmetric.com/details/27006576, Simkó and Mattsson, 2019: https://www.altmetric.com/details/68301237

schützen, sind die wichtigsten Parameter zur Expositionsbegrenzung die Stärke des internen elektrischen Feldes und die Absorptionsrate der HF-Energie (spezifische Absorptionsrate, SAR). Die SAR steht über die elektrische Leitfähigkeit und die Massendichte des Gewebes in direktem Zusammenhang mit der internen elektrischen Feldstärke. Im Bereich von 10 MHz bis 6 GHz ist die SAR der wichtigste Expositionsparameter. Die SAR kann numerisch und experimentell bestimmt werden, was allerdings anspruchsvolle und aufwendige Methoden erfordert.

Als alternative Expositionsparameter können auch die leicht messbaren Werte für die einfallende elektrische und magnetische Feldstärke oder die Leistungsflussdichte an der Stelle des exponierten Körpers verwendet werden. Allerdings sind diese externen Expositionsparameter im Allgemeinen nur grobe Näherungswerte für die relevanten internen Expositionsparameter. Dies liegt daran, dass die Einkopplung der externen Felder in den Körper hochkomplexen physikalischen Phänomenen folgt und von mehreren Faktoren abhängt, z. B. der Frequenz, Größe, Ausrichtung und Haltung des exponierten Körpers, der Feldpolarisation sowie den dielektrischen Eigenschaften des Körpergewebes. Die ICNIRP legt Grenzwerte sowohl für körperinterne als auch -externe Metriken fest, wobei die externen Grenzwerte als "Referenzwerte" und die körpereigenen Grenzwerte als "Basisgrenzwerte" bezeichnet werden.

Bei höheren Frequenzen (über 6 GHz) beschränkt sich die Absorption auf die Oberfläche des exponierten Ziels, und die absorbierte Leistungsflussdichte oder Energiedichte kann als geeignetes Expositionsmaß verwendet werden.

1.4 Frühere Untersuchungen zum Thema

In den vergangenen fünf Jahren haben mehrere Autor*innen und Organisationen umfassende Reviews über die möglichen Gesundheitsrisiken von 5G-relevanten Expositionen erstellt. Eine systematische Suche (Anhang 1) im EMF-Portal (https://www.emf-portal.org) und in PubMed (https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/) ergab 12 Reviews zu diesem Thema (Anhang 2). Vier der 12 identifizierten Reviews wurden von öffentlichen Behörden veröffentlicht [45-48]. Der Gesundheitsrat der Niederlande (2020) veröffentlichte einen Bericht über die möglichen Schäden durch 5G-relevante Expositionen. Der Rat kam zu dem Schluss, dass kein besonderes Risiko für die

Exposition bis 3,5 GHz vorliegt, es jedoch fast keine Forschung zu den Auswirkungen der Exposition bei Frequenzen um 26 GHz gibt. Zusammenfassend war der Rat nicht in der Lage eine Aussage über die tatsächlichen Gesundheitsrisiken zukünftiger Expositionen bei 5G-Frequenzen zu treffen. In ähnlicher Weise kam die französische Agentur für Lebensmittel, Umwelt- und Arbeitsschutz [45] zu dem Schluss, dass die Exposition bei 3,5 GHz kein neues Gesundheitsrisiko darstellt, jedoch zur Exposition bei 26 GHz keine Aussage gemacht werden können. Thielens (2021) [48] führte im Auftrag des „Gremium für die Zukunft der Wissenschaft und Technologie (STOA)“ des Europäischen Parlaments ein Review zu den biologischen Wirkungen auf nicht-menschliche Wirbeltiere, Wirbellose und Pflanzen im Frequenzbereich von 450-6.000 MHz und 6.000 MHz-300 GHz durch und stellte lediglich Auswirkungen durch dielektrische Erwärmung fest. Im Gegensatz dazu führte Belpoggi (2021) [46] ebenfalls im Auftrag der STOA ein narratives/Scoping Review für die Frequenzbereiche 450-6.000 MHz und 24-100 GHz durch und fand bei einer Exposition im unteren Frequenzbereich Hinweise auf karzinogene Wirkungen und nachteilige Wirkungen auf Fruchtbarkeit und Entwicklung. Simkó und Mattsson (2019) [39] führten ein umfassendes Review zu Frequenzen im Bereich von 6-100 GHz durch, fanden aber nur zwei Studien unter 30 GHz. Sie kamen zu dem Schluss, dass die vorhandenen Erkenntnisse für eine aussagekräftige Sicherheitsbewertung nicht ausreichen. Karipidis et al. (2021) [49] und Wood et al. (2021) [50] führten ebenfalls ein umfassendes Review sowie eine Metaanalyse zu schwacher Exposition über 6 GHz durch. Sie fanden keine ausreichenden Beweise für schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit, jedoch kritisierten sie methodische Schwächen in den eingeschlossenen Studien. Hinrikus et al. (2022) [51] überprüften Studien zu den Auswirkungen von HF EMF auf das Gehirn und kamen zu dem Schluss, dass die Wirkungen von 5G FR1 im Vergleich zu den vorherigen Mobilfunkgenerationen (2G, 3G, 4G) nicht wesentlich unterschiedlich sein sollten.

Chiaraviglio et al. (2021) [52] kommen in ihrem umfassenden Review zu dem Schluss, dass die gesundheitlichen Bedenken zu 5G nicht durch wissenschaftliche Erkenntnisse gestützt werden. Sofri et al. (2022) [53] und di Ciaula [54] untersuchten die gesundheitlichen Wirkungen von 5G-relevanten Expositionen, schlossen jedoch keine Studien mit Expositionen im Bereich von 3-30 GHz ein. Beide kommen daher zu dem Schluss, dass in diesem Frequenzbereich weiteren Forschungsbedarf besteht. Di Ciaula (2018) [54] argumentierte jedoch, dass die Beweise für Wirkungen aus Studien, die

Expositionen > 30 GHz untersuchten, bereits ausreichend seien, um sich auf das Vorsorgeprinzip zu berufen und die bestehenden Grenzwerte zu überarbeiten. Russell (2018) [55] forderte sogar ein Moratorium für die Einführung von 5G. Neben den genannten Reviews kommen auch Massa und Scarfì (2022) [56] in ihrem kurzen Review über Studienergebnisse zu biologischen Wechselwirkungen mit 5G/6G-relevanten Frequenzen zu dem Schluss, dass die vorliegenden Studien keine ausreichenden Informationen für eine sinnvolle Sicherheitsbewertung liefern.

Kürzlich untersuchten und diskutierten de Vocht und Albers (2022) [57] 15 Reviews, Kommentare und Meinungsartikel mit Peer Review, um die Darstellung der Pro- und Kontra-Argumente zu den gesundheitlichen Wirkungen der 5G-Exposition zu untersuchen. Interessanterweise gab es keine eindeutige Antwort darauf, ob Artikel mit Verbindungen zu Aktivisten-Gruppierungen eine Überschätzung der Risiken beschreiben, oder ob jene mit Verbindungen zur Industrie eine Unterschätzung der tatsächlichen kausalen Zusammenhänge beschreiben. Es blieb auch unklar, ob eine kombinierte Bewertung zukünftige Evidenzsynthesen näher an die "Wahrheit" bringen würde.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die bisherigen Reviews widersprüchliche Ergebnisse präsentieren und die Qualität dieser Reviews besorgniserregend ist, da keine systematische Durchführung gemäß internationalen Leitlinien für systematische Reviews erfolgte und wichtige methodische Schritte fehlten (siehe Anhang 2, Einschränkungen). Beispielsweise fehlte in fast allen Reviews die Angabe von Suchstrings. Darüber hinaus variierte die Qualität der eingeschlossenen Studien in die Reviews, was ein Grund für die Inkonsistenz der Ergebnisse sein könnte. Eine systematische Recherche, Analyse und Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zu den gesundheitlichen Auswirkungen der 5G-relevanten HF EMF-Exposition steht nach unserem Kenntnisstand daher noch aus.

1.5 Begründung

Die Gründe für die Durchführung dieses systematischen Reviews sind (i) die weit verbreiteten Nutzung von Mobiltelefonen und das daraus resultierende hohe Expositionspotenzial, die Einführung des 5G-Standards und die Relevanz für die öffentliche Gesundheit und die Entscheidungsfindung; (ii) die Tatsache, dass die

Einführung von 5G eine breite Medienberichterstattung und erhebliche öffentliche Besorgnis ausgelöst hat; (iii) die Tatsache, dass die Regulierungsbehörden zu dem Schluss gekommen sind, dass es keine gesundheitsschädlichen Auswirkungen von HF EMF gibt, obwohl nur wenige Daten im aktuellen Frequenzbereich (3-30 GHz) und im Frequenzbereich > 30 GHz (Millimeterwellen) vorliegen; und schließlich (iv) die Tatsache, dass mögliche gesundheitsschädliche Auswirkungen und die Exposition bei HF EMF im Frequenzbereich von 3-30 GHz trotz einiger früherer Versuche nicht systematisch überprüft und bewertet worden sind.

Wir halten es daher für notwendig, die potenziellen physiologischen und gesundheitsbezogenen Wirkungen der 5G-relevanten HF EMF-Exposition systematisch zu analysieren und zu bewerten, insbesondere für die Frequenzen, die nicht bereits von den bisherigen Mobilfunkstandards genutzt werden (3-30 GHz).

1.6 Zielsetzung

Dieses Dokument stellt ein Protokoll für ein systematisches Review dar, das nach den strengsten, international anerkannten und transparenten Methoden erstellt wird. Es wird eine umfassende Analyse der folgenden PECOS-Frage (population, exposure, control, outcome, study design deutsch: Population, Exposition, Kontrolle, Ergebnis, Studiendesign) [58] durchgeführt:

Bewertung der physiologischen, gesundheitsbezogenen, verhaltensbezogenen und therapeutischen Wirkungen (O) der Exposition bei 5G-relevanten HF EMF (3-4 GHz und 20-30 GHz) (E) bei Menschen und Säugetieren (P) im Vergleich zu keiner oder geringerer Exposition (C) in experimentellen *in vivo* und epidemiologischen Studien (S).

Die spezifischen Ziele sind (i) die Identifizierung der relevanten (experimentellen und epidemiologischen) *in vivo*-Literatur zu Menschen und Tieren, (ii) die Bewertung des Bias-Risikos für einzelne Studien, (iii) die Zusammenfassung der Evidenz für die Korrelation zwischen Exposition und Ergebnis und die Bewertung der Heterogenität der Ergebnisse der verschiedenen Studien in der Gesamtschau sowie (iv) die Bewertung der Konfidenz in die Gesamtevidenz.

2. METHODEN UND AUSWERTUNG

Das Protokoll entspricht den PRISMA-P-Richtlinien (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses Protocols) [59,60]. Die PRISMA-P-Checkliste ist in Anhang 3 enthalten. Mögliche Änderungen dieses Protokolls werden mit Änderungsdatum und Begründung im Bericht dokumentiert [60]. Das systematische Review wird in Übereinstimmung mit den PRISMA-Richtlinien (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) erstellt [61]. Methodische Einschränkungen in einzelnen Studien werden mithilfe des Risk-of-Bias Rating Tool for Human and Animal Studies [58,62] des Office of Health Assessment and Translation (OHAT) bewertet. Die angewandten Methoden basieren auf unseren früheren systematischen Reviews [36-38,63,64], dem Protokoll für ein systematisches Review von Romeo et al. (2021) [65] und den Protokollen der von der WHO in Auftrag gegebenen systematischen Reviews [22-24,26-31]. Die Aufzeichnungen und Extraktionsdaten werden mit der Covidence-Webanwendung für systematische Reviews (https://www.covidence.org) verwaltet. Die Referenzen werden mit Mendeley Reference Manager (https://www.mendeley.com) verwaltet.

2.1. Einschlusskriterien

Studien werden eingeschlossen, wenn sie eine Reihe von vordefinierten Einschlusskriterien für jedes Element unserer PECOS-Frage erfüllen (Tabelle 1). Wenn eine Studie sowohl Ergebnisse für Bedingungen liefert, die unseren Kriterien entsprechen, als auch für solche, die ihnen nicht entsprechen, werden ausschließlich die Ergebnisse für die zulässigen Bedingungen in das systematische Review aufgenommen.

2.1.1 Arten von Populationen

1) Wir werden die Allgemeinbevölkerung und beruflich aktive Personen einbeziehen. Es gibt keine Einschränkungen hinsichtlich individueller Merkmale wie Geschlecht, Alter oder pathologischer Zustände.

2) In Übereinstimmung mit den von der WHO in Auftrag gegebenen systematischen Reviews [22-24,26-31] werden wir Studien einbeziehen, die mit nicht-menschlichen Säugetierarten in allen Lebensstadien (einschließlich *in utero*, peripubertär und adulter Stadien), Stämmen und Geschlechtern durchgeführt wurden. Nicht-menschliche

Säugetiere sind aufgrund ihrer höheren Zuverlässigkeit bei der Vorhersage von Gesundheitsrisiken für den Menschen beliebte Modellsysteme in der Toxikologie [58,62].

2.1.2 Arten der Exposition

Es werden Studien eingeschlossen, welche die Exposition bei HF EMF im Frequenzbereich von 3-4 GHz oder 20-30 GHz untersuchen. Wenn sich nach der Auswahl der Studien herausstellt, dass die Anzahl der verfügbaren Studien für eine aussagekräftige Analyse nicht ausreichend ist, wird der Frequenzbereich auf 3-30 GHz erweitert. Es werden nur Studien berücksichtigt, die mindestens einen der folgenden Deskriptoren zur Expositionserfassung verwenden:

A) Körper-/Gewebe-interne Expositionsmetriken, gemessen oder berechnet für die jeweiligen Versuchsbedingungen:
- SAR [W/kg]
- SA [J/kg]
- induzierte elektrische Feldstärke [V/m]
- interne magnetische Feldstärke [A/m]

B) Externe oder interne Expositionsmetriken des Körpers/Gewebes, die die oberflächliche Absorption bei Frequenzen über 6 GHz beschreiben und für die Versuchsbedingungen gemessen oder berechnet wurden:
- einfallende Leistungsflussdichte [W/m2]
- einfallende Energiedichte [J/m²]
- transmittierte (absorbierte) Leistungsflussdichte [W/m²]
- transmittierte (absorbierte) Energiedichte [J/m²]

C) Externe Expositionsmetriken des Körpers/Gewebes (an der Stelle des exponierten Körpers):
- einfallende elektrische Feldstärke [V/m]
- einfallende magnetische Feldstärke [A/m]
- einfallende Leistungsflussdichte [W/m²]

Darüber hinaus akzeptieren wir für epidemiologische Studien auch stellvertretend für diese Metriken die Dauer der Nutzung, wie z. B. kumulative Stunden der Nutzung von HF-emittierenden Geräten (z. B. handgehaltene Radargeräte, medizinische Anwendungen oder Wearables). Bei Fernfeldbedingungen werden wir die kumulative Lebenszeitexposition einbeziehen, die für die Person auf der Grundlage der gemessenen HF EMF am Arbeitsplatz oder zu Hause und der Expositionsdauer berechnet wurde (z. B. berufliche Exposition bei Radaranlagen).

Wir werden ausschließen:

Studien, die elektromagnetische Felder oberhalb oder unterhalb des relevanten Frequenzbereichs untersuchen oder sich ausschließlich mit Ko-Expositionen beschäftigen. Ebenso werden Studien, die HF EMF anwenden, um Gewebe weit über physiologische Werte (> 42°C) zu erhitzen und damit zu schädigen oder zu zerstören, ausgeschlossen. Studien, die Kontaktstrom untersuchen, werden ebenfalls ausgeschlossen. Epidemiologische Studien, die die geokodierte Entfernung oder die selbst geschätzte Exposition bei Basisstationen als einzige Expositionsmetrik verwenden, sind nicht geeignet, da diese Parameter nur schlecht mit der persönlichen HF EMF-Exposition korrelieren [66]. Aufgrund des fehlenden Zeitbezuges und der damit verbundenen Schwierigkeit, kausale Effekte nachzuweisen, schließen wir Querschnittsstudien aus. Darüber hinaus werden Studien ohne Abschätzung der individuellen Exposition (z.B. ökologische Studien) ebenfalls von diesem Review ausgeschlossen, da die individuelle Exposition in solchen Studien sehr unsicher ist.

2.1.3 Arten von Komparatoren

Wir werden nur Studien berücksichtigen, die eine Kontrollbedingung ohne Exposition (d.h. kein höheres Niveau als die Hintergrundbelastung) oder eine Expositionsbedingung auf niedrigerem Niveau beinhalten. Bestenfalls umfasst die Kontrollbedingung in experimentellen Studien Probanden oder Tiere, die schein-exponiert sind, d.h. Bedingungen, die denen der exponierten Probanden oder Tiere ähnlich sind, mit Ausnahme der HF EMF-Exposition. Käfigkontrollen sind ebenfalls zulässig. Die Kontrollbedingung darf jedoch keine anderen Expositionen (z. B. Chemikalien, andere

EMF, Anästhesie) oder belastende Manipulationen (z. B. Ruhigstellung, Lärm) enthalten, die in der/den Expositionsgruppe(n) nicht vorhanden sind.

2.1.4 Arten von Resultaten

Angesichts des Fehlens eines etablierten biologischen Mechanismus für jedes Ergebnis abgesehen von der thermischen Wirkung, werden alle berichteten Wirkungen einbezogen, unabhängig davon, ob sie potenziell schädlich, nützlich (therapeutisch) oder von unklarer gesundheitlicher Relevanz sind. Diese Wirkungen können gesundheitsbezogene (z. B. Augenschäden, Krebs), physiologische (z. B. Gehirnaktivität), verhaltensbezogene (z. B. motorische Aktivität oder Angst) oder therapeutische Endpunkte umfassen.

2.1.5 Arten von Studien

Journalartikel, die Primärdaten aus tierexperimentellen Studien (experimental animal studies, EA), kontrollierten Humanstudien (human controlled trials, HCT) (einfach- oder doppelblind) sowie epidemiologische Kohorten- (epidemiological cohort, Co) und Fall-Kontroll-Studien (case-control, CaCo) berichten, werden einbezogen.

Ausgeschlossen werden Reviews, Meta-Analysen, Stellungnahmen, Forschungsberichte, Kommentare, Leitartikel, Konferenz-Abstracts, dosimetrische Studien, Fallstudien und Studien über elektromagnetische Interferenzen mit Implantaten.

Es gibt keine Beschränkungen hinsichtlich des Veröffentlichungsdatums.

Es werden nur von Artikel mit Peer-Review-Verfahren in englischer und deutscher Sprache aufgenommen.

PECOS	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Population	- Angehörige der Allgemeinbevölkerung und berufstätige Personen (keine Einschränkung hinsichtlich Geschlecht, Alter oder anderer individueller Merkmale)	- *In vitro*-Studien (Studien an Zellen, isolierten Organen und Geweben) - *In silico*-Studien

	- Säugetiere (keine Einschränkung hinsichtlich Art, Geschlecht, Alter oder anderer individueller Merkmale)	
Exposition	- 5G-relevante HF EMF (3-4 GHz und 20-30 GHz) auf jedem Expositionsniveau, die durch gemessene oder berechnete Metriken gemäß Abschnitt 2.1.2 quantifiziert werden - Expositionssurrogate für die Dauer der Nutzung, wie z. B. kumulative Stunden der Nutzung von HF-emittierenden Geräten oder kumulative lebenslange Exposition, die für die Person auf der Grundlage von gemessenen HF EMF am Arbeitsplatz oder zu Hause und der Expositionsdauer berechnet wird	- Statische oder extrem niederfrequente magnetische und/oder elektrische Felder - HF EMF < 3 GHz, > 4 GHz, < 20 GHz, > 30 GHz - HF EMF mit dem alleinigen Ziel, Gewebe deutlich über physiologisch relevante Werte (> 42°C) zu erhitzen und Gewebe zu schädigen oder zu zerstören - Kontaktstrom - Ko-Expositionen - Nicht spezifizierte Expositionsmetriken
Vergleichsexposition	- Nicht-exponierte Kontrollbedingung (d. h. keine Exposition über das Hintergrundniveau hinaus) oder eine Bedingung mit schwächerer Exposition	- Keine Kontrollgruppe oder unklare Bedingungen
Ergebnis	- Alle gesundheitsbezogenen (z. B. Augenschäden, Krebs), physiologischen (z. B. Gehirnaktivität), verhaltensbezogenen (z. B. motorische Aktivität oder Angst) oder therapeutischen Endpunkte	- keine
Studiendesign	- Tierexperimentelle Studien (EA) - Kontrollierte Studien am Menschen (einfach- oder doppelblind) (HCT) - Epidemiologische Kohorten (Co)- und Fall-Kontroll-Studien (CaCo)	- Reviews und Meta-Analysen -Kommentare, Stellungsnahmen, Leitartikel - Forschungsberichte - Konferenz-Abstracts - Dosimetrische Studien

		- Fallstudien - Studien zu elektromagnetischen Störungen bei Implantaten - Studien ohne Peer-Review

2.2 Informationsquellen und Suchstrategie

Unsere primären Informationsquellen sind PubMed (https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/), das Web of Science (https://www.webofscience.com) und das EMF-Portal (https://www.emf-portal.org), eine spezialisierte Datenbank für wissenschaftliche Literatur zu biologischen und gesundheitlichen Wirkungen elektromagnetischer Felder. Die Aufnahme von Studien in das EMF-Portal basiert auf systematischen Suchstrategien in großen Literaturdatenbanken, einschließlich PubMed (U.S. National Library of Medicine, National Institutes of Health), dem Web of Science Core Collection (Clarivate) und der Xplore Digital Library des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Wissenschaftliche Zeitschriften, die nicht in diesen Datenbanken gelistet sind, sowie Referenzlisten von Reviews werden zusätzlich gesichtet, um weitere relevante Publikationen zu identifizieren. Somit umfasst das EMF-Portal EMF-relevante Artikel aus den wichtigsten internationalen Literaturdatenbanken und weiteren Quellen.

Das Design der Suchstrategie basiert auf (i) unserer langjährigen Erfahrung in der Literaturrecherche als Betreiber unserer Datenbank, dem EMF-Portal, (ii) unseren früheren systematischen Reviews [36-38,63,64] sowie (iii) den von der WHO in Auftrag gegebenen systematischen Review-Protokollen [22-24,26-31]. Die Suche nach Säugetieren basierte auf dem Suchfilter für Tierstudien des NTP (https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/2023-08/Standard_Search_Strings_for_Literature_Database_Searches_for_Preparing_Report_on_Carcinogens_Monographs_2023_final_508.pdf).

Für die Suche im EMF-Portal werden die folgenden Punkte ausgewählt: "Experimentelle Studien", "Epidemiologische Studien" und "Medizinische Anwendungen" als Themen und "Hochfrequenz (≥ 10 MHz)" und "Mobilfunk" als Frequenzbereiche. Es werden keine

weiteren Suchbegriffe verwendet, d.h. es wird nach allen Artikeln gesucht, auf die die oben genannten Punkte zutreffen.

Die Suchen in PubMed und dem Web of Science basieren auf einer Suche in Titel und Abstracts unter Verwendung einer Liste von expositionsbezogenen Suchbegriffen (z. B. "Millimeterwelle" oder "5G"), in Kombination mit relevanten Spezies (z. B. "Mensch" oder "Hamster"). Artikel mit irrelevanten Schlüsselbegriffen für unser Review (z. B. "Nomophobie") werden ausgeschlossen. Die Begriffe wurden angepasst, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Präzision und Vollständigkeit der Ergebnisse zu erreichen. Durch ein manuelles Trial-and-Error-Verfahren konnte die Anzahl der Schlüsselwörter reduziert werden, indem einzelne Schlüsselwörter entfernt wurden und geprüft wurde, ob die Suche zu weniger Treffern führte oder nicht. Alle Suchbegriffe, die keine Veränderung in unserer Suche hervorgerufen haben, wurden entfernt.

Um unsere Suchstrategien zu kalibrieren, führten wir eine bibliografische Suche ohne zeitliche Begrenzung durch. Anschließend verglichen wir die Suchergebnisse mit dem Inhalt einer Bibliothek von 41 "Kernstudien". Diese Kernstudien wurden als relevant für unser Thema identifiziert und dem umfassenden Review von Simko und Mattsson (2019) [39] entnommen. Bei unserer Suche wurden 100 % der Studien gefunden. Die vollständigen Suchstrings in den verschiedenen elektronischen Datenbanken sind in Anhang 4 enthalten. Die Suche wird durch rückwärts gerichtete Zitationsrecherchen in eingeschlossenen Publikationen und relevanten Reviews ergänzt. Die Suche wird zu Beginn der Arbeiten am Review durchgeführt und vor der endgültigen Analyse wiederholt.

2.3 Auswahl der Studien

Alle bibliografischen Datensätze werden in die Webanwendung Covidence importiert und die automatische Erkennung und Entfernung von Duplikaten wird genutzt. Die Überprüfung aller potenziell relevanten Artikel auf ihre Eignung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst überprüfen zwei Autor*innen unabhängig voneinander die Titel und Abstracts der identifizierten Artikel. Datensätze, die die Einschlusskriterien (siehe 2.1 Einschlusskriterien) nicht erfüllen, werden ausgeschlossen. In der zweiten Phase werden die Volltexte der Artikel, welche die Einschlusskriterien erfüllen, abgerufen und

unabhängig voneinander von zwei Autor*innen überprüft. Die Autor*innen treffen gemeinsam eine endgültige Entscheidung über die Aufnahme oder den Ausschluss der begutachteten Artikel. Eventuelle Meinungsverschiedenheiten werden durch Diskussion mit einer/m weiteren Autor*in gelöst. Wir werden den Auswahlprozess in einem Flussdiagramm gemäß den PRISMA-Berichterstattungsrichtlinien [61] dokumentieren. Für jeden Artikel, der in der Phase des Volltextscreenings ausgeschlossen wurde, wird eine separate Tabelle mit dem Grund des Ausschlusses erstellt (bei mehreren Ausschlussgründen wird der eindeutigste Grund angegeben).

2.4 Datenextraktion

Zwei Autor*innen extrahieren unabhängig voneinander Details zu Design, Methoden und Ergebnissen jeder Studie. Die extrahierten Daten umfassen bibliografische Daten, Finanzierung, Erklärung zu Interessenskonflikten, Studiendesign, untersuchte Spezies sowie Anzahl und Größe der Gruppen, Expositionsparameter (z. B. Frequenz, Feldstärke, Expositionsdauer und Signalmuster), Studienschwerpunkt (Endpunkte) und Methode, Ergebnisse und zusätzliche Anmerkungen. Bei epidemiologischen Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien werden darüber hinaus die untersuchte Studienpopulation und Störfaktoren erfasst. Eine umfassende Liste der Parameter, die aus jeder Studie extrahiert werden, finden Sie in Anhang 5. Anhang 6 zeigt eine vorläufige Extraktionstabelle mit den wichtigsten Studienparametern auf der Grundlage von zwei Beispielstudien [67,68]. Ähnliche Tabellen werden in unserem systematischen Review mit allen eingeschlossenen Studien präsentiert.

2.5 Bewertung der Studien

Die interne Validität der eingeschlossenen Studien (d. h. das Ausmaß, in dem einzelne Studien den Bias im Studiendesign, in den Methoden und in der Analyse der Ergebnisse minimiert haben) sowie die Qualität der eingeschlossenen Studien werden anhand einer modifizierten Version des vom Office of Health Assessment and Translation (OHAT) des National Toxicology Program empfohlenen Ansatzes bewertet [58,62]. Dieser Ansatz wurde validiert und hat sich in unseren früheren systematischen Reviews als geeignet erwiesen [36-38,63,64]. Das OHAT Risk-of-Bias (RoB) Rating Tool for Human and Animal Studies wurde für Studien mit dem Schwerpunkt Umweltgesundheit und Toxikologie entwickelt. Es besteht aus einer Reihe von Fragen und enthält detaillierte Anweisungen

zur Bewertung der Glaubwürdigkeit der Ergebnisse, d. h. des Risikos einer Über- oder Unterschätzung der Expositionswirkungen.

Wir werden die folgenden Fragen prüfen:

1. Wurde das verabreichte Expositionsniveau angemessen randomisiert? (EA, HCT)
2. Wurde die Zuweisung zu den Studiengruppen angemessen verblindet? (EA, HCT)
3. Wurden durch die Selektion der Studienteilnehmer geeignete Vergleichsgruppen gebildet? (Co, CaCo)
4. Wurden im Studiendesign oder in der Analyse wichtige Confounder und andere Einflussfaktoren berücksichtigt? (Co, CaCo)
5. Waren die Versuchsbedingungen in allen Studiengruppen identisch? (EA, HCT)
6. Wurden das Studienpersonal und die Versuchspersonen während der Versuche für die Exposition verblindet? (EA, HCT)
7. Waren die Ergebnisdaten vollständig, ohne Verlust oder Ausschluss von der Analyse? (EA, HCT, Co, CaCo)
8. *Ist die Charakterisierung der Exposition ausreichend?* (EA, HCT, Co, CaCo)
9. Können wir der Auswertung der Ergebnisse trauen? (EA, HCT, Co, CaCo)
10. Wurden alle gemessenen Ergebnisse berichtet? (EA, HCT, Co, CaCo)
11. Gab es andere potenzielle Bedrohungen für die interne Validität? (EA, HCT, Co, CaCo)

Für unser Review werden einige Aspekte des OHAT-Protokolls modifiziert. Wir werden die Bewertungskriterien für Crossover-Studien für Frage 1 *Wurde das verabreichte Expositionsniveau angemessen randomisiert?* nach Ding et al. (2015) [69] einbeziehen, da OHAT keine Angaben zur Behandlung von Crossover-Studien macht. Frage 4 *Wurden im Studiendesign oder in der Analyse wichtige Confounder und andere Einflussfaktoren berücksichtigt?* wird angepasst, da die Endpunkte im Review nicht eingeschränkt werden. Aufgrund dieses umfassenden Ansatzes werden Confounder nicht für jeden Endpunkt vordefiniert, wie es das OHAT-Tool vorschlägt, und es werden nur zwei RoB-Kategorien für dieses Kriterium verwendet. Außerdem wird die Bewertung für Frage 5. *Waren die Versuchsbedingungen in den verschiedenen Studiengruppen identisch?* neu definiert. Im ursprünglichen OHAT-Protokoll gilt dieses Kriterium nur für Tierstudien. In

Humanstudien mit EMF-Exposition könnten jedoch systematische Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen während der Exposition und der Scheinexposition die Ergebnisse ebenfalls erheblich verfälschen. Daher ist dieses Kriterium entscheidend für ein gut kontrolliertes Design in Humanstudien. Schließlich haben wir zu Frage 8 *Ist die Charakterisierung der Exposition ausreichend?* detaillierte Expositionsmerkmale hinzugefügt, um die Bewertungskriterien zu spezifizieren. Weitere Einzelheiten zu den bewerteten Bereichen des Bias Risikos und den Fragen gemäß OHAT sind in Anhang 7 zu finden. Alle Änderungen sind im Detail unter jeder Frage aufgeführt.

Die OHAT-Kriterien werden von mindestens zwei Autor*innen unabhängig voneinander für alle eingeschlossenen Studien nach den folgenden Kriterien bewertet: "++" definitiv geringes Risiko eines Bias, "+" wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias, "-" wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias oder "--" definitiv hohes Risiko eines Bias. Unstimmigkeiten in der Bewertung des Bias Risikos werden zwischen den Autor*innen diskutiert und im Konsens gelöst.

Schließlich wird der OHAT-Ansatz genutzt, um einzelne Studien anhand von Qualitätskategorien zu klassifizieren. Dieser Ansatz sieht ein dreistufiges System zur Bewertung der Studienqualität vor (1. Stufe: hohes Vertrauen in die berichteten Ergebnisse, 2. Stufe: mäßiges Vertrauen in die berichteten Ergebnisse, oder 3. Stufe: geringes Vertrauen in die berichteten Ergebnisse). Die Einstufung einer Studie in eine Qualitätsstufe erfolgt auf Grundlage der Bewertungen des Bias Risikos. Drei kritische Kriterien für das Bias Risiko, auch "Schlüsselkriterien" genannt, erhalten das größte Gewicht bei der Bestimmung der Studienqualität. Bei experimentellen Studien werden diese Schlüsselkriterien sein: (1) Vertrauen in die Charakterisierung der Exposition, (2) Vertrauen in die Ergebnisbewertung und (3) identische Versuchsbedingungen in allen Studiengruppen. Bei epidemiologischen Studien sind die Hauptkriterien: (1) Vertrauen in die Charakterisierung der Exposition, (2) Vertrauen in die Ergebnisbewertung und (3) Confounder und andere Einflussfaktoren. Den anderen Kriterien wird bei der Bestimmung der Studienqualität weniger Gewicht beigemessen. Weitere Einzelheiten zu den Bewertungen der Studienqualität finden Sie in Anhang 8.

2.6 Synthese der Ergebnisse

Wir gruppieren und ordnen die Studien nach einer sinnvollen Kombination von PECOS-Kriterien (siehe Kapitel 2.1.) in Tabellen (siehe Kapitel 2.4). Hinsichtlich der Population (P) unterscheiden wir zwischen Menschen und Tieren. Studien, welche die Zulassungskriterien für die Exposition (E) erfüllen und über externe oder interne Expositionskennzahlen gemäß Kapitel 2.1.2 A, B oder C berichten, werden als ausreichend ähnlich angesehen, um in den Hauptanalysen zusammengefasst zu werden. Wir werden jedoch Ergebnisse zu Expositionsstärken unterhalb und oberhalb der Grenzwerte getrennt betrachten. In Bezug auf den Komparator (C) werden wir sowohl die Schein- als auch die Nicht-Exposition als ausreichend ähnlich betrachten, um sie in den Hauptanalysen zusammenzufassen. Da wir keine Einschränkung hinsichtlich des Ergebnisses (O) vornehmen, erwarten wir ein breites Spektrum an unterschiedlichen Ergebnissen. Dennoch werden wir in den Fällen, in denen die eingeschlossenen Studien für ein bestimmtes Ergebnis hinreichend ähnlich sind, diese Studien sinnvoll gruppieren. Darüber hinaus werden wir die Studien nach ihrem Studiendesign (S) in die Gruppen der tierexperimentelle Studie, der kontrollierten Humanstudie und der epidemiologischen Studie unterteilen. Ein Beispiel für eine vorläufige Extraktionstabelle mit den wichtigsten Studienmerkmalen und Ergebnissen von zwei tierexperimentellen Studien finden Sie in Anhang 6.

2.6.1 Qualitative Synthese

Wir werden gemäß den 'Synthesis Without Meta-analysis reporting guidelines' [70] eine qualitative Synthese durchführen. Dadurch wird unsere narrative Synthese und Vorgehensweise transparent dokumentiert. Beispielsweise werden die Ergebnisse der eingeschlossenen Studien systematisch in einer narrativen Bewertung zusammengefasst, indem wir die Ergebnisse für bestimmte Endpunkte in die Kategorien "Effekt gefunden"/"kein Effekt gefunden" übersetzen. Wir werden die Effektkategorien und die Studienqualität nach OHAT grafisch darstellen.

2.6.2 Quantitative Synthese

Basierend auf unserer täglichen Arbeit mit dem EMF-Portal und mehreren bereits veröffentlichten (systematischen) Reviews [36,39,63,64] erwarten wir eine erhebliche Heterogenität hinsichtlich der untersuchten Population, der Exposition, der Ergebnisse

und der Methodik. Wenn ausreichend ähnliche Studien vorhanden sind um ein aussagekräftiges kombiniertes Ergebnis zu liefern [71], führen wir eine Meta-Analyse für eine bestimmte Kombination von PECOS-Kriterien durch (z. B. für die gleiche Studienpopulation, Exposition, Ergebnis und Studienart). Für eine aussagekräftige Analyse wird eine Mindestanzahl von 10 Studien für eine bestimmte Kombination von PECOS-Kriterien festgelegt.

Wenn eine Meta-Analyse durchführbar ist, verwenden wir die mittlere Abweichung (MD) oder die mittlere Standardabweichung (SMD) für kontinuierliche Variablen als Effektgrößen [72]. Dichotome Variablen werden als Odds Ratios (OR) oder Risk Ratios (RR) als Effektgrößen ausgedrückt [60].

Die Meta-Analyse basiert auf einem Modell mit zufälligen Effekten, da der zugrundeliegende Effekt aufgrund des explorativen Charakters und der Vielfalt der Studien unterschiedlich sein dürfte [72].

2.6.3 Bewertung der Heterogenität

Die statistische Heterogenität wird anhand des I^2-Wertes bewertet. Dieser gibt den Anteil der Gesamtvarianz zwischen den Studien an, der auf tatsächliche Unterschiede in den Effektgrößen zurückzuführen ist und nicht auf Zufall. I^2-Werte von 25 %, 50 % und 75 % gelten als Hinweis auf einen geringen, mäßigen bzw. hohen Grad an Heterogenität [73]. Die Varianz zwischen den Studien wird anhand der Tau-Quadrat-Statistik (τ^2) bewertet. Um die Ursachen für die Heterogenität zu erforschen, führen wir Subgruppenanalysen für identifizierte Spezifikationen durch, z. B. Population (Allgemeinbevölkerung, Arbeiter), Tierspezies, Geschlecht, Altersgruppen, Expositionsquelle, Frequenzbereich (FR1, FR2), Expositionsdauer (kurzzeitig, langfristig), Bias Risiko (hoch, niedrig), Datum der Veröffentlichung und Finanzierung (z.B. Industrie, öffentlich).

2.6.4 Sensitivitätsanalyse

Durch Sensitivitätsanalysen wird der Einfluss jeder einzelnen Studie in der Metaanalyse abgeschätzt, indem jeweils eine Studie weggelassen wird und die zusammenfassenden Schätzungen neu berechnet werden (Leave-One-Out-Methode). [72]. Die

Zuverlässigkeit der Annahmen, die bei der Anwendung des OHAT Risk-of-Bias Rating Tool getroffen wurden, wird bewertet, indem die Ergebnisse von Studien in den Gesamtschätzungen mit den Ergebnissen von Studien mit niedrigem Bias-Risiko verglichen werden.

2.6.5 Publikationsbias

Das Publikationsbias wird grafisch anhand von Trichterdiagrammen bewertet und visuell auf fehlende kleine Studien analysiert [72]. Als statistische Methode wird der Egger-Test für das Publikationsbias angewendet [72].

2.7 Bewertung der Sicherheit der Evidenz

Wir werden das Vertrauen in die Evidenz nach dem in den OHAT-Leitlinien beschriebenen Ansatz bewerten, der auf dem GRADE-Ansatz basiert. In die Evidenzsynthese werden nur Studien einbezogen, die nach dem OHAT-Ansatz der ersten und zweiten Qualitätsstufe zugeordnet wurden. Nach dem OHAT-Ansatz werden die Studien zu einem bestimmten Ergebnis zunächst nach den wichtigsten Merkmalen des Studiendesigns gruppiert, und jede Studiengruppe erhält eine erste Konfidenzbewertung nach diesen Merkmalen. Diese anfängliche Bewertung wird bei Faktoren, die das Vertrauen in die Ergebnisse verringern (z. B. Bias Risiko und unerklärte Inkonsistenz), herabgestuft und bei Faktoren, die das Vertrauen in die Ergebnisse erhöhen (z. B. große Effektstärke, Dosis-Wirkungs-Beziehung und Konsistenz zwischen Studiendesigns/Populationen), heraufgestuft. Die Bewertung der Evidenz wird auf Endpunktebene durchgeführt. Es werden vier Deskriptoren verwendet, um den Grad des Vertrauens in die Evidenzlage anzugeben: "hohes", "mäßiges", "geringes" und "sehr geringes" Vertrauen.

- Hohes Vertrauen: Die tatsächliche Wirkung spiegelt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit in der gefundenen Beziehung wider.
- Mäßiges Vertrauen: Die wahre Wirkung kann sich in der gefundenen Beziehung widerspiegeln.
- Geringes Vertrauen: Die wahre Wirkung kann sich von der gefundenen Beziehung unterscheiden.

- Sehr geringes Vertrauen: Die wahre Wirkung weicht höchstwahrscheinlich von der gefunden Beziehung ab.

Schließlich wird gemäß OHAT das Vertrauen in die Evidenz für gesundheitliche Wirkungen unter Berücksichtigung der Richtung der Wirkung ("gesundheitliche Wirkung" oder "keine gesundheitliche Wirkung") in fünf Evidenzgrade übersetzt: "hoch", "mäßig", "gering", "Hinweise auf keine gesundheitlichen Auswirkungen" und "unzureichende Evidenz". Die Evidenzgrade "hoch", "mäßig" und "gering" ergeben sich direkt aus dem Grad des Vertrauens in die Evidenz (siehe oben) sofern eine Verbindung zwischen der Exposition und gesundheitlichen Auswirkungen besteht. Wenn nur ein "sehr geringes" oder "kein Vertrauen" in die Evidenz festgestellt wird, wird der Evidenzgrad als "unzureichende Evidenz einer gesundheitlichen Wirkung" bezeichnet. Laut OHAT wird der Deskriptor "keine Evidenz einer gesundheitlichen Wirkung" verwendet, um anzuzeigen, dass die Exposition nicht mit einer gesundheitlichen Auswirkung verbunden ist. Aufgrund der inhärenten Schwierigkeit, eine negative Wirkung nachzuweisen, wird die Schlussfolgerung "keine Evidenz einer gesundheitlichen Auswirkung" nur dann gezogen, wenn ein hohes Maß an Vertrauen in die Evidenzlage besteht.

3. ABSCHLIESSENDE BEMERKUNGEN

Wir stellen das Protokoll für ein systematisches Review vor, das die potenziellen physiologischen und gesundheitsbezogenen Auswirkungen von 5G-relevanten HF EMF bei Menschen und Säugetieren bewerten wird. Etwaige Änderungen gegenüber dem aktuellen Protokoll werden in der wissenschaftlichen Veröffentlichung des systematischen Reviews mit entsprechender Begründung dargelegt. Das systematische Review befindet sich derzeit in der Phase der Datenerhebung, die im September 2023 abgeschlossen sein soll.

Das Review wird im Rahmen eines größeren Projekts durchgeführt, in dem die Funktionsweise von 5G und die berufliche Exposition in 5G-Campusnetzen unter Berücksichtigung gesundheitlicher Aspekte und der Einhaltung vorgegebener Expositionsgrenzwerte erforscht wird.

Ethik und Verbreitung

Eine ethische Genehmigung ist nicht erforderlich, da im Rahmen dieser Studie keine Primärdaten erhoben werden. Die Dissemination der abgeschlossenen Studie erfolgt durch Konferenzpräsentationen und die Veröffentlichung in einem wissenschaftlichen Journal. Alle relevanten Daten sind in der im vorliegenden Dokument und den ergänzenden Dateien enthalten.

Danksagungen

Diese Arbeit wurde im Rahmen einer Postersitzung auf der Konferenz BioEM 2023 in Oxford, UK, vorgestellt.

Finanzielle Unterstützung

Diese Arbeit wird vom Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen im Rahmen des 5G.NRW-Förderwettbewerbs unterstützt. Der Förderer hatte keinen Einfluss auf die Entwicklung des Protokolls.

Anmeldung

PROSPERO CRD42022374434

Autor*innenerklärung (CRediT-Autorenbeitragserklärung)

Lambert Bodewein: Methodik, Schreiben - Originalentwurf, Garant der Überprüfung. **Dagmar Dechent**: Methodik, Schreiben - Überprüfung und Bearbeitung. **Tanja Emonds**: Schreiben - Durchsicht & Redaktion. **David Graefrath**: Schreiben - Überprüfen & Redigieren. **Julia Krabbe**: Schreiben - Rezension & Lektorat, Betreuung. **Philine Johanna Scheelhaase**: Schreiben - Rezension & Lektorat. **Gernot Schmid**: Methodik, Schreiben - Begutachtung & Lektorat. **Pia Schneeweiss**: Schreiben - Überprüfung & Redaktion. **Sarah Driessen**: Konzeptualisierung, Methodik, Schreiben - Begutachtung & Lektorat, Akquisition von Fördermitteln, Betreuung.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autor*innen erklären, dass ihnen keine finanziellen Interessenkonflikte oder persönlichen Beziehungen bekannt sind, die die Arbeit in diesem Artikel beeinflussen könnten.

Schlüsselwörter: Systematisches Review, Mobiltelefon, Öffentliche Gesundheit

Wortzahl: 8.873 Wörter

Referenzen des Protokolls

1 Gajšek P, Ravazzani P, Wiart J, *et al.* Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz). *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2013;25:37–44.

2 Calin MD, Ursachi C, Helerea E. Electromagnetic environment characteristics in an urban area. *2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, ISEEE 2013 - Proceedings*. Published Online First: 2013. doi: 10.1109/ISEEE.2013.6674381

3 Kljajic D, Djuric N. Comparative analysis of EMF monitoring campaigns in the campus area of the University of Novi Sad. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020;27:14735–50.

4 Kurnaz C, Mutlu M. Comprehensive radiofrequency electromagnetic field measurements and assessments: a city center example. *Environ Monit Assess*. 2020;192:1–14.

5 SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks). Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). European Commission, Luxembourg. 2015. https://health.ec.europa.eu/system/files/2016-11/scenihr_o_041_0.pdf (accessed 23 February 2023)

6 Urbinello D, Joseph W, Verloock L, *et al.* Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in everyday environments across European cities. *Environ Res*. 2014;134:134–42.

7 ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys* 2020;**118**:483–524. doi:10.1097/HP.0000000000001210

8 IEEE. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. *IEEE Std C951-2019 (Revision of IEEE Std C951-2005/ Incorporates IEEE Std C951-2019/Cor 1-2019)* 2019;:1–312. doi:10.1109/IEEESTD.2019.8859679

9 Kaur P, Rai U, Singh R. Genotoxic Risks to Male Reproductive Health from Radiofrequency Radiation. *Cells* 2023;**12**:594. doi:10.3390/CELLS12040594

10 Sciorio R, Tramontano L, Esteves SC. Effects of mobile phone radiofrequency radiation on sperm quality. *Zygote* 2022;**30**:159–68. doi:10.1017/S096719942100037X

11 Hu C, Zuo H, Li Y. Effects of Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Neurotransmitters in the Brain. *Front Public Health* 2021;**9**. doi:10.3389/FPUBH.2021.691880

12 Schuermann D, Mevissen M. Manmade electromagnetic fields and oxidative stress— biological effects and consequences for health. *Int J Mol Sci* 2021;**22**:3772. doi:10.3390/IJMS22073772

13 Yu G, Bai Z, Song C, *et al.* Current progress on the effect of mobile phone radiation on sperm quality: An updated systematic review and meta-analysis of human and animal studies. *Environmental Pollution* 2021;**282**:116952. doi:10.1016/J.ENVPOL.2021.116952

14 IARC (International Agency for Research on Cancer). Non-ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 102. *IARC Press* 2013.

15 NTP (National Toxicology Program). Toxicology and carcinogenesis studies in Sprague Dawley (Hsd:Sprague Dawley SD) rats exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. National Toxicology Program technical report series. Published Online First: 1 November 2018. doi:10.22427/NTP-TR-595
16 NTP (National Toxicology Program). Toxicology and carcinogenesis studies in B6C3F1/N mice exposed to whole-body radio frequency radiation at a frequency (1,900 MHz) and modulations (GSM and CDMA) used by cell phones. National Toxicology Program technical report series. Published Online First: 1 November 2018. doi:10.22427/NTP-TR-596
17 Falcioni L, Bua L, Tibaldi E, *et al.* Report of final results regarding brain and heart tumors in Sprague-Dawley rats exposed from prenatal life until natural death to mobile phone radiofrequency field representative of a 1.8 GHz GSM base station environmental emission. *Environ Res* 2018;**165**:496–503. doi:10.1016/J.ENVRES.2018.01.037
18 ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). ICNIRP note: Critical evaluation of two radiofrequency electromagnetic field animal carcinogenicity studies published in 2018. *Health Phys* 2020;**118**:525–32. doi:10.1097/HP.0000000000001137
19 Kuehne A, Oberacker E, Waiczies H, *et al.* Solving the Time- and Frequency-Multiplexed Problem of Constrained Radiofrequency Induced Hyperthermia. *Cancers (Basel)* 2020;**12**:1072. doi:10.3390/cancers12051072
20 IARC Monographs Priorities Group. Advisory Group recommendations on priorities for the IARC Monographs. *Lancet Oncol* 2019;**20**:763–4. doi:10.1016/S1470-2045(19)30246-3
21 Wallace J, Selmaoui B. Effect of mobile phone radiofrequency signal on the alpha rhythm of human waking EEG: A review. *Environ Res* 2019;**175**:274–86. doi:10.1016/J.ENVRES.2019.05.016
22 Pophof B, Burns J, Danker-Hopfe H, *et al.* The effect of exposure to radiofrequency electromagnetic fields on cognitive performance in human experimental studies: A protocol for a systematic review. *Environ Int* 2021;**157**:106783. doi:10.1016/J.ENVINT.2021.106783
23 Pacchierotti F, Ardoino L, Benassi B, *et al.* Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field (RF-EMF) exposure on male fertility and pregnancy and birth outcomes: Protocols for a systematic review of experimental studies in non-human mammals and in human sperm exposed in vitro. *Environ Int* 2021;**157**:106806. doi:10.1016/J.ENVINT.2021.106806
24 Kenny RPW, Millar EB, Adesanya A, *et al.* The effects of radiofrequency exposure on male fertility and adverse reproductive outcomes: A protocol for two systematic reviews of human observational studies with meta-analysis. *Environ Int* 2022;**158**:106968. doi:10.1016/J.ENVINT.2021.106968
25 Verbeek J, Oftedal G, Feychting M, *et al.* Prioritizing health outcomes when assessing the effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A survey among experts. *Environ Int* 2021;**146**:106300. doi:10.1016/J.ENVINT.2020.106300
26 Mevissen M, Ward JM, Kopp-Schneider A, *et al.* Effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF EMF) on cancer in laboratory animal studies: A protocol for a systematic review. *Environ Int* 2022;**161**:107106. doi:10.1016/J.ENVINT.2022.107106
27 Benke G, Abramson MJ, Zeleke BM, *et al.* The effect of long-term radiofrequency exposure on cognition in human observational studies: A protocol for a systematic review. *Environ Int* 2022;**159**:106972. doi:10.1016/J.ENVINT.2021.106972

28 Bosch-Capblanch X, Esu E, Dongus S, *et al.* The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on human self-reported symptoms: A protocol for a systematic review of human experimental studies. *Environ Int* 2022;**158**:106953. doi:10.1016/J.ENVINT.2021.106953
29 Röösli M, Dongus S, Jalilian H, *et al.* The effects of radiofrequency electromagnetic fields exposure on tinnitus, migraine and non-specific symptoms in the general and working population: A protocol for a systematic review on human observational studies. *Environ Int* 2021;**157**:106852. doi:10.1016/J.ENVINT.2021.106852
30 Henschenmacher B, Bitsch A, de las Heras Gala T, *et al.* The effect of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) on biomarkers of oxidative stress in vivo and in vitro: A protocol for a systematic review. *Environ Int* 2022;**158**:106932. doi:10.1016/J.ENVINT.2021.106932
31 Lagorio S, Blettner M, Baaken D, *et al.* The effect of exposure to radiofrequency fields on cancer risk in the general and working population: A protocol for a systematic review of human observational studies. *Environ Int* 2021;**157**:106828. doi:10.1016/J.ENVINT.2021.106828
32 Rowley J, Mazar H. Misunderstandings about radiofrequency electromagnetic field exposure and 5G misinformation. In: *2021 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS)*. IEEE 2021. 219–21. doi:10.1109/COMCAS52219.2021.9629063
33 Nyberg NR, McCredden JE, Weller SG, *et al.* The European Union prioritises economics over health in the rollout of radiofrequency technologies. *Rev Environ Health* Published Online First: 22 September 2022. doi:10.1515/reveh-2022-0106
34 Jolley D, Paterson JL. Pylons ablaze: Examining the role of 5G COVID-19 conspiracy beliefs and support for violence. *British Journal of Social Psychology* 2020;**59**:628–40. doi:10.1111/BJSO.12394
35 Bruns A, Harrington S, Hurcombe E. 'Corona? 5G? or both?': the dynamics of COVID-19/5G conspiracy theories on Facebook. *Media International Australia* 2020;**177**:12–29. doi:10.1177/1329878X20946113/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1329878X20946113-FIG2.JPEG
36 Bodewein L, Dechent D, Graefrath D, *et al.* Systematic review of the physiological and health-related effects of radiofrequency electromagnetic field exposure from wireless communication devices on children and adolescents in experimental and epidemiological human studies. *PLoS One* 2022;**17**:e0268641. doi:10.1371/journal.pone.0268641
37 Schmiedchen K, Petri AK, Driessen S, *et al.* Systematic review of biological effects of exposure to static electric fields. Part II: Invertebrates and plants. *Environ Res* 2018;**160**:60–76. doi:10.1016/J.ENVRES.2017.09.013
38 Petri A-K, Schmiedchen K, Stunder D, *et al.* Biological effects of exposure to static electric fields in humans and vertebrates: a systematic review. *Environmental Health* 2017;**16**:41. doi:10.1186/s12940-017-0248-y
39 Simkó M, Mattsson M-O. 5G Wireless Communication and Health Effects—A Pragmatic Review Based on Available Studies Regarding 6 to 100 GHz. *Int J Environ Res Public Health* 2019;**16**:3406. doi:10.3390/ijerph16183406
40 Dongus S, Jalilian H, Schürmann D, *et al.* Health effects of WiFi radiation: a review based on systematic quality evaluation. *Crit Rev Environ Sci Technol* 2022;**52**:3547–66. doi:10.1080/10643389.2021.1951549/SUPPL_FILE/BEST_A_1951549_SM3517.DOCX

41 5G Observatory. 5G Spectrum. 2021.https://5gobservatory.eu/5g-spectrum/ (accessed 23 Feb 2023).
42 Qin TZ, Wang X, Du JZ, *et al.* Effects of radiofrequency field from 5G communications on the spatial memory and emotionality in mice. *Int J Environ Health Res* Published Online First: 2022. doi:10.1080/09603123.2022.2149708
43 Gallucci S, Fiocchi S, Bonato M, *et al.* Exposure Assessment to Radiofrequency Electromagnetic Fields in Occupational Military Scenarios: A Review. *Int J Environ Res Public Health* 2022;**19**. doi:10.3390/IJERPH19020920
44 Gupta AK, Venkataraman M, Joshi LT, *et al.* Potential use of microwave technology in dermatology. *Journal of Dermatological Treatment* 2022;**33**:2899–910. doi:10.1080/09546634.2022.2089333
45 ANSES. Opinion 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. 2022.https://www.anses.fr/en/system/files/AP2019SA0006EN-2.pdf (accessed 23 Feb 2023).
46 Belpoggi F. Health impact of 5G - current state of knowledge of 5G-related carcinogenic and reproductive/developmental hazards as they emerge from epidemiological studies and in vivo experimental studies. European Parliament. 2021. doi:10.2861/657478
47 Health Council of the Netherlands. Background document to the advisory report 5G and health. publication no. 2020/16Ae. 2020;:1–131.https://www.healthcouncil.nl/binaries/healthcouncil/documents/advisory-reports/2020/09/02/5g-and-health/Background-document-to-the-advisory-report-5G-and-health.pdf (accessed 13 Dec 2022).
48 Thielens A. Environmental impact of 5G - Publications Office of the EU. European Parliament, PE 690.021. 2021. doi:10.2861/318352
49 Karipidis K, Mate R, Urban D, *et al.* 5G mobile networks and health—a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 2021;**31**:585–605. doi:10.1038/s41370-021-00297-6
50 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;**31**:606–13. doi:10.1038/s41370-021-00307-7
51 Hinrikus H, Koppel T, Lass J, *et al.* Possible health effects on the human brain by various generations of mobile telecommunication: a review based estimation of 5G impact. *Int J Radiat Biol* 2022;**98**:1210–21. doi:10.1080/09553002.2022.2026516
52 Chiaraviglio L, Elzanaty A, Alouini MS. Health risks associated with 5G exposure: A view from the communications engineering perspective. *IEEE Open Journal of the Communications Society* 2021;**2**:2131–79. doi:10.1109/OJCOMS.2021.3106052
53 Sofri T, Rahim HA, Abdulmalek M, *et al.* Health Effects of 5G Base Station Exposure: A Systematic Review. *IEEE Access* 2022;**10**:41639–56. doi:10.1109/ACCESS.2021.3139385
54 Di Ciaula A. Towards 5G communication systems: Are there health implications? *Int J Hyg Environ Health* 2018;**221**:367–75. doi:10.1016/J.IJHEH.2018.01.011
55 Russell CL. 5 G wireless telecommunications expansion: Public health and environmental implications. *Environ Res* 2018;**165**:484–95. doi:10.1016/J.ENVRES.2018.01.016
56 Massa R, Scarfì MR. 5G/6G Technologies and Biological Interactions: State of the Art. *2022 61st FITCE International Congress Future Telecommunications: Infrastructure*

and Sustainability (FITCE) Published Online First: 2022. doi:10.23919/FITCE56290.2022.9934699
57 de Vocht F, Albers P. The population health effects from 5G: Controlling the narrative. *Front Public Health* 2022;**10**:4905. doi:10.3389/fpubh.2022.1082031
58 NTP (National Toxicology Program). Handbook for Conducting a Literature-Based Health Assessment Using OHAT Approach for Systematic Review and Evidence. 2019.https://ntp.niehs.nih.gov/go/ohathandbook (accessed 23 Feb 2023).
59 Moher D, Shamseer L, Clarke M, *et al.* Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Syst Rev* 2015;**4**. doi:10.1186/2046-4053-4-1
60 Shamseer L, Moher D, Clarke M, *et al.* Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015: elaboration and explanation. *BMJ* 2015;**349:g7647**. doi:10.1136/bmj.g7647
61 Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* 2021;**372:n71**. doi:10.1136/bmj.n71
62 NTP (National Toxicology Program). OHAT Risk of Bias Rating Tool for Human and Animal Studies. 2015.https://ntp.niehs.nih.gov/go/riskbias (accessed 23 Feb 2023).
63 Bodewein L, Schmiedchen K, Dechent D, *et al.* Systematic review on the biological effects of electric, magnetic and electromagnetic fields in the intermediate frequency range (300 Hz to 1 MHz). *Environ Res* 2019;**171**:247–59. doi:10.1016/J.ENVRES.2019.01.015
64 Driessen S, Bodewein L, Dechent D, *et al.* Biological and health-related effects of weak static magnetic fields (≤ 1 mT) in humans and vertebrates: A systematic review. *PLoS One* 2020;**15**:e0230038. doi:10.1371/journal.pone.0230038
65 Romeo S, Zeni O, Sannino A, *et al.* Genotoxicity of radiofrequency electromagnetic fields: Protocol for a systematic review of in vitro studies. *Environ Int* 2021;**148**:106386. doi:10.1016/J.ENVINT.2021.106386
66 Frei P, Mohler E, Bürgi A, *et al.* Classification of personal exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF) for epidemiological research: Evaluation of different exposure assessment methods. *Environ Int* 2010;**36**:714–20. doi:10.1016/J.ENVINT.2010.05.005
67 Yang H, Zhang Y, Wu X, *et al.* Effects of Acute Exposure to 3500 MHz (5G) Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Anxiety-Like Behavior and the Auditory Cortex in Guinea Pigs. *Bioelectromagnetics* 2022;**43**:106–18. doi:10.1002/BEM.22388
68 Appleton B, Hirsch SE, Brown PVK. Investigation of single-exposure microwave ocular effects at 3000 MHz. *Ann N Y Acad Sci* 1975;**247**:125–34. doi:10.1111/J.1749-6632.1975.TB35989.X
69 Ding H, Hu GL, Zheng XY, *et al.* The Method Quality of Cross-Over Studies Involved in Cochrane Systematic Reviews. *PLoS One* 2015;**10**:e0120519. doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0120519
70 Campbell M, McKenzie JE, Sowden A, *et al.* Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: reporting guideline. *BMJ* 2020;**368**. doi:10.1136/BMJ.L6890
71 Whaley P, Aiassa E, Beausoleil C, *et al.* Recommendations for the conduct of systematic reviews in toxicology and environmental health research (COSTER). *Environ Int* 2020;**143**:105926. doi:10.1016/J.ENVINT.2020.105926

72 Vesterinen HM, Sena ES, Egan KJ, *et al.* Meta-analysis of data from animal studies: A practical guide. *J Neurosci Methods* 2014;**221**:92–102. doi:10.1016/J.JNEUMETH.2013.09.010
73 Higgins JPT, Thompson SG, Deeks JJ, *et al.* Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ* 2003;**327**:557–60. doi:10.1136/BMJ.327.7414.557

Anhänge des Protokolls

Anhang 1: Suchstrings für die Suche von Reviews im EMF-Portal und PubMed

1. EMF-Portal

Die Datenbank wurde mit folgendem Suchstring durchsucht:

TA=5G AND (TA=review OR TA=meta-analysis)

Themen: alle

Frequenzbereiche: alle

Link: https://www.emf-portal.org/de/article/search/v2/results?query=ta%3D5G+AND+%28ta%3Dreview+OR+ta%3Dmeta-analysis%29

2. PubMed

Die Datenbank wurde mit folgendem Suchstring durchsucht:

(5G[Title/Abstract]) AND ((review[Title/Abstract]) OR (meta-analysis[Title/Abstract]))

Link:

https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=%285G%5BTitle%2FAbstract%5D%29+AND+%28%28review%5BTitle%2FAbstract%5D%29+OR+%28meta-analysis%5BTitle%2FAbstract%5D%29%29

Anhang 2: Extraktionstabelle früherer Reviews über expositionsrelevante Auswirkungen von 5G

Referenz	Art der Publikation	Durchsuchte Datenbanken und Suchdaten	Design/Typ und Anzahl der in das systematische Review einbezogenen Studien	Exposition (Frequenzbereich über alle eingeschlossenen Studien)	Berücksichtigte Ergebnisse	Angegebene Methodik (systematische Suche, PECO, Datenextraktion, Studienbewertung, Evidenzsynthese, Metaanalyse)	Schlussfolgerung bezüglich der 5G Frequenzen	Limitationen
ANSES (2022) *English summary of a more detailed report in French*	Opinion report, published by ANSES review	Different data sources (depending on frequency range; Scopus, Pubmed and some key publications): 2012-2020	Not elucidated in detail in the English summary (animal and *in vitro* studies are at least mentioned)	700 MHz–2100 MHz, 900 MHz–2.5 GHz, 3–4 GHz, 18–100 GHz	Health effects, biological effects	Comprehensive search	3.5 GHz: only 5 studies identified; based on data of exposures from 900 MHz – 2.5 GHz exposure to 3.5 GHz does not constitute a new health risk 26 GHz: no conclusion possible	Search strings and inclusion/exclusion criteria not provided, data extraction and study appraisal not shown (*at least not in the English summary*)
Belpoggi (2021)	Study report, published by European Parliament narrative review, scoping review	Pubmed: from inception to 2020 EMF-Portal: from inception to 2021 l	Cancer: 20/1 epidemiological studies (FR1/FR2); 7/0 experimental animal studies (FR1/FR2) Reproductive and developmental effects: 26/2 epidemiological studies (FR1/FR2); 39/0 experimental animal studies (FR1/FR2)	2G–5G frequencies (FR1: 450 MHZ–6 GHz and FR2: 24–100 GHz)	Carcinogenic effects, reproductive and developmental effects	Systematic search, PECO, data extraction, evidence synthesis FR1: narrative review FR2: scoping review	Cancer: FR1: EMF are probably carcinogenic for humans; FR2: no adequate studies available reproductive and developmental effects: FR1: clear effects on male and possibly on female fertility; possible adverse effects on development of embryos and newborns; FR2: no adequate studies available	Study appraisal not based on specific transparent tool (only presented in short narrative manner or as comment), search string for EMF-Portal not provided; not clear if report was peer-reviewed
Chiaraviglio et al. (2021)	Peer-reviewed	No data provided	Not elucidated in detail	RF EMF	Cancer, skin effects, ocular effects, glucose metabolism, male	Not elucidated in detail,	Health concerns attributed to 5G are not supported by scientific evidence from	Only cancer studies evaluated in detail

	journal article review based on communica-tions engineering perspective (focus not only on health)		cancer: some animal studies and epidemiological studies		fertility, electrosensitivity, COVID-19	narrative synthesis	communications engineering	
Di Ciaula (2018)	Peer-reviewed journal article narrative review	Pubmed: 2011–2018	Epidemiological studies, experimental animal studies, *in vitro* studies numbers not exactly provided	Millimeter waves used in 5G communica-tion systems (not exactly specified)	Cancer, reproductive effects, metabolic effects, neurologic effects, microbiological effects	Systematic search, narrative synthesis	No clear conclusion based on the included studies provided (Authors: "available findings seem sufficient to demonstrate the existence of biomedical effects")	Search strings not provided, PECO not provided, data extraction not in detail, no study appraisal, no evidence synthesis
Health Council of the Netherlands (2020)	Background document and advisory report, published by Health Council of the Netherlands Literature survey	Pubmed, EMF-Portal OR literature search based on other document (e.g. draft WHO review and reports of Swedish Radiation Safety Authority), depending on frequency range and endpoint: 2015–2020, from inception to 2020 or not	Epidemiological studies, experimental animal studies, experimental human studies, *in vitro* studies numbers provided according to frequency range, study types and endpoint (0-64)	700 MHz–2200 MHz, 2200 MHz–5 GHz, 20 GHz–40 GHz	Diseases and conditions: studies on cancer, symptoms, hearing, eyes, cardiovascular system, autonomic nervous system, neurodegenerative diseases, male fertility, pregnancy and birth defects Biological processes: studies on behaviour, cognition, sleep, signal conduction in the brain, electrical activity in the brain, blood-brain barrier, gene expression in the brain, immune system, blood, hormones, oxidative stress	Systematic search for certain frequency ranges and endpoints, quality criteria for inclusion of papers, customized quality assessment but not provided in detail	Diseases and conditions: occurrence of cancer, reduced male fertility, poorer pregnancy outcomes and congenital defects classified as "possible" (but neither proven nor probable) Biological processes: relations are classified as "possible" for these processes Committee is unable to make any statement about the actual health risks of future exposures to 5G frequencies	Systematic search not performed for all frequency ranges and endpoints, data extraction and risk of bias not provided in detail, no evidence synthesis

		exactly provided						
Hinrikus et al. (2022)	Peer-reviewed journal article review	EMF-Portal: 2007–2015	73 experimental human studies	Search for 0.01 GHz–300 GHz, evaluation: 450 MHz–2500 MHz	Effects on brain (EEG, cognition, behavior, brain metabolism)	Systematic search, narrative synthesis	No data for 5G; no consistent relationship between effects and parameters of exposure by different generations (2G, 3G, and 4G); impact of 5G FR1 should have no principal differences compared to the previous generations	Data extraction not shown in detail; no study appraisal (some quality criteria seemed to be used for exclusion only); studies analyzed as function of frequency and signal structure and not according to outcome
Karipidis et al., (2021)	Peer-reviewed journal article "state-of-the science review"	Pubmed, EMF-Portal, Google Scholar, Embase and Web of Science, major reviews and reference lists of included studies: from inception to 2019	107 experimental (1 human, 15 animals, 91 *in vitro*) studies 31 epidemiological studies	> 6 GHz–300 GHz (below occupational limit values)	Various effects including genotoxicity, cell proliferation, gene expression, cell signaling, membrane function and other effects epidemiological studies: cancer, effects on reproduction and diseases	Comprehensive search, data extraction, narrative synthesis	No confirmed evidence that low-level RF EMF above 6 GHz are hazardous to human health	Search strings not provided, no PECO, study appraisal not based on specific transparent tool (only presented in short narrative manner or as comment), no transparent evidence synthesis
Russell (2018)	Peer-reviewed journal article review	No details provided	No details provided	Relevant electro-magnetic frequencies of 2G, 3G, 4G and 5G including millimeter wave exposure	Health effects and biological effects (electrosensitivity, oxidative stress, skin effects, ocular effects, immune system, bacterial antibiotic resistance, gene expression)	No details provided, narrative synthesis	RF EMF appear to act as a toxin to biological systems; a moratorium on the deployment of 5G is warranted	No details on methodology
Simkó and Mattsson (2019)	Peer-reviewed journal article	Pubmed, EMF-Portal, other relevant grey	*In vivo* experimental studies, *in vitro* studies	6 GHz–100 GHz	Effects grouped into physiological, neurological, histological changes, gene or protein	Data extraction, study appraisal based on	No consistent relationship between power density, exposure duration, or frequency, and exposure	No systematic search (or at least not transparently provided), search

	"pragmatic review"	literature: from inception to 2018	altogether 94 studies		expression, cytotoxic effects, genotoxic changes, temperature-related reactions	customized pre-defined criteria	effects; no adequate and sufficient information for a meaningful safety assessment, or for the question about non-thermal effects	strings not provided, PECO not provided, study appraisal based on customized pre-defined criteria, studies analyzed as function of frequency and not systematically according to outcome; no transparent evidence synthesis
Sofri et al. (2022)	Peer-reviewed journal article systematic review	Not provided	33 experimental human studies	RF exposure related to base station and mobile phones	Cognitive performance, well-being, physiological parameters (heart rate, blood pressure, body temperature), EEG	Comprehensive search, data extraction, narrative synthesis	No studies identified with 5G exposures (700 MHz, 3.5 GHz, 28 GHz)	Search strings not provided, no PECO, no study appraisal, no evidence synthesis
Thielens (2021)	Study report, published by European Parliament Review (effects on inverte-brates and plants and fungi), meta-review (effects on vertebrates; <6 GHz)	Web of Science: > 1945	*In vivo* studies *in vitro* studies, meta-analysis, reviews, dosimetry studies, studies on dielectric heating numbers provided according to frequency range and taxonomy group: n= 23-109	450 MHz–6 GHz, 6 GHz–300 GHz	Effects on vertebrates (cells) (except humans), invertebrates and plants/fungi any effects, e.g. reproductive effects, morphogenesis, carcinogenicity, hyperthermia, dielectric heating, development, population diversity, behavioural effects, magnetic sense, neural effects, genotoxicity, gene/protein expression, cardiovascular effects, auditory effects, cerebral effects, physiological effects	Systematic search, data extraction, narrative synthesis	No effect, apart from dielectric heating, in all six categories (3 taxonomy groups, 2 frequency ranges)	Search strings not provided, no study appraisal, no evidence synthesis

Wood et al. (2021)	Peer-reviewed journal article meta-analysis (quantita-tive analysis of papers included in Karipidis et al. 2021, see above)	Pubmed, EMF-Portal, Google Scholar, Embase and Web of Science, major reviews and reference lists of included studies: from inception to 2019	107 experimental (1 human, 15 animals, 91 *in vitro*) studies 31 epidemiological studies	> 6 GHz–300 GHz (below occupational limit values (100 W/m²))	Papers were grouped into bacteria and yeast (24); (non-bacterial) cells in culture (35); artificial cell suspensions (7); neural activity (10); *in vivo* (8) and miscellaneous (4)	Comprehensive search, meta-analysis, narrative synthesis	No association between low-level microwaves and biological effects	Search strings not provided, no clear PECO, study appraisal based on customized pre-defined criteria, no transparent evidence synthesis; studies analyzed as function of frequency, quality score, power density and SAR and not according to outcome

Anhang 3: PRISMA-P Checkliste modifiziert für Protokolleinreichungen zu systematischen Reviews, Übersetzung aus dem Englischen

Bereich/Thema	#	Details der Checkliste	Berichtete Informationen		Seiten-zahle(n)
			Ja	Nein	
ADMINISTRATIVE INFORMATIONEN					
Titel					
Identifikation	1a	Identifikation des Berichts als Protokoll eines systematischen Reviews	☒	☐	1
Update	1b	Angabe des Protokolls als Update für ein früheres systematisches Review (falls zutreffend)	☐	☒	n.a.
Registrierung	2	Falls registriert, Angabe des Registernamens (z.B. PROSPERO) und der Registrierungsnummer	☒	☐	2
Autor*innen					
Kontakt	3a	Angabe der Namen, der institutionellen Zugehörigkeit und der E-Mail-Adresse aller Protokollautor*innen; Angabe der Postanschrift des/der korrespondierenden Autor*in	☒	☐	1
Beiträge	3b	Beschreibung der Beiträge der Autor*innen des Protokolls und Identifizierung des/der Verantwortlichen des Reviews	☒	☐	16
Änderungen	4	Kenntlichmachung und Auflistung der Änderungen, wenn es sich bei dem Protokoll um eine Änderung eines bereits abgeschlossenen oder veröffentlichten Protokolls handelt; andernfalls Angabe eines Plans für die Dokumentation wichtiger Änderungen im Protokoll	☒	☐	15
Unterstützung					
Quelle	5a	Angabe aus welchen Quellen das Review finanziell oder anderweitig unterstützt wird	☒	☐	16
Sponsor	5b	Namentliche Nennung der Sponsoren/Förderer des Reviews	☒	☐	16
Rolle des Sponsors/Förderers	5c	Beschreibung der Rolle des/der Sponsor(s), des/der Förderer(s), und/oder der Institution(en) bei der Entwicklung des Protokolls	☒	☐	16
EINLEITUNG					
Rationale	6	Begründung des Reviews im Kontext, was bereits bekannt ist	☒	☐	6-7

Bereich/Thema	#	Details der Checkliste	Berichtete Informationen		Seiten-zahle(n)
			Ja	Nein	
Ziele	7	Präzise Angabe der Fragestellungen der Reviews mit Bezug auf Teilnehmer, Exposition, Vergleiche, Zielkriterien und Studiendesign (engl.: participants, exposure, comparisons, outcomes, and study design; PECOS)	☒	☐	7-8
METHODEN					
Auswahlkriterien	8	Merkmale der Studien (z.B. PICOS, Setting) und der Berichte (z.B., Zeitraum der Studien, Sprache, Publikationsstatus), die als Auswahlkriterien verwendet wurden	☒	☐	8-11
Informationsquellen	9	Beschreibung aller Informationsquellen (z.B., Datenbanken, Kontakt mit Autoren von Studien), die bei der Suche verwendet wurden einschließlich des letzten Suchdatums	☒	☐	11
Suchstrategie	10	Beschreibung der elektronischen Suchstrategie für mindestens eine Datenbank, einschließlich gewählter Limitierungen, sodass die Suche repliziert werden könnte	☒	☐	11, ergänzende Daten 4
STUDIENVERZEICHNIS					
Datenmanagement	11a	Beschreibung des Mechanismus, der für die Verwaltung von Aufzeichnungen und Daten während des gesamten Reviews verwendet wird	☒	☐	8
Auswahl der Studien	11b	Beschreibung des Prozesses für die Auswahl der Studien (z.B. zwei unabhängige Reviewer*innen) in jeder Phase des Reviews (z.B. Screening, Eignung und Einschluss in die Metaanalyse)	☒	☐	11-15
Prozess der Datengewinnung	11c	Beschreibung der Methode der Datenextraktion aus Berichten (z.B. Erhebungsbogen, unabhängig, doppelt) und alle Prozesse, um Daten von Untersuchern zu erhalten und zu bestätigen	☒	☐	12

Bereich/Thema	#	Details der Checkliste	Berichtete Informationen		Seiten-zahle(n)
			Ja	Nein	
Datendetails	12	Aufzählung und Definition aller Variablen, nach denen gesucht wurde (z.B., PICOS, Finanzierungsquellen) sowie Annahmen und durchgeführte Vereinfachungen	☒	☐	12, ergänzende Daten 5
Ergebnisse und Priorisierung	13	Auflistung und Definition aller Ergebnisse, für die Daten gesucht werden, einschließlich einer Priorisierung von Haupt- und Zusatzergebnissen mit Begründung	☒	☐	9
Bias Risiko in den einzelnen Studien	14	Methoden zur Beurteilung des Bias Risikos der einzelnen Studien (einschließlich der Angabe, ob dieses auf der Studienebene oder für das Zielkriterium durchgeführt wurde) und wie diese Information bei der Datensynthese berücksichtigt wurde	☒	☐	12-13
DATEN					
Synthese der Ergebnisse	15a	Beschreibung der Kriterien, nach denen die Studiendaten quantitativ synthetisiert werden sollen	☒	☐	14
	15b	Bei Eignung der Daten für eine quantitative Synthese, Beschreibung der Methoden zum Umgang mit den Daten und der Kombination der Ergebnisse der Studien; einschließlich Maßzahlen zur Homogenität der Ergebnisse (z.B. I^2)	☒	☐	14
	15c	Beschreibung aller vorgeschlagenen zusätzlichen Analysen (z.B. Sensitivitätsanalysen, Subgruppenanalysen, Meta-Regression)	☒	☐	14
	15d	Wenn eine quantitative Synthese nicht geeignet ist, Beschreibung der Art der geplanten Zusammenfassung	☒	☐	14
Meta-Bias	16	Angabe der geplanten Beurteilung von Meta-Bias(s)(z.B. Publikationsverzerrung, selektives Berichten innerhalb von Studien)	☒	☐	14

Bereich/Thema	#	Details der Checkliste	Berichtete Informationen		Seiten-zahle(n)
			Ja	Nein	
Vertrauen in die kummulative Evidenz	17	Beschreibung wie die Aussagekraft der Evidenz bewertet wird (z.B.GRADE)	☒	☐	14-15

Anhang 4: Suchstrings im EMF-Portal, PubMed und Web of Science

1. EMF-Portal

Die Datenbank wurde mit folgendem Suchstring durchsucht:

Themen: experimentelle Studien, epidemiologische Studien, medizinische Anwendungen

Frequenzbereiche: Hochfrequenz (≥ 10 MHz), Mobilfunk

Zeitspanne: ohne Einschränkung

Link: https://www.emf-portal.org/en/article/search/v2/results?query=%28topic%3Dexperimental+OR+topic%3Depidemiological+OR+topic%3Dmedical_application%29+AND+%28frequencyRange%3Dradio_frequency+OR+frequencyRange%3Dmobile_communications%29

2. PubMed

Für jede der drei Komponenten der Abfrage "Exposition", "Arten/Spezies" und "Restriktionen" wurden Begriffe ermittelt, die zur Abfrage der Datenbank kombiniert werden:

Exposition	(("radiofrequenc*"[tiab] OR "radio-frequenc*"[tiab] OR "radio frequenc*"[tiab] OR "radiowave*"[tiab] OR "radio-wave*"[tiab] OR "microwave*"[tiab] OR "GHz"[tiab] OR "MHz"[tiab] OR "radar"[tiab] OR "super high frequency"[tiab] OR "centimeter wave*"[tiab] OR "centimetre wave*"[tiab] OR "millimeter wave*"[tiab] OR "millimetre wave*"[tiab] OR "5G"[tiab] OR "5th generation"[tiab]) AND ("field"[tiab] OR "expos*"[tiab] OR "radiat*"[tiab] OR "irradiat*"[tiab]))
Art/Spezies	AND ("mammal"[tiab] OR "mice"[tiab] OR "mouse"[tiab] OR "rat"[tiab] OR "rats"[tiab] OR "hamster*"[tiab] OR "gerbil*"[tiab] OR "rabbit*"[tiab] OR "dog"[tiab] OR "dogs"[tiab] OR "monkey*"[tiab] OR "animal*"[tiab] OR "murin*"[tiab] OR "muridae"[tiab] OR "rodent*"[tiab] OR "cat"[tiab] OR "cats"[tiab] OR "sheep"[tiab] OR "goat*"[tiab] OR "cow"[tiab] OR "cows"[tiab] OR "wistar"[tiab] OR "balb"[tiab] OR "C57"[tiab] OR "C57bl"[tiab] OR "long-evans"[tiab] OR "primate*"[tiab] OR "cattle"[tiab] OR "bovine"[tiab] OR

	"pig"[tiab] OR "pigs"[tiab] OR "swine"[tiab] OR "Sprague-Dawley"[tiab] OR "human"[tiab] OR "humans"[tiab] OR "child*"[tiab] OR "adolescent*"[tiab] OR "man"[tiab] OR "men"[tiab] OR "woman"[tiab] OR "women"[tiab] OR "teen*"[tiab] OR "adult*"[tiab] OR "elderly"[tiab] OR "individual*"[tiab] OR "patient*"[tiab] OR "participant*"[tiab] OR "student*"[tiab] OR "subject*"[tiab] OR "volunteer*"[tiab])
Restriktionen	NOT ("ablation"[tiab] OR "chemotherap*"[tiab] OR "app"[tiab] OR "apps"[tiab] OR "mobile application*"[tiab] OR "telemedicine"[tiab] OR "adherence"[tiab] OR "nomophobia"[tiab] OR "cyberbull*"[tiab] OR "problematic smartphone use"[tiab] OR "Genitourinary Syndrome of Menopause”[tiab] OR "problematic cell phone use"[tiab] OR "problematic smart phone use"[tiab] OR "phubbing"[tiab] OR "addict*"[tiab] OR "covid"[tiab] OR nanopart*[tiab] OR review[pt] OR systematic review[pt])

Angewandte Filter: Sprache nur Englisch oder Deutsch

3. Web of Science

Für jede der drei Komponenten der Abfrage "Exposition", "Arten/Spezies" und "Restriktionen" wurden Begriffe ermittelt, die zur Abfrage der Datenbank kombiniert werden:

Exposition	TS=((radiofrequenc* OR radio-frequenc* OR "radio frequenc*" OR radiowave* OR radio-wave* OR microwave* OR "GHz" OR "MHz" OR "radar" OR "super high frequency" OR "centimet* wave" OR "millimet* wave" OR "5G" OR "5th generation") NEAR/2 ("field" OR "expos*" OR "radiat*" OR "irradiat*"))
Art/Spezies	AND TS=("mammal" OR "mice" OR "mouse" OR "rat" OR "rats" OR "hamster?" OR "gerbil?" OR "rabbit?" OR "dog?" OR "monkey?" OR "animal*" OR "murin*" OR "muridae" OR "rodent*" OR "cat?" OR "sheep" OR "goat?" OR "cow?" OR "wistar" OR "balb" OR "C57" OR "C57bl" OR "long-evans" OR "primate?" OR "cattle" OR "bovine" OR "pig?" OR "swine" OR "Sprague-Dawley" OR "human?" OR "child*" OR "adolescent?" OR "man" OR "men" OR "wom?n" OR "teen*" OR "adult*" OR "elderly" OR "individual?" OR "patient?" OR "participant?" OR "student?" OR "subject?" OR "volunteer?")
Restriktionen	NOT TS=("ablation" OR "chemotherap*" OR "app?" OR "mobile application*" OR "telemedicine" OR "adherence" OR "nomophobia" OR "cyberbull*" OR "problematic smartphone use" OR "Genitourinary Syndrome of Menopause” OR "problematic cell phone use" OR "problematic smart phone use" OR "phubbing" OR "addict*" OR "covid" OR nanopart*)

Anhang 5: Extrahierte Studienparameter

Generelle Informationen	
Kennung	Interne Nummer
Zitat	Autor*innen, Titel, Journal, Jahr, Ausgabe, Seitenzahlen, DOI
Finanzierung	Industrie, öffentlich, unabhängig (NGO), mixed, unbekannt
Interessenskonflikte	Ja, nein, nicht angegeben
Studiendesign	Tierexperimentelle Studien (EA), kontrollierte Humanstudien (HCT) oder epidemiologische Studien(ES)
1. Experimentelle Studien (HCT, EA)	
Studienpopulation	Mensch (gesund, krank) oder Tierstamm/-art
Geschlecht	männlich, weiblich, nicht angegeben
Alter	Bereich, Mittel, SD, nicht angegeben?
Studiengröße	
Expositionsgruppe(n)	Anzahl und Größe der Gruppen
Kontrollgruppe(n)	Anzahl und Größe der Gruppen
Setup der Kontrollgruppe(n)	Schein-exponiert (sham), nicht exponiert, positive Kontrolle, Käfig Kontrolle, nicht spezifiziert
2. Epidemiologische Studien (ES)	
Epidemiologischer Studientyp	Prospektive or retrospektive Kohorten- (Co) und Fall-Kontroll (CaCo) Studien
Land	Details
Beobachtungszeitraum	Zeitraum im Jahren, follow-up Zeit
Studienpopulation	Allgemeinbevölkerung, berufliche Exposition
Definition der Studienpopulation	Beschreibung oder Name
Alter	Spanne, Mittel, SD in Jahren
Geschlecht	männlich, weiblich, nicht angegeben
Anzahl an Teilnehmer*innen (Co)	Zahl
Anzahl an Fällen und Kontrollen (CaCo)	Zahl
Confounder (ES)	Details
Exposition	
Expositionsquelle	Details
Frequenzbereich	Numerischer Wert in GHz
Modulationstyp	Ununterbrochene Welle (CW), Amplitudenmodulation (AM),

	Frequenzmodulation (FM), pulsierend, etc.; darauf bezogene Details (e.g., Pulsdauer und Wiederholungsrate)
Expositionsdauer	Minuten oder Stunden (pro Tag), Tage pro Woche und gesamter Zeitraum, intermittierend
Details der internen Expositionsmetrik	
Spezifische Absorptionsrate (SAR)	Lokale oder Ganzkörper SAR, Numerischer Wert in W/kg
Spezifische Absorption (SA)	Numerischer Wert in J/kg
Induzierte elektrische Feldstärke	Numerischer Wert in V/m
Interne magnetische Feldstärke	Numerischer Wert in A/m
Details der externen Expositionsmetrik	Zeitlicher Mittelwert, räumlich-flächlicher Mittelwert oder Spitzenwert
Einfallende Leistungsflussdichte	Numerischer Wert in W/m^2
Einfallende Energiedichte	Numerischer Wert in J/m^2
Transmittierte (absorbierte) Leistungsflussdichte	Numerischer Wert in W/m^2
Transmittierte (absorbierte) Energiedichte	Numerischer Wert in J/m^2
Details der externen Expositionsmetrik (an der Stelle des exponierten Körpers)	Zeitlicher Mittelwert, räumlich-flächlicher Mittelwert oder Spitzenwert
Einfallende elektrische Feldstärke	Numerischer Wert in V/m
Einfallende magnetische Feldstärke	Numerischer Wert in A/m
Expositionsmetriken in ES	z.B., kummulative oder durchschnittliche Nutzung, kummulative Lebenszeitexposition (bewertet durch Fragebögen oder JEM)
Validierung der Exposition	Messung, Simulation, Fragebogen, JEM
Umgebungsbedingngen (z.B. Kontrolle der Temperatur, Hintergrundniveau)	Details
Ergebnisse (outcome)	
Endpunkt 1	Details
Bewertungsmethode für Endpunkt 1	Details
Endpunkt 2	Details
Bewertungsmethode für Endpunkt 2	Details
Endpunkt x	Details
Bewertungsmethode für Endpunkt x	Details

…	
Ergebnisse (results)	
Signifikante Ergebnisse	Details
Schlussfolgerung (nach Ansicht der Autor*innen)	Details
Gefundene Wirkung (nach Ansicht der Autor*innen)	Ja, nein
Bemerkungen	Details

Abkürzungen: AM – Amplitudenmodulation/amplitude modulation, CaCo – Fall-Kontroll-Studie/case-control study, Co – Kohortenstudie/cohort study, CW – ununterbrochene Welle/continuous wave, DOI – Digitaler Objektbezeichner/digital object identifier, EA – tierexperimentelle Studie/experimental animal study, ES – Epidemiologische Studie/epidemiological study, FM – Frequenzmodulation/frequency modulation, HCT – kontrollierte Humanstudie/human controlled trial, NGO – Nicht-Regierungsorganisationen/non-governmental organization, SD – Standardabweichung/standard deviation

Autor*in (Jahr) (OHAT Studienqualität)	Exponierte Tiere (Geschlecht) relevante Gruppen (Anzahl der Tiere)	Exposition	Endpunkte	Ergebnisse Schlussfolerung nach Ansicht der Auto*innen (Wirkungs-/Effektcharakterisierung nach Ansicht der Autor*innen)
Yang et al. (2022) (2nd tier)	Guinea pigs (male) exposure group (2 W/kg): n=10, exposure group (4 W/kg): n=10, exposure group (10 W/kg): n=10, control group (sham exposure): n=10	Horn antenna, 3.5 GHz, CW: calibration, measurement and calculation: 4 conditions: sham exposure, 2, 4, and 10 W/kg whole body exposure temperature kept constant 25 ± 2°C Exposure duration: 72 hours	Auditory brainstem response thresholds, anxiety-like behavior, MDA level and antioxidant enzyme activity (GSH-px, SOD and CAT), ultrastructure of the auditory cortex, cytochrome-c relocalization, caspase-9, and cleaved caspase-3 expression in the auditory cortex	Increased MDA level, decreased CAT, SOD and GSH-px levels in auditory cortex; ultrastructural changes in auditory cortex (swollen mitochondria and myelin sheaths layered), cytochrome c release, caspase-9 and caspase-3 expression into cytosol of auditory cortex (qualitative evaluation) Conclusion: RF EMF exposure did not increase hearing thresholds or induce anxiety. The degree of oxidative stress, apoptosis induction and ultrastructural damage increased in a SAR-dependent manner. (Effect found)
Appleton et al. (1975) (2nd tier)	New Zealand albino rabbits (sex not stated; anesthetized during exposure) exposure group 1 (100 mW/cm² for 15 min): n=3, exposure group 2 (100 mW/cm² for 30 min): n=3, exposure group 3 (200 mW/cm² for 15 min): n=3, exposure group 4 (200 mW/cm² for 30 min): n=3, exposure group 5 (300 mW/cm² for 15 min): n=3, exposure group 6 (300 mW/cm² for 30 min): n=3, exposure group 7 (400 mW/cm² for 15 min): n=3, exposure group 8 (500 mW/cm² for 15 min): n=6, control group: n=3	Dish antenna, 3.0 GHz, CW: measurement and calculation: 6 conditions: no exposure (control), 100 mW/cm², 200 mW/cm², 300 mW/cm², 400 mW/cm² and 500 mW/cm² exposure of the eye temperature kept constant 22.2 °C Exposure duration: 15 min and 30 min	Ocular changes (examinations over a one-year period): acute changes: hyperemia of lids and conjunctiva, miosis and anterior chamber flare, engorgement of iris vessels, periorbital cutaneous burns, long-term changes: lens changes, cataract	Acute changes in animals exposed to 300, 400 or 500 mW/cm² for 15 min which were reversible after 24 h, death of all animals during exposure to 300 mW/cm² for 30 min, death of 3 of 6 animals immediately after exposure to 500 mW/cm² for 15 min, severe stress in surviving animals (no statistics applied) Conclusion: Exposure up to 200 mW/cm² induced no effect and ≥ 300 mW/cm² reversible acute ocular effects, however no lens changes or cataracts after one year. (Effect found)

Bemerkung: Wenn nicht anders angegeben, werden nur statistisch signifikante, adjustierte Ergebnisse angegeben. Abkürzungen: CAT = Katalase/catalase, CW = ununterbrochene Welle/continuous wave, GSH-px = Glutathion-Peroxidase/glutathione peroxidase, MDA = Malondialdehyd/malondialdehyde, RF EMF = hochfrequente elektromagnetische Felder/radiofrequency electromagnetic field, SOD = Superoxid-Dismutase/superoxide dismutase

Anhang 7: Risk-of-Bias (RoB) Bereiche und Fragen nach OHAT

Das OHAT Risk-of-Bias (RoB) Rating Tool for Human and Animal Studies (NTP 2015) wird für jedes bewertete RoB-Kriterium so genau wie möglich befolgt. Allerdings müssen, insbesondere mit Blick auf die Besonderheiten der EMF-Exposition, einige Spezifikationen und Änderungen am Tool vorgenommen werden. Im Folgenden werden diese Änderungen für jedes RoB-Kriterium dargestellt. Hintergrundinformationen und weitere Erläuterungen zu den einzelnen RoB-Bereichen finden Sie im OHAT RoB Tool (NTP 2015).

Selection Bias	
Frage 1: Wurde das verabreichte Expositionsniveau angemessen randomisiert? *Da im OHAT-Protokoll keine Ansätze zur Bewertung von Cross-over-Studien erwähnt werden, folgten wir den Empfehlungen für das Cochrane-Protokoll von Ding et al. 2015 (The Method Quality of Cross-Over Studies Involved in Cochrane Systematic Reviews, http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0120519). Bei diesem Kriterium gilt die Randomisierung in einem Cross-over-Design für die Reihenfolge der Behandlungen.*	
Kohortenstudien (Co), Fall-Kontroll-Studien (CaCo)	Tierexperimentelle Studien (EA), kontrollierte Humanstudien(HCT)
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)	
n.a.	• Direkte Evidenz, dass die Probanden oder Tiere einer beliebigen Studiengruppe, einschließlich der Kontrollen, nach einer Methode mit Zufallskomponente zugeteilt wurden **ODER** • Direkte Evidenz, dass die Expositionsabfolgen nach einer Methode mit Zufallskomponente zugewiesen wurden (bei Crossover-Studien nach dem Cochrane-Protokoll) (Ding et al. 2015)[4]
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)	
n.a.	• Indirekte Evidenz, dass die Probanden oder Tiere einer beliebigen Studiengruppe, einschließlich der Kontrollen, nach einer Methode mit

[4] Ding H, Hu GL, Zheng XY, Chen Q, Threapleton DE, et al. (2015) The Method Quality of Cross-Over Studies Involved in Cochrane Systematic Reviews. PLOS ONE 10(4): e0120519. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120519

	Zufallskomponente zugeteilt wurden **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass eine Zuteilung ohne eindeutige Zufallskomponente während der Studie die Ergebnisse nicht nennenswert verfälschen würde **ODER** • Indirekte Evidenz, dass die Expositionsabfolgen nach einer Methode mit Zufallskomponente zugewiesen wurden (bei Crossover-Studien nach dem Cochrane-Protokoll)
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)	
n.a.	• indirekte Evidenz dafür, dass Probanden oder Tiere nach einer Methode mit einer nicht zufälligen Komponente auf Studiengruppen aufgeteilt wurden **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen darüber vor, wie die Probanden den Studiengruppen zugeteilt wurden (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben) **ODER** • indirekte Evidenz dafür, dass die Expositionssequenzen nach einer Methode mit einer nicht zufälligen Komponente zugeteilt wurden (im Falle von Crossover-Studien nach dem Cochrane-Protokoll)
Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)	
n.a.	• direkte Evidenz dafür, dass die Probanden den Studiengruppen nicht nach dem Zufallsprinzip zugeteilt wurden (z. B. nach dem Ermessen des Prüfers) **ODER** • direkte Evidenz dafür, dass die Expositionssequenzen nach einer Methode mit einer nicht zufälligen Komponente zugeteilt wurden (im Falle von Crossover-Studien nach dem Cochrane-Protokoll)
Frage 2: Wurde die Zuweisung zu den Studiengruppen angemessen verblindet? *Da im OHAT-Protokoll keine Ansätze zur Bewertung von Cross-over-Studien erwähnt werden, folgten wir den Empfehlungen für das Cochrane-Protokoll von Ding et al. 2015 (The Method Quality of Cross-Over Studies Involved in Cochrane Systematic Reviews,*	

http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0120519). Dementsprechend bewertet dieses Kriterium bei Cross-over-Studien die Verblindung bei der Festlegung der Reihenfolge der Behandlungen. Bei Studiendesigns, bei denen alle Probanden anschließend verschiedene (Schein-)Expositionsläufe in randomisierter Reihenfolge durchführen, gilt dieses Kriterium nicht (n.a.).	
Co, CaCo	EA, HCT
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)	
n.a.	• Direkte Evidenz, dass das Forschungspersonal (und die Probanden bei HCT) zum Zeitpunkt der Zuweisung der Studiengruppen angemessen verblindet waren und es unwahrscheinlich ist, dass sie die Verblindung hätten aufheben können, bevor die Zuweisung abgeschlossen und unwiderruflich war
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)	
n.a.	• Indirekte Evidenz, dass das Forschungspersonal (und die Probanden bei HCT) zum Zeitpunkt der Zuweisung der Studiengruppen angemessen verblindet waren und es unwahrscheinlich ist, dass sie die Verblindung hätten aufheben können, bevor die Zuweisung abgeschlossen und unwiderruflich war **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass das Fehlen einer angemessenen Verblindung bei der Zuweisung der Studiengruppen die Ergebnisse nicht nennenswert beeinflussen würde
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)	
n.a.	• indirekte Evidenz dafür, dass es dem Forschungspersonal (und den Probanden im HCT) zum Zeitpunkt der Rekrutierung möglich war, zu wissen, welcher Studiengruppe die Probanden zugeteilt wurden, oder es ist wahrscheinlich, dass sie die Verblindung der Zuteilung hätten aufheben können, bevor die Rekrutierung abgeschlossen und unwiderruflich war **ODER** • keine ausreichenden Informationen über die Zuweisung zu den

	Studiengruppen (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben)
Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)	
n.a.	• direkte Evidenz dafür, dass es dem Forschungspersonal (und den Probanden im HCT) zum Zeitpunkt der Rekrutierung möglich war, zu wissen, welcher Studiengruppe die Probanden zugeteilt wurden
Frage 3: Wurden durch die Selektion der Studienteilnehmer geeignete Vergleichsgruppen gebildet?	
Co, CaCo	EA, HCT
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)	
• **Co:** Direkte Evidenz, dass die Probanden (exponiert und nicht exponiert) ähnlich waren (z. B. aus der gleichen in Frage kommenden Population rekrutiert, mit der gleichen Erhebungsmethode und unter Verwendung der gleichen Ein- und Ausschlusskriterien rekrutiert, und ein ähnliches Alter und einen ähnlichen Gesundheitszustand aufwiesen), innerhalb des gleichen Zeitrahmens rekrutiert wurden und die gleichen Teilnahme-/Response-Raten aufwiesen **ODER** • **CaCo:** Direkte Evidenz, dass Fälle und Kontrollen ähnlich waren (z. B. Rekrutierung aus der gleichen in Frage kommenden Population, einschließlich ähnlichem Alter, Geschlecht, ethnischer Zugehörigkeit und Eignungskriterien außer dem interessierenden Ergebnis), innerhalb des gleichen Zeitrahmens rekrutiert wurden und die Kontrollen so beschrieben sind, dass sie keine Vorgeschichte des Ergebnisses haben	n.a.
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)	
• **Co:** Indirekte Evidenz, dass die Probanden (exponiert und nicht exponiert) ähnlich waren (z. B. aus der gleichen in Frage kommenden Population rekrutiert, mit der gleichen Erhebungsmethode und unter Verwendung der gleichen Ein- und Ausschlusskriterien rekrutiert, und ein ähnliches Alter und einen ähnlichen Gesundheitszustand aufwiesen), innerhalb des gleichen	n.a.

Zeitrahmens rekrutiert wurden und die gleichen Teilnahme-/Response-Raten aufwiesen **ODER** • Unterschiede zwischen den Gruppen würden die Ergebnisse nicht nennenswert beeinflussen • **<u>CaCo</u>:** Indirekte Evidenz, dass Fälle und Kontrollen ähnlich waren (z. B. Rekrutierung aus der gleichen in Frage kommenden Population, einschließlich ähnlichem Alter, Geschlecht, ethnischer Zugehörigkeit und Eignungskriterien außer dem interessierenden Ergebnis), innerhalb des gleichen Zeitrahmens rekrutiert wurden und die Kontrollen so beschrieben sind, dass sie keine Vorgeschichte des Ergebnisses haben **ODER** • Unterschiede zwischen Fällen und Kontrollen würden die Ergebnisse nicht nennenswert beeinflussen	
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)	
• **<u>Co</u>:** indirekte Evidenz, dass die Probanden (exponiert und nicht exponiert) nicht ähnlich waren, in sehr unterschiedlichen Zeiträumen rekrutiert wurden oder sehr unterschiedliche Teilnahme-/Response-Raten hatten **ODER** • unzureichende Informationen über die Vergleichsgruppe, einschließlich einer abweichenden Quote der Nichtbeantwortung ohne Erklärung (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben) • **<u>CaCo:</u>** indirekte Evidenz dafür, dass die Kontrollen aus einer sehr unterschiedlichen Population stammen oder in einem sehr unterschiedlichen Zeitrahmen rekrutiert wurden **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen über die Angemessenheit der Kontrollen vor, auch nicht über die Beantwortungsquote, die nur für Fälle gemeldet wird (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben)	n.a.

Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)	
• **<u>Co</u>:** direkte Evidenz, dass die Probanden (exponiert und nicht exponiert) nicht ähnlich waren, in sehr unterschiedlichen Zeiträumen rekrutiert wurden oder sehr unterschiedliche Teilnahme-/Response-Raten hatten • **<u>CaCo</u>:** direkte Evidenz, dass die Kontrollen aus einer sehr unterschiedlichen Population stammen oder in einem sehr unterschiedlichen Zeitrahmen rekrutiert wurden	n.a.

Confounding Bias	
Frage 4: Wurden im Studiendesign oder in der Analyse wichtige Confounder und andere Einflussfaktoren berücksichtigt? *Die Endpunkte wurden in diesem Review nicht eingeschränkt, d. h. es wurden Studien mit allen physiologischen und gesundheitsbezogenen Endpunkten einbezogen. Aufgrund dieses umfassenden Ansatzes wurden Confounder nicht für jeden Endpunkt vordefiniert, wie es das OHAT-Tool vorschlägt. Alter, Geschlecht und zusätzliche endpunktspezifische Confounder müssen als Mindestmenge an Confoundern berücksichtigt werden.*	
Co, CaCo	EA, HCT
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)	
• **<u>Co</u>**: Es gibt direkte Evidenz dafür, dass in den endgültigen Analysen angemessene Anpassungen oder explizite Überlegungen zu primären Kovarianten und Confoundern vorgenommen wurden, durch den Einsatz statistischer Modelle zur Verringerung forschungsspezifischer Verzerrungen, einschließlich Standardisierung, Matching, Anpassung in multivariaten Modellen, Stratifizierung, Propensity Scoring oder anderer Methoden, die angemessen begründet wurden. Eine akzeptable Berücksichtigung geeigneter Anpassungsfaktoren schließt Fälle ein, in denen der Faktor nicht in das endgültige Anpassungsmodell aufgenommen wird, weil der Autor Analysen durchgeführt hat, die darauf hindeuten, dass er nicht aufgenommen werden muss **UND** • es gibt direkte Evidenz dafür, dass die primären Kovarianten und	n.a.

Störfaktoren anhand gültiger und zuverlässiger Messungen bewertet wurden **UND** • es gibt direkte Evidenz dafür, dass andere Expositionen, die die Ergebnisse verfälschen könnten, nicht vorhanden waren oder nicht angemessen gemessen und bereinigt wurden • **CaCo**: Es gibt direkte Evidenz dafür, dass in den endgültigen Analysen angemessene Anpassungen für primäre Kovarianten und Störfaktoren vorgenommen wurden, und zwar durch die Verwendung statistischer Modelle zur Verringerung forschungsspezifischer Verzerrungen, einschließlich Standardisierung, Matching von Fällen und Kontrollen, Anpassung in multivariaten Modellen, Stratifizierung, Propensity Scoring oder andere Methoden, die angemessen begründet wurden **UND** • es gibt direkte Evidenz dafür, dass die primären Kovarianten und Störfaktoren anhand gültiger und zuverlässiger Messungen bewertet wurden **UND** • es gibt direkte Evidenz dafür, dass andere Expositionen, die die Ergebnisse verfälschen könnten, nicht vorhanden waren oder nicht angemessen gemessen und bereinigt wurden	
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)	
• **Co, CaCo:** Es liegen indirekte Evidenzen vor, dass angemessene Anpassungen vorgenommen wurden **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass die Nichtberücksichtigung oder nur teilweise Berücksichtigung von Kovarianten oder Störfaktoren in den endgültigen Analysen die Ergebnisse nicht nennenswert verfälschen würde **UND** • es gibt eine (direkte oder indirekte) Evidenz dafür, dass die primären Kovarianten und Störfaktoren anhand	n.a.

gültiger und zuverlässiger Messungen bewertet wurden **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass die verwendeten Messgrößen die Ergebnisse nicht nennenswert verzerren (d. h. die Autoren haben die Gültigkeit der Messgrößen anhand früher veröffentlichter Forschungsergebnisse begründet) **UND** • es gibt Evidenz (direkt oder indirekt), dass andere Koexpositionen, die die Ergebnisse verfälschen könnten, nicht vorhanden waren oder nicht angemessen bereinigt wurden **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass die vorhandenen Koexpositionen die Ergebnisse nicht nennenswert beeinflussen würden	
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)	
• **Co:** Es gibt indirekte Evidenz dafür, dass die Verteilung der primären Kovarianten und bekannten Störfaktoren zwischen den Gruppen unterschiedlich war und in den endgültigen Analysen nicht angemessen bereinigt wurde **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen über die Verteilung der bekannten Störfaktoren vor (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben) **ODER** • es gibt indirekte Evidenz dafür, dass primäre Kovarianten und Störfaktoren anhand von Messungen mit unbekannter Validität bewertet wurden **ODER** • Es liegen keine ausreichenden Informationen über die Messverfahren vor, die zur Bewertung der primären Kovarianten und Confounder verwendet wurden (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben) **ODER** • es gibt indirekte Evidenz dafür, dass es eine unausgewogene Bereitstellung zusätzlicher	n.a.

Koexpositionen in den primären Studiengruppen gab, die nicht angemessen bereinigt wurden **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen über Koexpositionen oder die Methoden zur Bewertung von Kovarianten oder Confoundern vor (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben) • **CaCo:** Es gibt indirekte Evidenz dafür, dass sich die Verteilung der primären Kovarianten und bekannten Störfaktoren zwischen Fällen und Kontrollen unterscheidet und nicht weiter untersucht wurde **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen über die Verteilung bekannter Störfaktoren in Fällen und Kontrollen vor (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben) **ODER** • es gibt indirekte Evidenz dafür, dass primäre Kovarianten und Störfaktoren anhand von Messungen mit unbekannter Validität bewertet wurden **ODER** • es werden keine ausreichenden Informationen über die verwendeten Messverfahren gegeben (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben) **ODER** • es gibt indirekte Evidenz für eine unausgewogene Bereitstellung zusätzlicher Koexpositionen zwischen Fällen und Kontrollen, die nicht angemessen bereinigt wurden **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen über Koexpositionen oder die Methoden zur Bewertung von Kovarianten oder Störfaktoren vor (als Grundlage für die Antwort ist "NR" anzugeben) (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben)	
Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)	
• **Co**: Es gibt direkte Evidenz dafür, dass die Verteilung der primären Kovarianten und der bekannten	n.a.

Confounder zwischen den Gruppen unterschiedlich war, Confounding nachgewiesen wurde und in den endgültigen Analysen nicht angemessen bereinigt wurde **ODER** • es gibt direkte Evidenz dafür, dass primäre Kovarianten und Confounder mit nicht validen Messungen bewertet wurden **ODER** • es gibt direkte Evidenz für eine unausgewogene Bereitstellung zusätzlicher Koexpositionen in den primären Studiengruppen, für die keine angemessene Bereinigung vorgenommen wurde • **CaCo**: Es gibt direkte Evidenz dafür, dass sich die Verteilung der primären Kovarianten und der bekannten Störfaktoren zwischen Fällen und Kontrollen unterscheidet, ein Confounding wurde nachgewiesen, aber in den endgültigen Analysen nicht angemessen bereinigt **ODER** • es gibt direkte Evidenz dafür, dass primäre Kovarianten und Confounder mit nicht validen Messungen bewertet wurden **ODER** • es gibt direkte Evidenz dafür, dass es eine unausgewogene Bereitstellung zusätzlicher Koexpositionen zwischen Fällen und Kontrollen gab, die nicht angemessen bereinigt wurden	

Performance Bias	
Frage 5: Waren die Versuchsbedingungen in allen Studiengruppen identisch? *Im ursprünglichen OHAT-Protokoll gilt dieses Kriterium nur für Tierstudien. In Humanstudien mit EMF-Exposition könnten jedoch systematische Unterschiede zwischen den Versuchsbedingungen während der Exposition und der Scheinexposition die Ergebnisse erheblich verfälschen. Daher erachteten wir dieses Kriterium als entscheidend für ein gut kontrolliertes Design in Humanstudien. Bei HCTs, die EMF untersuchen, haben wir bei diesem Kriterium speziell das Vorhandensein und die Qualität der Scheinexposition in der/den Kontrollgruppe(n) oder -bedingungen bewertet..*	
Co, CaCo	EA, HCT
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)	
n.a.	• direkte Evidenz, dass expositionsbedingte Nebenwirkungen und alle anderen Bedingungen in den

	Studiengruppen identisch waren, d. h. eine Scheinexposition wird ausdrücklich erwähnt **UND** • der Apparat für die Scheinexposition war identisch mit dem Apparat für die Exposition **UND** • alle potenziellen Störfaktoren (z. B. Temperatur) der Exposition wurden berücksichtigt und, falls erforderlich, in der Scheinexposition nachgebildet oder potenziellen Störfaktoren wird entgegengewirkt **UND** • scheinexponierte Personen oder Tiere werden wie exponierte behandelt **UND** • Scheinexposition und Exposition fanden zur gleichen Zeit (oder zur gleichen Tageszeit) und unter den gleichen Bedingungen statt **UND** • alle Unterschiede sind gering, gut dokumentiert und begründet
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)	
n.a.	• indirekte Evidenz, dass expositionsbedingte Nebenwirkungen und andere Bedingungen in allen Studiengruppen identisch waren, d. h. eine Scheinexposition wird ausdrücklich erwähnt **UND** • das Gerät für die Scheinexposition ist dem Expositionsgerät zumindest sehr ähnlich **UND** • expositionsbedingte Störfaktoren (z.B. Temperatur) wurden nicht vollständig berücksichtigt und nachgeahmt oder es wurde nicht gegengesteuert **UND** • scheinexponierte Personen oder Tiere wurden wie exponierte behandelt **UND** • Scheinexposition und Exposition fanden zumindest zu vergleichbaren Zeiten und Bedingungen statt **UND** • etwaige Unterschiede sind dokumentiert und begründet **ODER**

	• es wird davon ausgegangen, dass es keine expositionsbedingten Nebenwirkungen gab oder dass diese die Ergebnisse nicht nennenswert beeinflussen würden
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)	
n.a.	• indirekte Evidenz, dass expositionsbedingte Nebenwirkungen oder andere Bedingungen zwischen den Studiengruppen unterschiedlich sind **ODER** • eine Scheinexposition wird explizit erwähnt oder es gibt indirekte Evidenz für das Vorhandensein einer Scheinexposition, aber es werden keine oder nur unzureichende Details angegeben, um von identischen Bedingungen zwischen den Studiengruppen/Bedingungen auszugehen **ODER** • es werden unzureichende Informationen geliefert (z. B. "nicht berichtet" oder "NR")
Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)	
n.a.	• direkte Evidenz, dass expositionsbedingte Nebenwirkungen oder andere Bedingungen zwischen den Studiengruppen unterschiedlich sind **ODER** • direkte Evidenz, dass es keine Scheinexposition gab **ODER** • es ist sehr wahrscheinlich, dass es keine Scheinexposition gab, da nur Begriffe wie "Kontrollgruppe" oder "Kontrollbedingung" ohne weitere Erklärungen verwendet werden
Frage 6: Wurden das Studienpersonal und die Versuchspersonen während der Versuche für die Exposition verblindet?	
Co, CaCo	EA, HCT
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)	
n.a.	• direkte Evidenz, dass das Forschungspersonal (und die Probanden im HCT) angemessen verblindet waren und es unwahrscheinlich ist, dass sie die Verblindung bis zum vollständigen

	Abschluss der Versuchsdurchführung hätten durchbrechen können
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)	
n.a.	• Indirekte Evidenz, dass das Forschungspersonal (und die Probanden im HCT) angemessen verblindet waren und es unwahrscheinlich ist, dass sie die Verblindung während der Studie hätten aufheben können **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass das Fehlen einer angemessenen Verblindung während der Studie die Ergebnisse nicht nennenswert verfälschen würde
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)	
n.a.	• indirekte Evidenz, dass es für das Forschungspersonal (oder die Probanden im HCT) möglich war, auf die Studiengruppen zu schließen **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen über die Verblindung der Studiengruppen während der Studie vor (als Grundlage für die Antwort ist "NR" anzugeben)
Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)	
n.a.	• direkte Evidenz für eine unzureichende Verblindung der Studiengruppen, einschließlich einer fehlenden oder unvollständigen Verblindung des Forschungspersonals (und der Probanden bei HCT)

Attrition/Exclusion Bias	
Frage 7: Waren die Ergebnisdaten vollständig ohne Verlust oder Ausschluss von der Analyse?	
Co, CaCo	EA, HCT
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)	
• **Co:** direkte Evidenz, dass der Verlust von Probanden (d. h. unvollständige Ergebnisdaten) angemessen behandelt wurde und die Gründe für den Ausschluss von Probanden aus einer Studie dokumentiert wurden • **CaCo:** direkte Evidenz, dass der Ausschluss von Probanden aus Analysen angemessen behandelt wurde und die Gründe für den	• direkte Evidenz, dass während der Studie keine Probanden oder Tiere verloren gingen und die Ergebnisdaten vollständig waren **ODER** • der Verlust von Versuchspersonen (d. h. unvollständige Ergebnisdaten) angemessen behandelt wurde und die Gründe dokumentiert wurden, wenn Versuchspersonen oder Tiere aus einer Studie entfernt wurden

Ausschluss von Probanden aus einer Studie dokumentiert wurden	
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)	
• **Co:** Es gibt indirekte Evidenz dafür, dass der Verlust von Probanden (d. h. unvollständige Ergebnisdaten) angemessen behandelt wurde und die Gründe für den Ausschluss von Probanden aus einer Studie dokumentiert wurden. **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass der Anteil der verlorenen Probanden die Ergebnisse nicht nennenswert verfälschen würde • **CaCo:** indirekte Evidenz, dass der Ausschluss von Probanden aus Analysen angemessen behandelt wurde und die Gründe für den Ausschluss von Probanden aus einer Studie dokumentiert wurden	• Indirekte Evidenz, dass der Verlust von Probanden oder Tieren (d. h. unvollständige Ergebnisdaten) angemessen berücksichtigt wurde und die Gründe für den Ausschluss von Probanden oder Tieren aus einer Studie dokumentiert wurden **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass der Anteil der bis zum Follow-up verlorenen Probanden die Ergebnisse nicht nennenswert verfälschen würde
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)	
• **Co:** indirekte Evidenz, dass der Verlust von Probanden (d. h. unvollständige Ergebnisdaten) inakzeptabel groß war und nicht angemessen berücksichtigt wurde **ODER** • Es liegen keine ausreichenden Informationen über die Anzahl der Probanden vor, die bis zur Nachbeobachtung verloren gegangen sind (als Grundlage für die Antwort ist "NR" anzugeben) • **CaCo:** indirekte Evidenz dafür, dass der Ausschluss von Probanden aus den Analysen nicht angemessen berücksichtigt wurde **ODER** • keine ausreichenden Informationen über die Gründe für den Ausschluss von Probanden aus der Studie vorliegen (als Grundlage für die Antwort ist "NR" anzugeben)	• indirekte Evidenz, dass der Verlust von Probanden oder Tieren (d. h. unvollständige Ergebnisdaten) inakzeptabel groß war (mehr als 20 % in jeder Gruppe) und nicht angemessen berücksichtigt wurde **ODER** • Es liegen keine ausreichenden Informationen über die Anzahl der Probanden oder Tiere vor, die bis zur Nachbeobachtung verloren gingen (als Grundlage für die Antwort ist "NR" anzugeben).
Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)	
• **Co:** direkte Evidenz, dass der Verlust von Probanden (d. h. unvollständige Ergebnisdaten) inakzeptabel groß war und nicht angemessen berücksichtigt wurde • **CaCo:** direkte Evidenz, dass der Ausschluss von Probanden aus den	• direkte Evidenz, dass der Verlust von Probanden oder Tieren (d. h. unvollständige Ergebnisdaten) inakzeptabel groß war und nicht adäquat behandelt wurde

Analysen nicht angemessen berücksichtigt wurde	

Detection Bias	
Frage 8: Ist die Charakterisierung der Exposition ausreichend? *Bei diesem Kriterium wird speziell die Qualität der Charakterisierung der HF-EMF-Exposition bewertet. Die folgenden grundlegenden Informationen sind für EA und HCT erforderlich: Frequenz, Modulationsschema, Beschreibung der Signalquelle und des Expositionsaufbaus, für die Dosimetrie verwendete Methoden und Geräte (Messung, Berechnung, Simulation), gültige Expositionsmetrik, Expositionsdauer und Messungen der Hintergrundbelastung.* *Studien gelten als Bias gefährdet, wenn der Expositionskontrast zwischen der exponierten und der nicht exponierten Gruppe unzureichend ist. Ein unzureichender Expositionskontrast kann in Fällen auftreten, in denen niedrige Expositionsniveaus angewandt werden, ohne den Versuchsaufbau von der Hintergrundbelastung der Umwelt abzuschirmen. Unter Berücksichtigung der Bewertungsunsicherheiten und Schwankungen der Hochfrequenzfelder in der Umgebung wird ein Expositionsniveau von weniger als 10 dB (Faktor 3,16 für Feldstärken und Faktor 10 für Leistungsfluss oder Energiedichte) über dem HF-Hintergrundniveau als unzureichend angesehen.*	
Co, CaCo	EA, HCT
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)	
• direkte Evidenz, dass die Exposition konsistent (d. h. mit derselben Methode und über denselben Zeitraum) unter Verwendung etablierter Methoden zur direkten Messung der Exposition ermittelt wurde (z. B. umfassende Messungen oder Verwendung von Personendosimetern und/oder Betreiberdaten)	• direkte Evidenz, dass die Exposition angemessen charakterisiert wurde *(z. B. alle oben genannten Expositionsinformationen wurden bereitgestellt, als geeignet und sinnvoll erachtet)* **UND** • konsistent (d. h. mit derselben Methode und über denselben Zeitraum) in allen Studiengruppen durchgeführt wurde **UND** • es gibt direkte Evidenz dafür, dass der Expositionskontrast zwischen den verschiedenen Gruppen ausreichend war, insbesondere wenn nur ein Expositionsniveau angewandt wurde, muss es direkte Evidenz dafür geben, dass die Stärke des Hintergrundfeldes in der Umgebung ausreichend niedriger war als das angewandte Expositionsniveau (entweder durch gemeldete Messdaten der Hintergrundfelder oder durch die Verwendung eines Aufbaus, in dem die exponierten Tiere/Personen von den

	Umgebungsfeldern abgeschirmt sind)
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)	
• Indirekte Evidenz, dass die Exposition durchgängig mit etablierten Methoden bewertet wurde, die die Exposition direkt messen **ODER** • die Exposition wurde anhand indirekter Messmethoden bewertet (z. B. anhand von Fragebögen, die validiert wurden, oder durch eine Bewertung der Exposition am Arbeitsplatz durch einen zertifizierten Industriehygieniker) **ODER** • eine Expositionsmodellierung durchgeführt wurde	• indirekte Evidenz, dass die Exposition angemessen charakterisiert wurde *(z. B. wurden die meisten der oben genannten Expositionsinformationen geliefert, die verständlich genug sind, um noch als geeignet und sinnvoll angesehen zu werden)* **UND** • konsistent (d. h. mit derselben Methode und demselben Zeitrahmen) in allen Studiengruppen durchgeführt wurde **UND** • es gibt indirekte Evidenz dafür, dass der Expositionskontrast zwischen verschiedenen Gruppen ausreichend war, insbesondere wenn nur ein Expositionsniveau angewandt wurde, muss es indirekte Evidenz dafür geben, dass die Hintergrundfeldstärke in der Umgebung ausreichend niedriger war als das angewandte Expositionsniveau *(z. B. keine Abschirmung gegen Umweltfelder und keine Messdaten von Hintergrundfeldern verfügbar, aber das angewandte Expositionsniveau liegt deutlich über den typischen Umweltfeldstärken)*
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)	
• indirekte Evidenz, dass die Exposition mit schlecht validierten Methoden zur direkten Messung der Exposition bewertet wurde **ODER** • direkte Evidenz, dass die Exposition mit indirekten Messgrößen bewertet wurde, die nicht validiert wurden oder von denen empirisch nachgewiesen wurde, dass sie mit Methoden zur direkten Messung der Exposition übereinstimmen (z. B. eine Arbeitsplatz-Expositions-Matrix oder Fragebögen mit Selbstauskünften ohne Validierung) **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen über die Expositionsbeurteilung vor,	• indirekte Evidenz, dass die Exposition mit schlecht validierten Methoden bewertet wurde oder nicht die Annahme eines ausreichenden Expositionskontrasts zulässt *(z. B. wurde die Hintergrundexposition nicht gemessen und es wurde erwartet, dass der Expositionskontrast gering ist)* **ODER** • viele wichtige Parameter fehlen *(z. B. die Expositionsquelle)* **ODER** • es werden unzureichende Informationen über die Gültigkeit der Expositionsbewertungsmethode geliefert, aber keine Evidenz zur Besorgnis (als Antwortgrundlage ist

einschließlich Validität und Zuverlässigkeit, aber keine Evidenz für Bedenken hinsichtlich der verwendeten Methode (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben)	"NR" anzugeben) *(z. B. Messmethode nicht beschrieben)*
Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)	
• direkte Evidenz, dass die Exposition mit Methoden mit geringer Validität bewertet wurde **ODER** • Evidenz für eine falsche Klassifizierung der Exposition	• direkte Evidenz, dass die Exposition mit schlecht validierten Methoden bewertet wurde *(z. B. Studien, die Expositionsmetriken melden, für die die Methode der Expositionsbewertung nicht angegeben ist, oder die angegebene Expositionsmetrik wurde für Situationen berechnet oder gemessen, die nicht die tatsächlichen Versuchsbedingungen widerspiegeln, wie z. B. SAR-Werte aus Produktkonformitätstests, die vom Mobiltelefonhersteller bereitgestellt wurden, ODER die Hintergrundbelastung wurde gemessen und der Expositionskontrast ist nachweislich niedrig)* **ODER** • die wichtigsten Parameter fehlen *(z. B. die Expositionsdauer)*
Frage 9: Können wir der Auswertung der Ergebnisse trauen?	
CaCo	EA, HCT, Co
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)	
• **<u>CaCo:</u>** direkte Evidenz, dass das Ergebnis bei Fällen (d. h. Falldefinition) und Kontrollen mit akzeptablen Methoden bewertet wurde **UND** • die Probanden wurden in allen Studiengruppen über den gleichen Zeitraum weiterverfolgt **UND** • Direkte Evidenz, dass die Beurteiler der Ergebnisse (einschließlich der Studienteilnehmer, wenn die Ergebnisse selbst berichtet wurden) bei der Bewertung der Ergebnisse in Fällen (d. h. Falldefinition) und Kontrollen gegenüber dem Expositionsniveau angemessen verblindet waren	• direkte Evidenz, dass das Ergebnis nach anerkannten Methoden bewertet wurde **UND** • die Probanden wurden in allen Studiengruppen gleich lange nachbeobachtet **UND** • die Beurteiler der Ergebnisse (einschließlich der Studienteilnehmer, wenn die Ergebnisse selbst berichtet wurden) waren gegenüber den Studiengruppen angemessen verblindet, und es ist unwahrscheinlich, dass sie die Verblindung vor der Beurteilung der Ergebnisse hätten durchbrechen können
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)	

• **<u>CaCo:</u>** indirekte Evidenz, dass das Ergebnis bei Fällen (d. h. Falldefinition) und Kontrollen mit akzeptablen Methoden bewertet wurde **UND** • die Probanden wurden in allen Studiengruppen über den gleichen Zeitraum beobachtet **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass die verwendeten Methoden zur Ergebnisbewertung die Ergebnisse nicht nennenswert verfälschen **UND** • Direkte Evidenz, dass die Ergebnisermittler bei der Berichterstattung über die Ergebnisse in angemessener Weise gegenüber dem Expositionsniveau verblindet waren **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass das Fehlen einer angemessenen Verblindung der Ergebnisermittler die Ergebnisse nicht nennenswert verzerrt (einschließlich der Tatsache, dass die Probanden, die die Ergebnisse selbst berichten, sich wahrscheinlich nicht über die berichteten Zusammenhänge zwischen der Exposition und diesem Ergebnis bewusst waren oder dass das Fehlen der Verblindung wahrscheinlich nicht zu einer Verzerrung eines bestimmten Ergebnisses führt).	• indirekte Evidenz, dass das Ergebnis mit akzeptablen Methoden bewertet wurde **UND** • die Probanden oder Tiere wurden in allen Studiengruppen über den gleichen Zeitraum beobachtet **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass die verwendeten Methoden zur Ergebnisbewertung die Ergebnisse nicht nennenswert verfälschen würden **UND** • es gibt indirekte Evidenz dafür, dass die Beurteiler der Ergebnisse (einschließlich der Studienteilnehmer, wenn die Ergebnisse selbst berichtet wurden) gegenüber der Studiengruppe angemessen verblindet waren, und es ist unwahrscheinlich, dass sie die Verblindung vor der Beurteilung der Ergebnisse hätten durchbrechen können **ODER** • es wird davon ausgegangen, dass das Fehlen einer angemessenen Verblindung der Prüfer die Ergebnisse nicht nennenswert verzerrt, was eher für objektive Ergebnismessungen gilt
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)	
• **<u>CaCo</u>**: indirekte Evidenz, dass das Ergebnis in Fällen (d. h. Falldefinition) mit einem unempfindlichen Instrument bewertet wurde **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen darüber vor, wie die Fälle identifiziert wurden (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben) **ODER** • Indirekte Evidenz, dass es für die Bewerter der Ergebnisse möglich war, das Ausmaß der Exposition	• indirekte Evidenz dafür, dass die Methode der Ergebnisbewertung ein unempfindliches Instrument ist **ODER** • die Dauer der Nachbeobachtung war je nach Studiengruppe unterschiedlich **ODER** • Es war möglich, dass die Beurteiler der Ergebnisse (einschließlich der Studienteilnehmer, wenn die Ergebnisse selbst berichtet wurden) auf die Studiengruppe schließen konnten, bevor sie die Ergebnisse berichteten

abzuleiten, bevor sie die Ergebnisse berichteten (einschließlich der Tatsache, dass die Probanden, die die Ergebnisse selbst berichteten, sich wahrscheinlich der berichteten Zusammenhänge zwischen der Exposition und den Ergebnissen bewusst waren) **ODER** • es gibt unzureichende Informationen über die Verblindung der Ergebnis-Bewerter (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben)	**ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen über die Verblindung der Ergebnisbeurteiler vor (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben)
Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)	
• **<u>CaCo:</u>** direkte Evidenz, dass das Ergebnis in Fällen (d. h. Falldefinition) mit einem unempfindlichen Instrument bewertet wurde **ODER** • Direkte Evidenz, dass die Ergebnisermittler vor der Berichterstattung über die Ergebnisse das Expositionsniveau kannten (einschließlich der Tatsache, dass die Probanden, die die Ergebnisse selbst berichten, sich der berichteten Zusammenhänge zwischen Exposition und Ergebnis bewusst waren)	• direkte Evidenz dafür, dass die Ergebnisbewertungsmethode ein unempfindliches Instrument ist **ODER** • die Dauer der Nachbeobachtung war je nach Studiengruppe unterschiedlich **ODER** • direkte Evidenz für das Fehlen einer angemessenen Verblindung der Ergebnisbeurteiler (einschließlich der Studienteilnehmer, wenn die Ergebnisse selbst berichtet wurden), einschließlich fehlender oder unvollständiger Verblindung

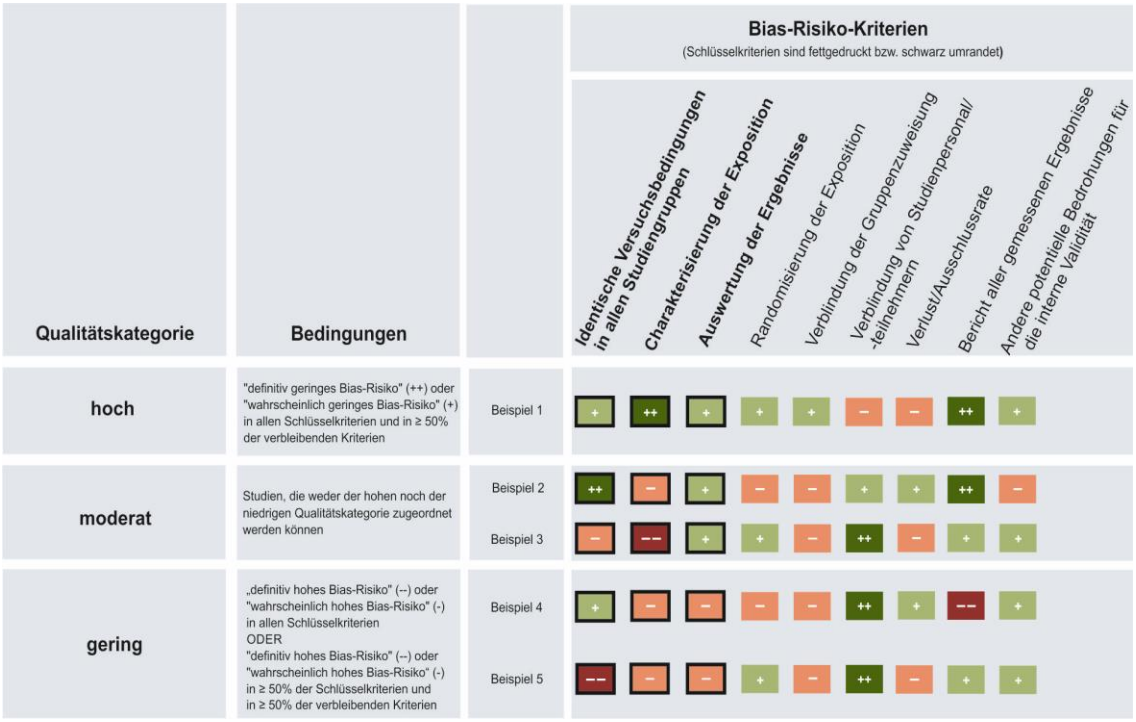
Selective Reporting Bias
Frage 10: Wurden alle gemessenen Ergebnisse berichtet?
Co, CaCo, EA, HCT
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)
• direkte Evidenz, dass alle gemessenen Endpunkte der Studie (primäre und sekundäre), die im Protokoll, in den Methoden, in der Zusammenfassung und/oder in der Einleitung (die für die Bewertung relevant sind) beschrieben sind, berichtet wurden
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)
• indirekte Evidenz, dass alle gemessenen Endpunkte der Studie (primäre und sekundäre), die im Protokoll, in den Methoden, in der Zusammenfassung und/oder in der Einleitung (die für die Bewertung relevant sind) beschrieben sind, berichtet wurden • **ODER** • Analysen, die nicht im Voraus geplant waren, sind klar angegeben, und es wird davon ausgegangen, dass die ungeplanten Analysen angemessen waren und dass eine selektive Berichterstattung die Ergebnisse nicht nennenswert verfälschen würde. Dies würde Ergebnisse einschließen, die mit unzureichender Ausführlichkeit berichtet werden, z. B. nur Ergebnisse, die statistisch signifikant sind (oder nicht)
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)

• indirekte Evidenz, dass nicht alle gemessenen Endpunkte der Studie (primäre und sekundäre), die im Protokoll, in den Methoden, in der Zusammenfassung und/oder in der Einleitung (die für die Bewertung relevant sind) beschrieben sind, berichtet wurden **ODER** • indirekte Evidenz, dass ungeplante Analysen einbezogen wurden, die die Ergebnisse merklich verfälschen können **ODER** • es liegen keine ausreichenden Informationen über die selektive Ergebnisberichterstattung vor (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben)
Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)
• direkte Evidenz, dass nicht alle gemessenen Endpunkte der Studie (primäre und sekundäre), die im Protokoll, in den Methoden, in der Zusammenfassung und/oder in der Einleitung (die für die Bewertung relevant sind) beschrieben sind, berichtet wurden. Neben der Nichtberichterstattung über die Ergebnisse würde dies auch die Berichterstattung über Ergebnisse auf der Grundlage eines zusammengesetzten Ergebnisses ohne einzelne Ergebniskomponenten oder Ergebnisse, die unter Verwendung von Messungen, Analysemethoden oder Untergruppen der Daten (z. B. Unterskalen) berichtet wurden, die nicht vorab spezifiziert waren, oder die Berichterstattung über Ergebnisse, die nicht vorab spezifiziert waren, umfassen, oder ungeplante Analysen wurden einbezogen, die die Ergebnisse merklich verzerren würden

Andere Bias
Frage 11: Gab es andere potentielle Bedrohungen für die interne Validität?
Co, CaCo, EA, HCT
Definitiv geringes Risiko eines Bias (++)
• direkter Nachweis, dass geeignete Statistiken durchgeführt wurden **UND** • direkter Nachweis, dass sich die Forscher an das Studienprotokoll gehalten haben **UND** • direkter Nachweis, dass das Studiendesign wichtige Störfaktoren/Confounder bei EA und HCT berücksichtigt (falls zutreffend)
Wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias (+)
• indirekter Nachweis, dass geeignete Statistiken durchgeführt wurden **UND** • indirekter Nachweis, dass sich die Forscher an das Studienprotokoll gehalten haben **UND** • indirekter Nachweis, dass das Studiendesign wichtige Störfaktoren/Confounder bei EA und HCT berücksichtigt (falls zutreffend)
Wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias (-)
• indirekte Evidenz, dass ungeeignete Statistiken durchgeführt wurden **ODER** • es werden keine ausreichenden Informationen über die Angemessenheit der statistischen Methoden geliefert (als Antwortgrundlage ist "NR" anzugeben) **ODER** • indirekte Evidenz, dass die Forscher sich nicht an das Studienprotokoll gehalten haben **ODER** • indirekte Evidenz, dass es andere potenzielle Bedrohungen für die interne Validität gab (z. B. wichtige Störvariablen in EA und HCT)

Definitiv hohes Risiko eines Bias (--)
• direkter Nachweis, dass ungeeignete Statistiken durchgeführt wurden ODER keine statistische Analyse durchgeführt wurde **ODER** • direkte Hinweise darauf, dass die Forscher sich nicht an das Studienprotokoll gehalten haben **ODER** • direkte Hinweise darauf, dass es andere potenzielle Gefahren für die interne Validität gab (z. B. wichtige Störvariablen bei EA und HCT)

Anhang 8: Einstufung der einzelnen Studien in eine von drei Qualitätskategorien (1. Stufe, 2.Stufe, 3. Stufe) am Beispiel von tierexperimentellen Studien und kontrollierte Humanstudien



Basierend auf den Bewertungen des Bias-Risikos für die angewandten Kriterien: "++" definitiv geringes Risiko eines Bias, "+" wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias, "-" wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias, oder "--" definitiv hohes Risiko eines Bias. Angepasst an den vom Office of Health Assessment and Translation des National Toxicology Program empfohlenen Ansatz (NTP 2015; 2019).

Um in die 1. Stufe eingestuft zu werden, muss eine Studie bei allen Schlüsselkriterien als "definitiv geringes Risiko eines Bias" oder "wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias" eingestuft werden. Zusätzlich müssen ≥ 50 % der übrigen Kriterien als "definitiv geringes Risiko eines Bias" oder "wahrscheinlich geringes Risiko eines Bias" eingestuft werden.

Um in die 3. Stufe eingestuft zu werden, müssen bei einer Studie entweder alle der Schlüsselkriterien als "definitiv hohes Risiko eines Bias" oder "wahrscheinlich hohes

Risiko eines Bias" eingestuft werden oder ≥ 50 % der Schlüsselkriterien als auch ≥ 50 % der verbleibenden Kriterien müssen als "definitiv hohes Risiko eines Bias" oder "wahrscheinlich hohes Risiko eines Bias" eingestuft werden.

Studien, die weder der 1. noch der 3. Stufe zugeordnet werden konnten, werden in die 2. Stufe eingeordnet. Bitte beachten Sie, dass die obige Abbildung den Prozess am Beispiel von tierexperimentellen Studien und kontrollierte Humanstudien zeigt. Es wird jedoch auf epidemiologische Studien in gleicher Weise angewandt, mit Ausnahme der teilweise geänderten Kriterien und Schlüsselkriterien, die in Kapitel 2.5 Studienbeurteilung erwähnt werden.

Anhang 2: Extraktionstabelle der eingeschlossen Studien im FR1-Bereich

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Baranski 1972 b EA Study quality: 3rd tier	Guinea pigs and rabbits Exposure groups 1-6: subgroups of 180 guinea pigs exposure group 7 and 8: subgroups of 30 rabbits control group: 30 guinea pigs and 20 rabbits	no details provided on exposure source and set-up, 3.0 GHz, CW and PW 9 conditions: control and 8 exposure groups: group 1 (3.5 mW/cm², PW, chronic exposure), group 2 (3.5 mW/cm², CW, chronic exposure), group 3 (25 mW/cm², CW, single exposure), group 4 (3.5 mW/cm², CW, single exposure), group 5 (25 mW/cm², PW, single exposure), group 6 (3.5 mW/cm², PW, single exposure), group 7 (5 mW/cm², PW, chronic exposure), group 8 (5 mW/cm², CW, chronic exposure) (no data provided on exposure validation) Exposure duration: 3 h (single exposure) and 3 h per day for 3 months (chronic exposure)	Histological effects on the brain (e.g., lesions, metachromasia, spherical metachromatic bodies) Enzyme activities in the brain (succinic acid dehydrogenase, cytochrome oxidase, acetylcholinesterase) Body temperature at various points of the body	Chronic exposure: Appearance of morphologic lesions was indicative of metabolic disturbances in myelin sheaths and glial cells as expressed by the appearance of peculiar metachromatic spherical bodies in the white matter of the brain and cerebellum. A proliferative reaction of glial cells was also encountered (no statistics, only qualitative data provided). According to the text, acetylcholinesterase activity and succinic acid dehydrogenase activity decreased (but contradictory data in the appropriate tables). Single exposure: After exposure to 25 mW/cm², typical thermal lesions were present (although the authors declare that the exposure conditions were athermal). Acetylcholinesterase activity was decreased after PW exposure. Succinic acid dehydrogenase activity was decreased after PW exposure and increased after CW (25 mW/cm²) exposure. Conclusion: Chronic exposure may lead to morphologic lesions in the brain and decreased acetylcholinesterase and succinic acid dehydrogenase activity, more profound for PW than for CW. (Effect found)	

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Baranski and Edelwejn 1967 EA Study quality: 3rd tier	Rabbits (with screw electrodes implanted into the skull) Exposure group 1: n=10 (experiment 1) exposure group 2: n=10 (experiment 1) exposure group 3: n=10 (experiment 1) exposure group 4: subgroups of 40 (exact number unknown; experiment 2) exposure group 5: subgroups of 40 (exact number unknown; experiment 2) control group: controls are mentioned, but no details provided	High frequency generator (CW exposure) and generator (PW) (for 3 GHz); appropriate auxillary unit, parabolic and horn antenna (for 10 GHz) 3 GHz and 10 GHz, CW, PW 6 conditions: control and 5 exposure groups; group 1: 3 GHz (PW, 5 mW/cm² (or 7 mW/cm², contradictory data)), group 2: 3 GHz (CW, 5 mW/cm² (or 7 mW/cm², contradictory data)), group 3: 10 GHz (PW, 5 mW/cm² (or 7 mW/cm², contradictory data)), group 4: 3 GHz (5-30 mW/cm²; increasing every 15 min. by 5 mW/cm²; PW and CW), group 5: 10 GHz (5 and 10 mW/cm²; increasing every 15 min. by 5 mW/cm²; PW), (no data provided on exposure validation) Exposure duration: experiment 1: 3 h/day for 60 days; experiment 2: 1 single exposure (2-6 x 15 min., i.e., 30-90 min.)	Bioelectric activity from different brain areas (experiment 1: before, during (after 30 days (or after 28 or 49 days,- contradictory statements) and after ending the exposure; experiment 2: every 15 min. with increasing power density and 24 h after the end of exposure (EEG) Morphological examination of the brain (at different time points) Rectal temperature; temperature on the surface of the cerebral cortex and in the subcutaneous tissue of the head	Chronic exposure with 3 GHz microwaves (7 mW/cm² power density) produced both functional and morphological changes, their intensity being greater with PW than with CW (only descriptive qualitative data of single rabbits). Conclusion: Chronic 3 GHz exposure did not raise the temperature, but produced both functional and morphological changes, their intensity being greater when pulse and not continuous modulation was applied (experiment 1). (Effect found)	

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Bektas et al. 2022 EA Study quality: 2nd tier	Wistar albino rats (healthy and with induced diabetes) Exposure group 1: healthy rats (n=7), exposure group 2: diabetes rats (n=7), sham exposure group 1: healthy rats (n=7), sham exposure group 2: diabetes rats (n=7)	GSM signal generator (antenna), 3.5 GHz (5G), PW (rate 217 Hz; GSM) 2 conditions: sham exposure and exposure (28.1 V/m, PD 1.6 W/m², SAR 37 mW/kg (whole-body), SAR 323 mW/kg and SAR 195 mW/kg (for 1 g and 10 g averaging, respectively (gray matter)) (measurement, calculation/simulation) Head exposure (1 cm distance to antenna) Exposure duration: 2 h/day, 5 days/week for 1 month (30 days) Remarks: 7 immobilized rats were simultaneously exposed in a plexiglass carousel with the antenna in the center	Energy homeostasis and redox balance in the brains (total antioxidant status, total oxidant status, hydrogen peroxide, nesfatin, ghrelin, and irisin levels (ELISA)) Histological changes (synaptophysin and degenerated neurons)	Exposure caused significant increases in ghrelin, total oxidant and hydrogen peroxide levels and significant decreases in nesfatin-1, irisin and total antioxidant levels compared to appropriate sham exposure Conclusion: The data indicate that 3.5 GHz exposure caused changes in the energy metabolism in both healthy and diabetic rat brains. (Effect found)	

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Bertharion et al. 1971 EA Study quality: 3rd tier	White rats Exposure group: n=15, control group: n=15	No data provided on exposure source, 3.0 GHz, PW (width and rate not provided) 2 conditions: control and exposure (PD 5±1 mW/cm²) (no data provided on exposure validation) Whole body exposure Exposure duration: 1, 2, 3, 4, 5, 7 days, 1 and 5 months	Brain activity (electro-cortico-graphic recording collected by different electrode derivations after drilling the skull)	Cortico-graphic recordings were modified under exposure from day 4 of exposure and the recordings returned to normal after exposure cessation (no statistics provided). Conclusion: Pulsed microwave exposure may have specific effects on the central nervous system. (Effect found)	Correspondence article with preliminary results
Chiang et al. 1984 EA Study quality: 2nd tier	C57BL mice Exposure group 1: n=10, exposure group 2: n=10, exposure group 3: n=10, exposure group 4: n=10, exposure group 5: n=? (additional experiment), exposure group 6: n=? (additional experiment) control group: n=? (additional experiment), sham exposure group: n=10	Radar, 3.0 GHz, PW (rate 935 pps, width 1.2 µs) 7 conditions: control group, sham exposure and 5 exposure conditions; group 1 (PD 0.1 mW/cm²), groups 2 and 6 (PD 0.5 mW/cm²), group 3 (PD 1 mW/cm²), group 4 (PD 5 mW/cm²), group 5 (PD 0.3 mW/cm²) (measurement) Whole body exposure Exposure duration: 3 h Remarks: animals exposed individually with their bodies parallel to the E-vector	Enzyme levels in the brain (succinate dehydrogenase, monoamine oxidase (as mitochondrial marker enzymes))	A significant decrease of enzyme level was found from 0.5 mW/cm² or higher for both enzymes in hippocampus and hypothalamus, respectively. Conclusion: The data might indicate an effect of exposure on the energy metabolism in the brain. (Effect found)	Additional data for 2.45 GHz available but not extracted

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Pu et al. 1997 EA Study quality: 3rd tier	LACA mice (implanted with electrodes) Exposure group: n=12 (electrodes implanted on day 6 of exposure) exposure group 2: n=5 or 12 (contradictory data; electrodes implanted before exposure) exposure group 3: n=5 or 12 (contradictory data; electrodes implanted after exposure) sham exposure group: n=12	Antenna, 3.0 GHz 2 conditions: sham exposure and exposure group (PD 5 mW/cm²) (no data provided on exposure validation) Whole body exposure Exposure duration: 1 h/day for 7 days Remarks: body (long axis) parallel to the field	Brain activity (customized EEG with implanted electrodes) Effects on mitochondrial marker enzymes in the brain (succinate dehydrogenase and ATP level) Body temperature	Exposure induced a significant decrease in brain activity. ATP and succinate dehydrogenase levels in the exposure group were significantly decreased. Conclusion: The data suggested that microwave exposure may have an effect on brain activity. (Effect found)	Exposure groups 2 and 3 were additional experiments to compare electrode implantation time

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Raslear et al. 1993 EA Study quality: 2nd tier	Albino Sprague-Dawley rats Exposure group 1: n=8 (200 pulses; not clear if the same animals were used for all exposure conditions), exposure group 2: n=8 (200 pulses (-20 dB)), exposure group 3: n=8 (200 pulses (-30 dB)), exposure group 4: n=8 (200 pulses (-40 dB)), exposure group 5: n=8 (200 pulses (-50 dB)), cage control: n=8?, sham exposure group: n=8? (not clear if the same animals were used for exposure and sham exposure/cage control)	circular waveguide, 3.0 GHz, PW (width 80 ns, rate 0.125 pps) 7 conditions: sham exposure, cage control, 5 exposure groups (0, -20, -30, -40, -50 dB) (peak power 700 MW; SAR 0.072 W/kg (whole-body time-averaged), SARs in the brain ranged from 0.057-0.087 W/kg) (measurement, calculation/simulation) Whole body exposure Exposure duration: 200 pulses (during approx. 25 min) Environmental conditions: influence of co-exposure to X-rays and noise emitted by the exposure system was investigated Exposure remarks: 2 animals exposed simultaneously; animals restrained; SAR values for 24 body locations provided; antenna output was attenuated by wire screen of varying mesh densities	Sensory processing (perceptual and cognitive effects): discrimination performance in a bisection task	Dose-response effects were observed for discriminability, session time, and trial completions. Microwave exposures affected cognitive function in the rats, particularly the decision-making process. Effect found	

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Roberti et al. 1975 EA Study quality: 3rd tier	Albino Wistar rats Exposure group 1: n=15, exposure group 2: n=12, exposure group 3: n=6, exposure group 4: n=5 4 sham exposure groups: 5 to 15 animals (equal numbers as in respective exposure groups)	Horn antenna, 3.0 GHz and 10.7 GHz, CW, PW (duty cycle 1:1000, width 1.3 µs, rate 1.3 ms) 8 conditions: 4 sham exposure groups and 4 exposure groups: group 1 (10.7 GHz, CW, PD 0.6-0.9 mW/cm²), group 2 (3.0 GHz, CW, PD 0.5-1.0 mW/cm²), group 3 (3.0 GHz, PW, PD 1.5-2.0 mW/cm²), group 4 (3.0 GHz, PW, PD 24-26 mW/cm²) (measurement) Whole body exposure Exposure duration: continuously for 185 h or 408 h (only group 4) for 17 days Exposure remarks: 5-6 rats/cage, rats were kept in darkness during exposure	Effects on behavior: motor activity, runway performance (only in group 4) (registration of movement in a static electric field and running on an electrified grid floor) Body temperature	No effects were found. Conclusion: No deleterious effects of the microwave exposure have been detected. (No effect found)	Preliminary study

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Servantie et al. 1975 EA Study quality: 3rd tier	Albino rats Exposure group 1: n=4, exposure group 2: n=4, exposure, sham exposure group: n=10	Generator, 3.0 GHz, PW (rate 525 and 570 pps, width 1 µs) 3 conditions: sham exposure and 2 exposure groups: group 1 (PD 5 mW/cm², 525 pps), group 2 (PD 5 mW/cm², 570 pps) (no data provided on exposure validation) Whole body exposure Exposure duration: 10 days	Brain activity (effects on electrocorticogram)	Exposure yielded a frequency of the occipital electrocorticogram synchronous to the pulse repetition rate and this frequency persisted for few hours after exposure termination (no statistics). Conclusion: Exposure to pulsed microwave may lead to a synchronization of cortical neurons in rats. (Effect found)	

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Thuroczy et al. 1994 EA Study quality: 3rd tier	Hybrid F1-rats (anaesthetized and with implanted EEG electrodes) Exposure group 1: n=5, Exposure group 2: up to n=5, exposure group 3: n=5, exposure group 4: up to n=5, exposure group 5: n=4, exposure group 6: n=4, exposure group 7: up to n=5, exposure group 8: n=4, sham exposure group 1: up to n=5, sham exposure group 2: n=5 Not clear if the same or separate animals were used for the different exposure groups and for the sham exposure as well as for 2.45 GHz- and 4 GHz-exposure.	TE-cell waveguide, 4 GHz, CW, AM (16 Hz) Up to 10 conditions (depending on endpoint): sham exposure group 1 (CW, 0 mW/g), sham exposure group 2 (AM, 0 mW/g) and 8 exposure groups: group 1 (AM, SAR 8.4 mW/g (average in the cortex)), group 2 (CW, SAR 8.4 mW/g), group 3 (AM, SAR 16.8 mW/g), group 4 (CW, SAR 16.8 mW/g), group 5 (CW, SAR 25.2 mW/g, group 6 (CW, SAR 33.4 mW/g), group 7 (CW, SAR 42 mW/g), group 8 (CW, 56 mW/g) (measurement, calculation/simulation) Head exposure Exposure duration: 30 min	Effects on brain: brain activity (EEG; groups 1, 3, 7), cerebral blood flow (rheoencephalogram (REG); groups 2, 4), brain tissue DC impedance (groups 1, 2, 3, 4) and brain temperature (groups 2, 4, 5, 6, 7, 8) Effects on the cardiovascular system (ECG; groups 1, 2, 3, 4, 7) Rectal temperature	CW exposure at 42 mW/g caused a significant increase of the power of EEG delta waves simultaneously with the REG amplitude (however, data for REG amplitude at 42 mW/g not provided) as an index of cerebral blood flow. AM exposure (8.4 mW/g) was associated with increased power of EEG alpha and beta waves but changes in the cerebral blood flow were not observed (REG amplitude data not shown for AM exposure). CW exposure at 8.4 mW/g and 16.8 mW/g increased the cerebral blood flow but did not change EEG spectra. Conclusion: No changes in the brain activity were observed at low level exposure. However, at thermal level exposure, effects were detected. (Effect found)	Only data for 4 GHz exposure extracted, but additional data for 2.45 GHz are available in the publication Effects caused by SAR values above 16.8 mW/g were considered as thermal

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Yang et al. 2022 EA Study quality: 3rd tier	Guinea pigs Exposure group 1: n=10 (2 W/kg), exposure group 2: n=10 (4 W/kg), exposure group 3: n=10 (10 W/kg), sham exposure group: n=10	Horn antenna, 3.5 GHz, CW 4 conditions: sham exposure and 3 exposure groups (SAR 2, 4, and 10 W/kg) (measurement, calculation/simulation, calibration) Whole body exposure Exposure duration: 72 h	Auditory brainstem response thresholds Anxiety-like behavior (Open Field test) MDA level and antioxidant enzyme activity (GSH-px, SOD and CAT) Ultrastructure of the auditory cortex (TEM) Cytochrome-c relocalization, caspase-9, and cleaved caspase-3 expression in the auditory cortex	The level of MDA was increased, while the antioxidant enzyme activities were decreased. Ultrastructural changes in auditory cortex (e.g., swollen mitochondria and layered myelin sheaths) were observed (no statistics). Cytochrome-c relocalization, caspase-9 and cleaved caspase-3 activation were detected in exposed groups (no statistics). Conclusion: The results suggest that oxidative stress is an important mechanism which can induce ultrastructural damage to the auditory cortex and cell apoptosis. Oxidative stress, apoptosis induction and ultrastructural damage increase in a SAR-dependent manner. (Effect found)	

Immunsystem					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Baranski 1971 EA Study quality: 3rd tier	Guinea pigs, rabbits <u>Guinea pigs</u> exposure group 1: n=50, exposure group 2: n=50, control group 1: n=50 <u>Rabbits</u> exposure group 3: n=50, exposure group 4: n=50, control group 2: n=50	3 GHz, CW and PW 6 conditions: 2 control groups and 4 exposure groups (PD 3.5 mW/cm²) groups 1 and 3 (CW), groups 2 and 4 (PW) (measurement) Exposure duration: 3 hours/day for up to 4 months Remarks: animals immobilized	Blood parameters: RBC (only Guinea pigs), WBC, differential count (immediately, 1, 2, 3, and 4 weeks after exposure for 3 months) Microscopic examination of peripheral blood, bone marrow, spleen and lymph nodes (only in Guinea pigs) Mitotic indices (only in Guinea pigs directly after 3 and 4 months of exposure and 1 one month after exposure for 3 months)	After 3 months of exposure, WBC count increased in guinea pigs and rabbits through lymphocytosis. Nuclear structure and mitosis showed abnormalities in erythroblastic cells in the bone marrow and in lymphoid cells, in lymph nodes and spleen. There was a marked depression in pro-erythroblasts and basophilic erythroblasts, and the maturation curve was shifted to poly-a and orthochromatic erythroblasts (stronger after PW than after CW). Conclusion: A marked stimulation of the lymphocytic system and disturbances in erythropoiesis were found. (Effect found)	

Immunsystem					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Baranski 1972 a EA Study quality: 3rd tier	Guinea pigs Exposure group 1: n=50, exposure group 2: n=50, control group: n=50	Exposure source not provided, 3 GHz, PW, CW 3 conditions: control group and 2 exposure groups (PD 3.5 mW/cm²): group 1 (PW) and group 2 (CW) Exposure duration: 3 h/day for 3 months	Morphological changes, cell number, mitotic index (5 animals/group), cell maturation, 3H-incorporation (10 animals/group) of peripheral blood cells and blood cells in bone marrow, lymph nodes and spleen (e.g., lymphocytes, granulocytes)	There was an increase in absolute number of lymphocytes in peripheral blood as well as an increase in cells incorporation 3H-thymidine in lymph nodes and spleen of both exposure groups. Histological observations suggested a shift of lymphocyte population into the direction of less differentiated forms and changes in lymph node structure, especially after PW exposure (no statistics). Conclusion: Exposure to 3 GHz microwaves induced lymphopoesis, based on an increased lymphocyte count in the peripheral blood and a shift of lymphocytic population into the direction of less differentiated forms in the blood forming organs. (Effect found)	

Immunsystem					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Shao and Chiang 1989 EA Study quality: 1st tier	Kunming mice, infant (4-5 weeks), young (9-10 weeks), adult (over 16 weeks) Young mice Exposure groups 1-7: n=10 each, sham exposure groups 1-6: n=10 each Infant mice exposure group 8: n≥10, sham exposure group 7: n=10 Adult mice exposure group 9: n≥10, sham exposure group 8: n=10	Horn antenna, 3 GHz, PW (rate 933 Hz, width 1.2 µs) 17 conditions: 8 sham exposure groups and 9 exposure groups: group 1 (PD 1 mW/cm²), groups 2, 8, 9 (PD 5 mW/cm²), groups 3, 5, 6, 7 (PD 7 mW/cm²), group 4 (PD 12 mW/cm²) (measurement) Whole body exposure Exposure duration: 60 min/day for 2 days Remarks: animals were restrained	Immune reaction: immunization with sheep red blood cells (10 animals/group at 7, 8, 9 and 22 days after exposure; groups 1-4 and 8-9 only after 8 days)	An increase in immune reaction was observed 8 days after exposure at 5, 7 and 12 mW/cm². Day 8 after exposure at 7 mW/cm² was the day of maximum increase in immune reaction. Afterwards, the reaction declined and reached the level of sham exposure on day 22 after exposure. Infant mice did not show a reaction to exposure to 5 mW/cm² but young and adult mice showed an increase in immune reaction. Conclusion: Exposure stimulated immune functions in mice for short periods. The immune system of older mice was more susceptible. (Effect found)	

Immunsystem					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Szmigielski et al. 1975 EA Study quality: 3rd tier	Rabbits exposure group 1: n=5, exposure group 2: n=5, control group: n=5	Conical antenna, 3 GHz 3 conditions: control and 2 exposure groups (PD 3 mW/cm²): group 1 (6 h/day for 6 weeks), group 2 (6 h/day for 3 months) (no data provided on exposure validation) Whole body exposure Exposure duration: 6 h/day for 6 weeks or 3 months Remarks: after exposure, animals were infected with *Staphylococcus aureus*	Granulopoiesis (before, 4, 6, 10, and 14 days after infection): Leukocyte and granulocyte number in peripheral blood, bone marrow picture, reserve pool mobilization after staphylococcal alpha-toxin injection, lysozyme activity in blood serum, lysis of resuspended lyophylized *Micrococcus lysodeikticus* Body temperature, mortality, behavior	Exposed rabbits showed a decreased leukocytosis and granulocytosis 10 and 14 days after infection. These changes were accompanied by a decline in the bone marrow reserve pool and lysozyme activity during the entire observation period. Effects were in general more pronounced in rabbits exposed for 3 months compared to 6 weeks (no statistics for all results). Conclusion: Exposure to low level microwaves for several weeks might result in decreased production of mature granulocytes in the bone marrow. (Effect found)	
Szmigielski, Pulverer, et al. 1977 EA Study quality: 3rd tier	Tumor bearing CFW mice exposure group: n=36, sham exposure group: n=48	Exposure source not provided, 3 GHz 2 conditions: sham exposure and exposure (PD 40 mW/cm² ± 10%) (measurement) Whole body exposure Exposure duration: 2 h/day for 15 days	Tumor growth: tumor mass, number of regressed tumors, incorporation of ^{3}H-thymidine and ^{3}H-uridine	Exposure resulted in decreased tumor mass and a higher number of regressed tumors. This was accompanied by a reduced incorporation of ^{3}H-thymidine (no statistics). Conclusion: Microwave exposure led to an inhibition of tumor growth. (Effect found)	Groups (co-)exposed to EMF and Colcemide and/or Streptolysin S were not relevant for review and therefore not extracted

Immunsystem					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Szmigielski, Luczak, et al. 1977 EA Study quality: 3rd tier	NMRI mice <u>HSV-1 infected mice:</u> exposure groups 1-4: n=18-30 <u>Vaccinia infected mice:</u> exposure groups 5-12: n=? Control group 1 (HSV-1): n=32, control group 2 (vaccinia): n=?	Conical antenna, 3 GHz, CW 14 conditions: 2 control groups and 12 exposure groups (PD 40 mW/cm² ± 10%); different exposure durations starting at different days before/after infection (measurement) Whole body exposure Exposure duration: 2 hours/day for 5-15 days (up to 7 days before and up to 12 days after virus infection)	Mortality (in animals infected with HSV-1 virus) Number of pox tail lesions (in animals infected with vaccinia virus)	Hyperthermia through microwave exposure after HSV-1 infection resulted in a decrease of the mortality rate (HSV-1) and number of tail lesions (vaccinia). Conclusion: Microwave hyperthermia resulted in a marked inhibition of virus multiplication immediately after infection. Hyperthermia before infection or initiated several days after virus infection showed little or no effect. (Effect found)	*In vitro* experiments irrelevant for review and therefore not extracted Maybe temperatures > 42°C reached

Multiple Parameter & andere Themen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Bektas et al. 2023 EA Study quality: 2nd tier	Wistar Albino rats (healthy and diabetic (streptozotocin-induced)) exposure group 1: n=7 (healthy rats), exposure group 2: n=7 (diabetic rats) sham exposure group 1: n=7 (healthy rats), sham exposure group 2: n=7 (diabetic rats)	Antenna, 3.5 GHz 4 conditions: 2 sham exposure groups and 2 exposure groups (28.1 V/m, PD 1.6 W/m², SAR 37 mW/kg (whole-body)) (measurement, calculation/simulation) Exposure with head in direction of antenna Exposure duration: 2 h/day for 30 days Remarks: 7 rats were exposed in a carousel with the antenna placed in the center	Effect on biomechanics of bones: bone quality, flexibility, and durability; lateral cortex thickness, medulla width, medial cortex thickness Effect on skeletal muscle tissues: oxidative stress parameters (catalase activity, levels of reduced glutathione, malondialdehyde, ischemia-modified albumin)	Exposure had adverse effects on bone biomechanics (decreased Young's modulus, increased maximum displacement) in diabetic and healthy rats. Oxidative stress parameters were also altered by exposure. Conclusion: Exposure may have the potential to alter bone quality and structural integrity including muscle oxidative stress parameters in healthy and diabetic rats. (Effect found)	

Multiple Parameter & andere Themen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Cain and Rissmann 1978 EA, HCT Study quality: 3rd tier	cat, dog, chinchilla, healthy humans (male and female) <u>Cats</u> exposure group 1: n=1 (pre-experiment; alive and dead (as control)), exposure group 2: n=2 <u>Beagle dog</u> exposure group: n=1 <u>Chinchillas</u> exposure group: n=2 <u>Humans</u> exposure group: n=8	Horn antenna, 3.0 GHz, PW (rate 0.5 Hz, width 5, 10 or 15 µs) Several exposure conditions: combination of different peak power densities and pulse durations (no further details provided) (measurement, calculation/simulation) Head exposure Exposure duration: approx. 50 x 10 µs wide pulses (pre-experiment); approx. 100 x 5, 10 or 15 µs wide pulses each (main experiment) Remarks: <u>animals:</u> spinal axis parallel to the electric field; <u>humans:</u> faced away from the antenna	Effects on auditory system: determination of hearing threshold parameter (auditory evoked response) (audiometric testing (for humans); electrical recording via scalp electrodes (for non-human species) or implanted glass micropipettes (for the cats in the pre-experiment)	The energy density per pulse needed to evoke auditory responses in cats ranged from 8.7 µJ/cm² to 14 µJ/cm². Chinchilla thresholds ranged from 7.5 µJ/cm² to 20 µJ/cm². The average of the thresholds for the beagle dog was 5 µJ/cm². The average threshold which could be heard by human subjects was 10.6 µJ/cm² (3.4-17.5 µJ/cm²). However, 3 out of the 8 subjects could not hear pulses below 20 µs at maximum peak power settings. Conclusion: For the pulse widths investigated, the threshold energy density per pulse for the animals remained relatively constant as pulse width and peak power were varied. The inability of some of the human subjects to hear short microwave pulses was correlated with hearing losses above 8 kHz. (Effect found)	Additional experiments performed with acoustic stimuli (for comparison), but data not extracted for the current review

Multiple Parameter & andere Themen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
De Seze et al. 2020 EA Study quality: 2nd tier	Sprague Dawley rats 10 GHz Exposure group 1: n=61 (?) 3.7 GHz exposure group 2: n=12 (?; acute exposure), exposure group 3: n=12 (?; for avoidance test), exposure group 4: n=44 (?; repeated exposure) Sham exposure group: n=144 (?)	Horn antenna, 3.7 GHz and 10 GHz, PW (width 1-2.5 ns) 5 conditions: sham exposure and 4 exposure groups: group 1 (SAR 0.34 W/kg), group 2 (SAR 4.7 W/kg), group 3 (SAR 22 W/kg), group 4 (SAR 0.83 W/kg) (measurement, calculation/simulation) Whole body exposure Exposure duration: exposure group 1 (10 s every 5 min for 1 hour), exposure group 2 (2 x 8 min), exposure group 3 (14 min), exposure group 4 (2 x 8 min repeated with 10 min interval on 5 days/week for 8 weeks)	Cognitive and sensorimotor functions: beam-walking, rotarod, T-maze, open-field, avoidance test Brain inflammation: GFAP expression Anatomopathology: histopathology of several organs Life span	Rotarod performance was significantly enhanced after repeated exposure. Acute exposure induced an avoidance reflex. Brain inflammation was increased two days after acute exposure and seven days after 10 GHz exposure. The life span was 4 months shorter after repeated exposure and 11 animals exhibited a tumor (no statistics applied). Conclusion: High power microwaves can increase cancer prevalence and decrease survival time in rats. (Effect found)	
Kössler et al. 1981 EA Study quality: 1st tier	ICR mice Exposure group: n=12, sham exposure group: n=12	Horn antenna, 3.3 GHz 2 conditions: sham exposure and exposure (PD 2 mW/cm² (average)) (measurement) Whole body exposure Exposure duration: 6 h/day, 5 days/week for 12 weeks	Behavior: spontaneous activity (every 14 days of exposure) (wheel running test) Effects on blood parameters: differential blood count, erythrocyte and leukocyte level, blood sugar, hemoglobin (every 2 or 4 weeks); albumin and globulin level (after 12 weeks) Serum enzyme activities: aspartate aminotransferase, creatine phosphokinase (after 12 weeks) Body weight (every 2 or 4 weeks), rectal temperature (occasionally)	Only aspartate aminotransferase enzyme activity increased in exposed animals. Conclusion: The data did not indicate a specific microwave effect. (No effect found)	

Multiple Parameter & andere Themen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Moussa 2009 EA Study quality: 3rd tier	Swiss albino or Wister (Wistar?) albino rats (contradictory data) Exposure group 1-3: n=10, control group: n=10	Wave guide, 3.5 GHz or 10 GHz (contradictory data), modulated (no further data provided) 4 conditions: control group and 3 exposure groups (SAR 1.0 W/kg (whole body): group 1 (exposure for 4 weeks), group 2 (8 weeks), group 3 (8 weeks + 50 days post exposure observation) (measurement, calculation/simulation) Whole body exposure Exposure duration: 4 or 8 weeks	Effects on liver and kidney (levels of alanine aminotransferase (ALT), aspartate aminotransferase (AST), alkaline phosphatase (ALP), albumin, plasma creatinine, urea and total protein) Oxidative stress parameters (levels of malondialdehyde (MDA) and reduced glutathione (GSH)) Effects on hemoglobin (electrical conductivity and intrinsic viscosity)	All investigated liver enzymes and kidney parameters were increased compared with the control (according to table 1, only in the two 8 weeks-exposure groups, contradictory results). MDA was increased while glutathione concentration was decreased. The electrical conductivity and intrinsic viscosity of hemoglobin were increased. Conclusion: The exposure affected the oxidative state of the liver, kidney, and hemoglobin. (Effect found)	
Schrot and Hawkins 1974 EA Study quality: 1st tier	Wistar rats exposure group 1: n=7 to 13, exposure group 2: n=9 to 11, exposure group 3: n=10 to 13, exposure group 4: n=7 to 14	Ellipsoidal antenna, 3.0 GHz, CW 16 conditions: combinations of different power densities (0.35-2.6 W/cm²) x durations (30-240 s), (measurement, calibration) Head exposure Exposure duration: 30, 60, 120 and 240 s Remarks: animals were exposed individually with head facing the antenna and aligned with the longitudinal axis of the antenna	Mortality: determination of LD50 (lethal dose 50%)	At each exposure duration, the percentage of mortality increased with increasing power density. Increasing duration had the opposite effect on lethal power density, which decreased by 85% from 30 to 240 s duration. In addition, body weight was found to be a factor in determining mortality, with the heavier animals being more vulnerable to the effects of exposure. The authors found lethal power density to vary between 2.36 W/cm² and 0.42 W/cm² for exposure durations between 30 s and 240 s. No further conclusion available. (Effect found)	Probably, the animals were killed by heat. We have nevertheless included the article because LD50 is an internationally accepted parameter in toxicology. Most data are presented in W-min/cm² in the publication and were calculated as W/cm² by the review authors for better comparison.

Effekte auf die Augen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Appleton et al. 1975 EA Study quality: 3rd tier	New Zealand albino rabbits Exposure groups 1-7: n=3 each, exposure group 8: n=6, control group: n=3,	Dish antenna, 3.0 GHz, CW 9 conditions: control group and 8 exposure groups: group 1 (PD 100 mW/cm² for 15 min), group 2 (PD 100 mW/cm² for 30 min), group 3 (200 mW/cm² for 15 min), group 4 (200 mW/cm² for 30 min), group 5 (300 mW/cm² for 15 min), group 6 (300 mW/cm² for 30 min), group 7 (400 mW/cm² for 15 min), group 8 (500 mW/cm² for 15 min) (measurement, calculation/simulation) Exposure of left eye Exposure duration: 15 min and 30 min Remarks: animals anesthetized during exposure	Ocular changes: acute changes (hyperemia of lids and conjunctiva, miosis and anterior chamber flare, engorgement of iris vessels, periorbital cutaneous burn), long-term ocular changes (lens changes, cataract; examinations over a one-year period)	Acute changes were found in animals exposed to 300-500 mW/cm² for 15 min which were reversible after 24 h. All animals died during exposure to 300 mW/cm² for 30 min, and 3 of 6 animals immediately died after exposure to 500 mW/cm² for 15 min. Severe stress was observed in surviving animals (no statistics applied). Conclusion: Exposure up to 200 mW/cm² induced no effect and ≥ 300 mW/cm² induced reversible acute ocular effects. (Effect found)	

Effekte auf die Augen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Hirsch et al. 1977 EA Study quality: 2nd tier	New Zealand albino rabbits Exposure group 1-5: n=5 each, exposure group 6: n=10	Dish antenna, 3.0 GHz, CW 6 exposure conditions: group 1 (PD 50 mW/cm²), group 2 (100 mW/cm²), group 3 (200 mW/cm²), group 4 (300 mW/cm²), group 5 (400 mW/cm²), group 6 (500 mW/cm²) (measurement, calculation/simulation) Exposure of left eye Exposure duration: 15 min/day for 30 days Remarks: animals anesthetized during exposure; temperature probably > 42°C in strongest exposure groups	Corneal or lenticular abnormalities: morphological examination, histopathological findings (daily during exposure and intermittently for up to 1 year thereafter)	At and above 300 mW/cm², iritis, posterior subcapsular iridescence, and posterior cortical cataracts were found (no statistics). Conclusion: Exposure to microwaves ≥ 300 mW/cm² damaged the iris and produce cataract. This happened earlier at higher power levels. It appeared that the cataracts were produced by increased temperature levels. (Effect found)	

Effekte auf die Augen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Paulsson et al. 1979 EA Study quality: 3rd tier	Pigmented rabbits (black and white Dutch breed) exposure group 1: n=13 (?), exposure group 2: n=9 (?), exposure group 3: n=8 (?), exposure group 4: n=2 (?), control group: n=22 (?)	Horn antenna, 3.1 GHz, PW (width 1.4 µs and rate 300 Hz) 5 conditions: control group and 4 exposure groups (PD 550 W/m² (estimated mean) +/- 20% with pulse peak intensity of 1.3 x 10^6 W/m²): group 1 (exposure for 1 h/day, 3 d/week up to about 50 h), group 2 (1.5 h), group 3 (1 h followed by a drug inducing 70-100 % blood-pressure increase), group 4 (1 h, killed after 3.5 months) (measurement, calculation/simulation) Head exposure (retina) Exposure duration: 1 h, 1.5 h and 1 h/day, 3 days/week for about 50 h Remarks: not anesthetized, therefore probably restrained (not specified)	Ocular changes: retinal morphology, retinal histopathological changes Blood tissue barrier studies: blood-brain barrier changes, blood-retina barrier changes General observations: weight, appearance, motility, pupillary reflex, lens appearance	Electron microscopic examination showed distinct degenerative changes in the retina of the repeatedly exposed animals (exposure group 1) and mild changes in animals killed after 3.5 months (exposure group 4) (no statistics). Conclusion: Ultrastructural changes can occur in rabbit retina due to repeated pulsed 550 W/m² at 3.1 GHz. (Effect found)	

Fortpflanzung & Teratogenität					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Chiang and Yao 1987 EA Study quality: 3rd tier	Kunming mice (pregnant dams and offspring) <u>Pregnant mice</u> exposure group 1: n=? (subgroup of n=60) <u>Offspring</u> exposure group 2: n=? (half of the offspring of exposed dams), exposure group 3: n=? (half of the offspring of sham-exposed dams) <u>Sham exposure</u> group 1: n=? (subgroup of n=60 dams), group 2: n=? (half of the offspring of exposed dams), group 3: n=? (half of the offspring of sham-exposed dams)	No details provided on exposure source, 3.0 GHz, PW (rate 937 pps, width 1.2 µs) 6 conditions: 3 sham exposure and 3 exposure groups: group 1 (PD 8 mW/cm², SAR 3.0-3.5 mW/g), groups 2-3 (PD 1 mW/cm²) (measurement) Whole body exposure Exposure duration: 5 h/day during pregnancy and from day 3-20 after birth Remarks: pregnant mice exposed with their bodies parallel to the field; no core temperature rise in the mice after microwave exposure	Enzyme levels in the brain: mitochondrial marker enzyme activities (succinate dehydrogenase, catecholamine, monoamine oxidase levels) Enzyme levels in the liver (succinate dehydrogenase level) Body temperature	Succinate dehydrogenase levels in the hypothalamus and liver were reduced by either pre- or post-natal microwave exposure. The same pattern appeared with hypothalamic catecholamine and monoamine oxidase. Conclusion: The data indicated that low intensity microwave exposure can induce subtle alterations in enzyme activities/levels in offspring of mice. (Effect found)	Short Communication

Fortpflanzung & Teratogenität					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Varma and Traboulay 1975 EA Study quality: 3rd tier	Swiss mice Exposure group: number not specified, sham exposure group: n=8	3.0 GHz, continuous pulse (?) 2 conditions: sham exposure and exposure (PD 50 mW/cm²) (no data provided on exposure validation) Exposure of scrotum Exposure duration: 20 min Remarks: animals anesthetized	Testicular histology	Mild disintegration of nuclear material in lumens (no statistics). Conclusion: Exposure to the 3 GHz field showed only minimal injuries. (Effect found)	Data on exposure to 1.7 GHz was not relevant for review and therefore not extracted

Anhang 3: Extraktionstabelle der eingeschlossen Studien im FR2-Bereich

Thermoregulation					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Ijima, Kodera, et al. 2023 EA Study quality: 1st tier	Sprague-Dawley rats exposure group 1: n=11, exposure group 2: n=12, sham exposure group: n=8	Lens antenna (horn antenna and dielectric lens), 28.0 GHz, CW 3 conditions: sham exposure and 2 exposure groups: group 1 (APD 122 W/m², SAR 3.7 W/kg (whole body)), group 2 (APD 237 W/cm², SAR 7.2 W/kg (whole body)) (measurement, calculation/simulation) Whole body exposure/exposure of shorn dorsal side Exposure duration: 40 min Remarks: dorsal hair of rats shorn; rats restrained and exposed individually	Effects on thermoregulation (rectal temperature, dorsal and tail skin temperature, dorsal and tail skin blood flow)	Intensity-dependent temperature increases were observed in the dorsal skin, the rectum, and the tail skin. Skin blood flow was altered in the tail (but not in the dorsum), accompanied by an increase in rectal temperature and resulting in an increase in tail skin temperature. It was estimated that 4.6 W/kg and 38 W/kg of whole-body averaged SAR could induce 1°C and 5°C of rectal temperature increase, respectively. Conclusion: Exposure drove thermoregulation to transport and dissipate heat generated on the exposed body surface. The thermoregulatory systems can be activated due to rectal temperature changes. (Effect found)	

Thermoregulation					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Ijima, Li, et al. 2023 EA Study quality: 2nd tier	Sprague-Dawley rats, male Exposure groups 1-4: n=6 to 15 rats (subgroup of 55 animals), sham exposure group: n=6 to 15 rats (subgroup of 55 animals),	Patch antenna, 26.5 GHz, CW 5 conditions: sham exposure (0 W/cm²) and 4 exposure groups: group 1 (APD 125 W/cm²), group 2 (APD 250 W/cm²), group 3 (APD 370 W/cm²), group 4 (APD 500 W/cm²) (measurement, calculation/simulation) Exposure of dorsal skin Exposure duration: 18 min Remarks: dorsal hair of rats shorn; anaesthetized rats were restrained and exposed individually; abdomen placed on a heating pad (39.5°C)	Effects on thermoregulation (rectal and dorsal skin temperature; target site, 1 cm, and 2 cm away from target)	Dorsal skin temperature increased by approx. 11.3 ˚C at 500 W/m², but the rectal temperature increased by only 0.6˚C, indicating highly localized effects. A significant correlation was observed between APD and skin temperature rise. An increase in rectal temperature was observed only in the 370 W/m² and 500 W/m² exposure groups. A temperature rise of less than 5˚C (4.32°C) was estimated in the skin exposed to 200 W/m² of APD. Conclusion: The data suggest that the operational threshold for the millimeter wave exposure guidelines is valid under the present experimental conditions using rats. (Effect found)	

Multiple Parameter & andere Themen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Deich-mann et al. 1959 EA Study quality: 3rd tier	Albino Sprague-Dawley rats and mice (Swiss and C57) <u>Rats</u> n=2 to 11 (at least 24 different conditions) <u>Mice</u> n=10 (at least 5 different conditions) Probably further conditions tested but not transparently presented	Horn antenna, 24.0 GHz, PW (duty cycle 0.0006) <u>Rats</u> 12 whole-body conditions (PD 0.02 - 0.15 W/cm² and near-zone), head exposure (0.26 W/cm²), dorsal surface of the head (0.019 - 0.3 W/cm²), lumbar exposure (0.26 W/cm²), scrotal exposure (0.02 - 0.3 W/cm²), right side exposure (0.075, 0.08 W/cm²) <u>Mice</u> 5 whole-body conditions (0.037 - 0.17 W/cm²) (measurement, calculation/simulation) Exposure of whole body, head, or lumbar/abdominal/scrotal region (in dependence of the experiment) Exposure duration: single continuous exposure (rats up to 480 min (minimum), mice up to 282/140 min (mean/minimum)) Remarks: animals were anesthetized or restrained in Plexiglas cages and exposed individually	Local and systemic effects: rectal, subcutaneous, and internal organ temperatures; behavior; effects on skin (e.g., burns) and other organs (e.g., lung, muscle, liver, spleen, kidney, hemopoietic system (e.g., number of erythrocytes, leukocytes, and hemoglobin content)	5 min. of exposure (rat) to 0.02 W/cm² induced slight congestion of the lungs, a subcutaneous scrotal tissue temperature of 35°C, and a rise in temperature of 1°C at the dura of the frontal lobe of an intact skull. 7 h of exposure (rat) to 0.024 W/cm² caused a marked leukocytopenia and an increase in the number of erythrocytes. The severity of pathological changes decreased with decreasing power density. (Most data presented in descriptive manner in the text only without statistics) Conclusion: Acute exposure to microwave is capable of inducing marked local and systemic effects in rats and mice. (Effect found)	Data on infrared exposure, on exposure of chicks, on intermittent exposure (lack of comparison group) and on lethality/survival (temperature increase >42°C) not relevant for this review and therefore not extracted

Multiple Parameter & andere Themen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Deich-mann et al. 1964 EA Study quality: 3rd tier	CFN albino rats exposure group: n=10, sham exposure group: n=10	Horn antenna, 24.0 GHz, PW (duty cycle 0.0006) 2 conditions: sham exposure and exposure (PD 20 mW/cm²) (calculation/simulation) Whole body exposure Exposure duration: 10 min Remarks: animals restrained	Hemopoietic effects (numbers of erythrocytes, total leukocytes, polymorphonuclear leukocytes, lymphocytes)	Exposure induced a decrease in the leukocyte count. Conclusion: No matching conclusion for relevant extracted data. (Effect found)	Data of experiments lacking an adequate control group (experiments 1, 2 and 4 in the publication) were not extracted.

Fortpflanzung & Teratogenität					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Endpunkte**	**Ergebnisse/Outcome Schlussfolgerung der Autor*innen (Effektkategorisierung nach den Autor*innen)**	**Bemerkungen**
Gunn et al. 1961 EA Study quality: 3rd tier	Wistar rats exposure group: n=30, co-exposure group: n=30 control group: number not specified	Horn antenna, 24.0 GHz, PW (duty cycle 0.0006) 3 conditions: control group, exposure, and co-exposure group (+ hormone administration) (PD 0.250 W/cm²) (calculation/simulation) Exposure of scrotal area Exposure duration: 5 minutes Remarks: animals anesthetized	Pituitary-testis-prostate endocrine chain: Zn65 uptake in dorsolateral prostate, histopathology of prostate and testes Intratesticular temperature	Up to 13 days following the exposure, the prostate Zn65 uptake was decreased (statistically significant) and mild to moderate histological changes could be detected in the testes (no statistics). Administration of either chorionic gonadotrophin or testosterone restored the prostate Zn65 uptake to control level. Conclusion: Exposure resulted in mild testicular damage with decreased androgen levels, probably caused by insufficient luteinizing hormone output by the pituitary. (Effect found)	Exposure groups with exposures for 10 and 15 min were not relevant because of temperature increase >42 °C and therefore not extracted

Anhang 4: Tabelle zum Überblick der Evidenzsynthese

Anzahl an Studien; Anzahl der Tiere	Endpunkt	Wirkung oder keine Wirkung	Bewertung in Hinblick auf Grenzwerte	Initial confidence	Faktoren, welche das Vertrauen verringern	Faktoren, welche das Vertrauen erhöhen	Vertrauen in die Evidenz	Evidenzlevel für gesundheitliche Effekte und Zitation
2 (2nd tier), n=8, n=12(?)	Kognition	Wirkung	1x unterhalb, 1x oberhalb	Hoch	Risk of Bias, geringe Anzahl an Studien, Heterogenität		Sehr gering	Inadäquat (de Seze et al., 2020; Raslear et al., 1993)
2 (1st und 2nd tier), n=12(?), n=12	Verhalten	1x Wirkung (oberhalb), 1x keine Wirkung (unterhalb)	1x oberhalb, 1x unterhalb	Hoch	Geringe Anzahl an Studien, Heterogenität		Gering	Gering (de Seze et al., 2020; Kössler et al., 1981)
1 (2nd tier), n=7	Strukturelle Veränderungen im ZNS	Wirkung	unterhalb	Hoch	Nur eine Einzelstudie, kleine Gruppengröße, Risk of Bias		Sehr gering	Inadäquat (Bektas et al., 2022)
2 (alle 2nd tier), n=7, n=10	Hirnstoffwechsel, biochemische Änderungen	Wirkung	1x unterhalb, 1x ober- und unterhalb	Hoch	Risk of Bias, geringe Anzahl an Studien, Heterogenität		Sehr gering	Inadäquat (Bektas et al., 2022; Chiang et al., 1984)
1 (1st tier) n=10 oder >10	Antikörper-Produktion	Wirkung (nur oberhalb)	Exakt bei und oberhalb	Hoch	Nur eine Einzelstudie		Gering	Gering (Shao & Chiang, 1989)
2 (1st und 2nd),	Thermoregulation	Wirkung	Alle oberhalb	Hoch	Geringe Anzahl an Studien, keine unabhängige	Dosis-Wirkungs-Effekt	Moderat	Moderat

n=11-12, n=6-15					Bestätigung durch eine andere Arbeitsgruppe			(Ijima, Kodera, et al., 2023; Ijima, Li, et al., 2023)
1 (2nd tier), n=5-10	Wirkungen auf die Augen	Wirkung	Oberhalb	Hoch	Nur eine Einzelstudie, kleine Gruppengröße, Risk of Bias		Sehr gering	Inadäquat (Hirsch et al., 1977)
1 (2nd tier)	Mortalität (negative Wirkung)	Wirkung	Oberhalb	Hoch	Risk of Bias, nur eine Einzelstudie		Sehr gering	Inadäquat (de Seze et al., 2020)
1 (2nd tier), n= 2x7 Tiere	Knochen	Wirkung	Unterhalb	Hoch	Nur eine Einzelstudie, Imprecision, Risk of Bias		Sehr gering	Inadäquat (Bektas et al., 2023)
2 (2nd tier), jeweils n=7	Oxidativer Stress	Wirkung	Unterhalb	Hoch	Geringe Anzahl an Studien, Risk of Bias, Heterogenität, kleine Gruppengröße		Sehr gering	Inadäquat (Bektas et al., 2022, 2023)
1 (1st tier), n=12	Allgemeine Blutparameter	Keine Wirkung	Unterhalb	Hoch	Nur eine Einzelstudie		Gering	Inadäquat (Kössler et al., 1981)

Anhang 5: Grenzwerteinschätzung

Alle relevanten Studien enthalten ausschließlich, elektrische Feldstärke, SAR und/oder PD als Expositionsmetriken.

Relevante Grenzwerte:

SAR (whole body) = 0.08 W/kg, SAR (head/torso) = 2 W/kg (< 6GHz), SAR (limb) = 4 W/kg (< 6 GHz), Incident PD = 10 W/m² (whole body), Incident PD = 20 W/m² (local)

Als Grundlage dienen folgende Tabellen aus der ICNIRP 2020 Richtlinie:

Bestimmung mittels SAR

Table 2. Basic restrictions for electromagnetic field exposure from 100 kHz to 300 GHz, for averaging intervals ≥6 min.[a]

Exposure scenario	Frequency range	Whole-body average SAR (W kg^{-1})	Local Head/Torso SAR (W kg^{-1})	Local Limb SAR (W kg^{-1})	Local S_{ab} (W m^{-2})
Occupational	100 kHz to 6 GHz	0.4	10	20	NA
	>6 to 300 GHz	0.4	NA	NA	100
General public	100 kHz to 6 GHz	0.08	2	4	NA
	>6 to 300 GHz	0.08	NA	NA	20

[a]Note:

1. "NA" signifies "not applicable" and does not need to be taken into account when determining compliance.
2. Whole-body average SAR is to be averaged over 30 min.
3. Local SAR and S_{ab} exposures are to be averaged over 6 min.
4. Local SAR is to be averaged over a 10-g cubic mass.
5. Local S_{ab} is to be averaged over a square 4-cm^2 surface area of the body. Above 30 GHz, an additional constraint is imposed, such that exposure averaged over a square 1-cm^2 surface area of the body is restricted to two times that of the 4-cm^2 restriction.

Bestimmung mittels Power Density (whole body)

Table 5. Reference levels for exposure, averaged over 30 min and the whole body, to electromagnetic fields from 100 kHz to 300 GHz (unperturbed rms values).[a]

Exposure scenario	Frequency range	Incident E-field strength; E_{inc} (V m^{-1})	Incident H-field strength; H_{inc} (A m^{-1})	Incident power density; S_{inc} (W m^{-2})
Occupational	0.1 – 30 MHz	$660/f_M^{0.7}$	$4.9/f_M$	NA
	>30 – 400 MHz	61	0.16	10
	>400 – 2000 MHz	$3f_M^{0.5}$	$0.008f_M^{0.5}$	$f_M/40$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	50
General public	0.1 – 30 MHz	$300/f_M^{0.7}$	$2.2/f_M$	NA
	>30 – 400 MHz	27.7	0.073	2
	>400 – 2000 MHz	$1.375f_M^{0.5}$	$0.0037f_M^{0.5}$	$f_M/200$
	>2 – 300 GHz	NA	NA	10

[a]Note:

1. "NA" signifies "not applicable" and does not need to be taken into account when determining compliance.
2. f_M is frequency in MHz.
3. S_{inc}, E_{inc}, and H_{inc} are to be averaged over 30 min, over the whole-body space. Temporal and spatial averaging of each of E_{inc} and H_{inc} must be conducted by averaging over the relevant square values (see eqn 8 in Appendix A for details).
4. For frequencies of 100 kHz to 30 MHz, regardless of the far-field/near-field zone distinctions, compliance is demonstrated if neither E_{inc} or H_{inc} exceeds the above reference level values.
5. For frequencies of >30 MHz to 2 GHz: (a) within the far-field zone: compliance is demonstrated if either S_{inc}, E_{inc} or H_{inc}, does not exceed the above reference level values (only one is required); S_{eq} may be substituted for S_{inc}; (b) within the radiative near-field zone, compliance is demonstrated if either S_{inc}, or both E_{inc} and H_{inc}, does not exceed the above reference level values; and (c) within the reactive near-field zone: compliance is demonstrated if both E_{inc} and H_{inc} do not exceed the above reference level values; S_{inc} cannot be used to demonstrate compliance, and so basic restrictions must be assessed.
6. For frequencies of >2 GHz to 300 GHz (a) within the far-field zone: compliance is demonstrated if S_{inc} does not exceed the above reference level values; S_{eq} may be substituted for S_{inc}; (b) within the radiative near-field zone, compliance is demonstrated if S_{inc} does not exceed the above reference level values; and (c) within the reactive near-field zone, reference levels cannot be used to determine compliance, and so basic restrictions must be assessed.

Bestimmung mittels Power Density (Körperteil, lokal)

Table 6. Reference levels for local exposure, averaged over 6 min, to electromagnetic fields from 100 kHz to 300 GHz (unperturbed rms values).[a]

Exposure scenario	Frequency range	Incident E-field strength; E_{inc} (V m^{-1})	Incident H-field strength; H_{inc} (A m^{-1})	Incident power density; S_{inc} (W m^{-2})
Occupational	0.1 – 30 MHz	$1504/f_M^{0.7}$	$10.8/f_M$	NA
	>30 – 400 MHz	139	0.36	50
	>400 – 2000 MHz	$10.58f_M^{0.43}$	$0.0274f_M^{0.43}$	$0.29f_M^{0.86}$
	>2 – 6 GHz	NA	NA	200
	>6 – <300 GHz	NA	NA	$275/f_G^{0.177}$
	300 GHz	NA	NA	100
General public	0.1 – 30 MHz	$671/f_M^{0.7}$	$4.9/f_M$	NA
	>30 – 400 MHz	62	0.163	10
	>400 – 2000 MHz	$4.72f_M^{0.43}$	$0.0123f_M^{0.43}$	$0.058f_M^{0.86}$
	>2 – 6 GHz	NA	NA	40
	>6 – 300 GHz	NA	NA	$55/f_G^{0.177}$
	300 GHz	NA	NA	20

[a] Note:

1. "NA" signifies "not applicable" and does not need to be taken into account when determining compliance.
2. f_M is frequency in MHz; f_G is frequency in GHz.
3. S_{inc}, E_{inc}, and H_{inc} are to be averaged over 6 min, and where spatial averaging is specified in Notes 6–7, over the relevant projected body space. Temporal and spatial averaging of each of E_{inc} and H_{inc} must be conducted by averaging over the relevant square values (see eqn 8 in Appendix A for details).
4. For frequencies of 100 kHz to 30 MHz, regardless of the far-field/near-field zone distinctions, compliance is demonstrated if neither peak spatial E_{inc} or peak spatial H_{inc}, over the projected whole-body space, exceeds the above reference level values.
5. For frequencies of >30 MHz to 6 GHz: (a) within the far-field zone, compliance is demonstrated if one of peak spatial S_{inc}, E_{inc} or H_{inc}, over the projected whole-body space, does not exceed the above reference level values (only one is required); S_{eq} may be substituted for S_{inc}; (b) within the radiative near-field zone, compliance is demonstrated if either peak spatial S_{inc}, or both peak spatial E_{inc} and H_{inc}, over the projected whole-body space, does not exceed the above reference level values; and (c) within the reactive near-field zone: compliance is demonstrated if both E_{inc} and H_{inc} do not exceed the above reference level values; S_{inc} cannot be used to demonstrate compliance; for frequencies >2 GHz, reference levels cannot be used to determine compliance, and so basic restrictions must be assessed.
6. For frequencies of >6 GHz to 300 GHz: (a) within the far-field zone, compliance is demonstrated if S_{inc}, averaged over a square 4-cm^2 projected body surface space, does not exceed the above reference level values; S_{eq} may be substituted for S_{inc}; (b) within the radiative near-field zone, compliance is demonstrated if S_{inc}, averaged over a square 4-cm^2 projected body surface space, does not exceed the above reference level values; and (c) within the reactive near-field zone reference levels cannot be used to determine compliance, and so basic restrictions must be assessed.
7. For frequencies of >30 GHz to 300 GHz, exposure averaged over a square 1-cm^2 projected body surface space must not exceed twice that of the square 4-cm^2 restrictions.

Alle 1st- und 2nd-tier-Studien werden in folgende Gruppen im Vergleich in der Grenzwerten der ICNIRP eingeordnet:

1. Exposition oberhalb der Grenzwerte
2. Exposition unterhalb der Grenzwerte
3. Exposition ober- und unterhalb der Grenzwerte
4. Bezug zu Grenzwerten nicht bestimbbar, unklar oder widersprüchlich

Anmerkung: Die Absorptionsverteilung im Gewebe der Versuchstiere ist unter anderem aufgrund von unterschiedlicher Anatomie deutlich unterschiedlich zu jener im Menschen bei gleicher von außen einwirkender Feldstärke bzw. Leistungsflussdichte. Bei korrekten dosimetrischen Angaben seitens der Autor*innen ist daher davon auszugehen, dass bei Ausschöpfung der Grenzwerte die über das Gehirn gemittelte SAR und die maximale im Kortex des Gehirns auftretende SAR in den Versuchstieren größer war als dies im Menschen der Fall wäre.

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
Bektas et al. 2022, 48618 EA Study quality: 2nd tier	Wistar albino rats (healthy and with induced diabetes) Exposure group 1: healthy rats (n=7), exposure group 2: diabetes rats (n=7), sham exposure group 1: healthy rats (n=7), sham exposure group 2: diabetes rats (n=7)	GSM signal generator (antenna), 3.5 GHz (5G), PW (rate 217 Hz; GSM) 2 conditions: sham exposure and exposure (28.1 V/m, PD 1.6 W/m², SAR 37 mW/kg (whole-body), SAR 323 mW/kg and SAR 195 mW/kg (for 1 g and 10 g averaging, respectively (gray matter)) (measurement, calculation/simulation) Head exposure (1 cm distance to antenna) Exposure duration: 2 h/day, 5 days/week for 1 month (30 days) Remarks: 7 immobilized rats were simultaneously exposed in a plexiglass carousel with the antenna in the center	28.1 V/m PD 1.6 W/m² SAR 37 mW/kg (whole-body) SAR 323 mW/kg for 1 g gray matter) SAR 195 mW/kg (for 10g averaging gray matter)	28.1 V/m PD 1.6 W/m 0,037 W/kg 0,323 W/kg 0,195 W/kg	n.a. unterhalb unterhalb n.a. für 1 g unterhalb **Exposition unterhalb der Grenzwerte**

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
Chiang et al. 1984, 9262 EA Study quality: 2nd tier	C57BL mice Exposure group 1: n=10, exposure group 2: n=10, exposure group 3: n=10, exposure group 4: n=10, exposure group 5: n=? (additional experiment), exposure group 6: n=? (additional experiment) control group: n=? (additional experiment), sham exposure group: n=10	Radar, 3.0 GHz, PW (rate 935 pps, width 1.2 µs) 7 conditions: control group, sham exposure and 5 exposure conditions; group 1 (PD 0.1 mW/cm²), groups 2 and 6 (PD 0.5 mW/cm²), group 3 (PD 1 mW/cm²), group 4 (PD 5 mW/cm²), group 5 (PD 0.3 mW/cm²) (measurement) Whole body exposure Exposure duration: 3 h Remarks: animals exposed individually with their bodies parallel to the E-vector	Group 1: PD 0.1 mW/cm² Group 5: PD 0.3 mW/cm² Groups 2 and 6: PD 0.5 mW/cm² Group 3: PD 1 mW/cm Group 4: PD 5 mW/cm²	1 W/m² 3 W/m² 5 W/m² 10 W/m² 40 W/m²	Unterhalb Unterhalb Unterhalb Exakt Grenzwert Oberhalb **Exposition unterhalb und oberhalb der Grenzwerte**

ZNS, kognitive Funktionen und Verhalten					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
Raslear et al. 1993, 4308 EA Study quality: 2nd tier	Albino Sprague-Dawley rats Exposure group 1: n=8 (200 pulses; not clear if the same animals were used for all exposure conditions), exposure group 2: n=8 (200 pulses (-20 dB)), exposure group 3: n=8 (200 pulses (-30 dB)), exposure group 4: n=8 (200 pulses (-40 dB)), exposure group 5: n=8 (200 pulses (-50 dB)), cage control: n=8?, sham exposure group: n=8? (not clear if the same animals were used for exposure and sham exposure/cage control)	circular waveguide, 3.0 GHz, PW (width 80 ns, rate 0.125 pps) 7 conditions: sham exposure, cage control, 5 exposure groups (0, -20, -30, -40, -50 dB) (peak power 700 MW; SAR 0.072 W/kg (whole-body time-averaged), SARs in the brain ranged from 0.057-0.087 W/kg) (measurement, calculation/simulation) Whole body exposure Exposure duration: 200 pulses (during approx. 25 min) Environmental conditions: influence of co-exposure to X-rays and noise emitted by the exposure system was investigated Exposure remarks: 2 animals exposed simultaneously; animals restrained; SAR values for 24 body locations provided; antenna output was attenuated by wire screen of varying mesh densities	SAR 0.072 W/kg (whole-body time-averaged) SARs in the brain: Min. 0.057 W/kg Max. 0.087 W/kg	0.072 W/kg 0.057 W/kg 0.087 W/kg	Unterhalb (knapp) Unterhalb Unterhalb **Exposition unterhalb der Grenzwerte**

Immunsystem					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
Shao and Chiang 1989, 2335 EA Study quality: 1st tier	Kunming mice, infant (4-5 weeks), young (9-10 weeks), adult (over 16 weeks) Young mice Exposure groups 1-7: n=10 each, sham exposure groups 1-6: n=10 each Infant mice exposure group 8: n≥10, sham exposure group 7: n=10 Adult mice exposure group 9: n≥10, sham exposure group 8: n=10	Horn antenna, 3 GHz, PW (rate 933 Hz, width 1.2 µs) 17 conditions: 8 sham exposure groups and 9 exposure groups: group 1 (PD 1 mW/cm²), groups 2, 8, 9 (PD 5 mW/cm²), groups 3, 5, 6, 7 (PD 7 mW/cm²), group 4 (PD 12 mW/cm²) (measurement) Whole body exposure Exposure duration: 60 min/day for 2 days Remarks: animals were restrained	PD 1 mW/cm² PD 5 mW/cm² PD 7 mW/cm² PD 12 mW/cm²	10 W/m² 50 W/m² 70 W/m² 120 W/m²	Genau Grenzwert Oberhalb Oberhalb Oberhalb **Exposition exakt bei und oberhalb der Grenzwerte**

Multiple Parameter & andere Themen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
Bektas et al. 2023, 50559 EA Study quality: 2nd tier	Wistar Albino rats (healthy and diabetic (streptozotocin-induced)) exposure group 1: n=7 (healthy rats), exposure group 2: n=7 (diabetic rats) sham exposure group 1: n=7 (healthy rats), sham exposure group 2: n=7 (diabetic rats)	Antenna, 3.5 GHz 4 conditions: 2 sham exposure groups and 2 exposure groups (28.1 V/m, PD 1.6 W/m², SAR 37 mW/kg (whole-body)) (measurement, calculation/simulation) Exposure with head in direction of antenna Exposure duration: 2 h/day for 30 days Remarks: 7 rats were exposed in a carousel with the antenna placed in the center	28.1 V/m PD 1.6 W/m², SAR 37 mW/kg	PD 1.6 W/m², SAR 0.037 W/kg	unterhalb **Exposition unterhalb der Grenzwerte**

Multiple Parameter & andere Themen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
De Seze et al. 2020, 42216 EA Study quality: 2nd tier	Sprague Dawley rats 10 GHz Exposure group 1: n=61 (?) 3.7 GHz exposure group 2: n=12 (?; acute exposure), exposure group 3: n=12 (?; for avoidance test), exposure group 4: n=44 (?; repeated exposure) Sham exposure group: n=144 (?)	Horn antenna, 3.7 GHz and 10 GHz, PW (width 1-2.5 ns) 5 conditions: sham exposure and 4 exposure groups: group 1 (SAR 0.34 W/kg), group 2 (SAR 4.7 W/kg), group 3 (SAR 22 W/kg), group 4 (SAR 0.83 W/kg) (measurement, calculation/simulation) Whole body exposure Exposure duration: exposure group 1 (10 s every 5 min for 1 hour), exposure group 2 (2 x 8 min), exposure group 3 (14 min), exposure group 4 (2 x 8 min repeated with 10 min interval on 5 days/week for 8 weeks)	group 1: SAR 0.34 W/kg group 2: SAR 4.7 W/kg group 3: SAR 22 W/kg group 4: SAR 0.83 W/kg	SAR 0.34 W/kg SAR 4.7 W/kg SAR 22 W/kg SAR 0.83 W/kg	oberhalb oberhalb oberhalb oberhalb **Exposition oberhalb der Grenzwerte**
Kössler et al. 1981, 49443 EA Study quality: 1st tier	ICR mice Exposure group: n=12, sham exposure group: n=12	Horn antenna, 3.3 GHz 2 conditions: sham exposure and exposure (PD 2 mW/cm² (average)) (measurement) Whole body exposure Exposure duration: 6 h/day, 5 days/week for 12 weeks	PD 2 mW/cm² (average))	PD 2 mW/cm² (average)	unterhalb **Exposition unterhalb der Grenzwerte**

Multiple Parameter & andere Themen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
Schrot and Hawkins 1974, 49484 EA Study quality: 1st tier	Wistar rats exposure group 1: n=7 to 13, exposure group 2: n=9 to 11, exposure group 3: n=10 to 13, exposure group 4: n=7 to 14	Ellipsoidal antenna, 3.0 GHz, CW 16 conditions: combinations of different power densities (0.35-2.6 W/cm²) x durations (30-240 s), (measurement, calibration) Head exposure Exposure duration: 30, 60, 120 and 240 s Remarks: animals were exposed individually with head facing the antenna and aligned with the longitudinal axis of the antenna	0.35-2.6 W/cm²	3500-26,000 W/m²	oberhalb **Exposition oberhalb der Grenzwerte**

Effekte auf die Augen					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
Hirsch et al. 1977, 9021 EA Study quality: 2nd tier	New Zealand albino rabbits Exposure group 1-5: n=5 each, exposure group 6: n=10	Dish antenna, 3.0 GHz, CW 6 exposure conditions: group 1 (PD 50 mW/cm²), group 2 (100 mW/cm²), group 3 (200 mW/cm²), group 4 (300 mW/cm²), group 5 (400 mW/cm²), group 6 (500 mW/cm²) (measurement, calculation/simulation) Exposure of left eye Exposure duration: 15 min/day for 30 days Remarks: animals anesthetized during exposure; temperature probably > 42°C in strongest exposure groups	group 1: PD 50 mW/cm² group 2: 100 mW/cm² group 3: 200 mW/cm² group 4: 300 mW/cm² group 5: 400 mW/cm² group 6: 500 mW/cm²	group 1: 500 W/m² group 2: 1000 W/m² group 3: 2000 W/m² group 4: 3000 W/m² group 5: 4000 W/m² group 6: 5000 W/m²	oberhalb oberhalb oberhalb oberhalb oberhalb oberhalb **Exposition oberhalb der Grenzwerte**

Thermoregulation					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
Ijima, Kodera, et al. 2023, 51840 EA Study quality: 1st tier	Sprague-Dawley rats exposure group 1: n=11, exposure group 2: n=12, sham exposure group: n=8	Lens antenna (horn antenna and dielectric lens), 28.0 GHz, CW 3 conditions: sham exposure and 2 exposure groups: group 1 (APD 122 W/m², SAR 3.7 W/kg (whole body)), group 2 (APD 237 W/cm², SAR 7.2 W/kg (whole body)) (measurement, calculation/simulation) Whole body exposure/exposure of shorn dorsal side Exposure duration: 40 min Remarks: dorsal hair of rats shorn; rats restrained and exposed individually	group 1: APD 122 W/m², SAR 3.7 W/kg (whole body)) group 2 (APD 237 W/cm², SAR 7.2 W/kg (whole body))	group 1: APD 122 W/m², SAR 3.7 W/kg (whole body)) group 2 (APD 237 W/cm², SAR 7.2 W/kg (whole body))	oberhalb oberhalb **Exposition oberhalb der Grenzwerte**

Thermoregulation					
Autor*innen, femu ID, Studiendesign	**Studiendesign, Studiengruppen**	**Exposition (Bewertungsmethode)**	**Angabe laut Artikel**	**Umrechnung**	**Vergleich Grenzwerte**
Ijima, Li, et al. 2023, 51629 EA Study quality: 2nd tier	Sprague-Dawley rats, male Exposure groups 1-4: n=6 to 15 rats (subgroup of 55 animals), sham exposure group: n=6 to 15 rats (subgroup of 55 animals),	Patch antenna, 26.5 GHz, CW 5 conditions: sham exposure (0 W/cm²) and 4 exposure groups: group 1 (APD 125 W/cm²), group 2 (APD 250 W/cm²), group 3 (APD 370 W/cm²), group 4 (APD 500 W/cm²) (measurement, calculation/simulation) Exposure of dorsal skin Exposure duration: 18 min Remarks: dorsal hair of rats shorn; anaesthetized rats were restrained and exposed individually; abdomen placed on a heating pad (39.5°C)	group 1: APD 125 W/m² group 2: APD 250 W/m² group 3: APD 370 W/m² group 4: APD 500 W/m²	group 1: APD 125 W/m² group 2: APD 250 W/m² group 3: APD 370 W/m² group 4: APD 500 W/m²	oberhalb oberhalb oberhalb oberhalb **Exposition oberhalb der Grenzwerte**

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich recht herzlich bei denjenigen bedanken, die zum Erfolg meiner Dissertation beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter, Frau Univ.-Prof. Dr. med. Julia Krabbe, die mir die Möglichkeit gegeben hat, diese spannende Fragestellung unter Ihrer Leitung zu bearbeiten. Ich möchte mich für die hervorragende Betreuung während der gesamten Arbeit bedanken. Sie unterstützte mich durch viele konstruktive Gespräche, aus welchen ich wertvolle Ratschläge und Ideen mitnehmen konnte und ermutigte zur Vorstellung meiner Arbeit im Rahmen eines Nachwuchssymposiums.

Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Kraus und dem Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin an der Uniklinik Aachen für die Möglichkeit und Unterstützung, meine Promotion am *femu* durchzuführen.
Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Groß für die freundliche Übernahme des Vorsitzes.

Ebenfalls möchte ich mich herzlich beim gesamten Team des *femu* bedanken, das die Grundlagen dieses Projektes geschaffen und mich von Beginn an so herzlich aufgenommen hat. Für die offene und hilfsbereite Zusammenarbeit, den gemeinsamen Austausch und die Unterstützung bei allen Herausforderungen während meiner Arbeit am Projekt bin ich sehr dankbar.

Vielen Dank natürlich auch an meine Freunde, die mich bei jedem Schritt begleitet und unterstützt haben.

Bei meiner Familie möchte ich mich ganz besonders für die uneingeschränkte und vielseitige Unterstützung während meines gesamten Studiums bedanken. Ob im Rahmen meiner Doktorarbeit oder im Rahmen von Auslandsaufenthalten wurde mir alles ermöglicht. Ohne sie wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen.

Erklärung § 5 Abs. 1 zur Datenaufbewahrung

Hiermit erkläre ich, dass die dieser Dissertation zu Grunde liegenden Originaldaten im Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin des Universitätsklinikums Aachen hinterlegt sind.

Eidesstattliche Erklärung gemäß § 5 Abs. (1) und § 11 Abs. (3) 12. der Promotionsordnung

Hiermit erkläre ich, **Philine Johanna Scheelhaase** an Eides statt, dass ich folgende in der von mir selbstständig erstellten Dissertation „**Ein systematisches Review zu physiologischen und gesundheitlichen Wirkungen von 5G-relevanten hochfrequenten elektromagnetischen Feldern – Teilanalyse der Studien zu 3–4 und 20–30 GHz auf Säugetiere**“ dargestellten Ergebnisse erhoben habe. Bei der Durchführung der Arbeit hatte ich folgende Hilfestellungen, die in der Danksagung angegeben sind:

	Doktorandin	Doktor mutter und direkte Betreue rin	IASU*	IASU*	IASU*	IASU*	IASU*	Summe (%)
	Philine Johanna Scheelhaase	Univ.-Prof. Dr. med. Julia Krabbe	Dr. rer. medic. Lambert Bodewein	Dr. rer. nat. Sarah Drießen	Dipl.-Biol. Dagmar Dechent, M.Sc.	Tanja Emonds, B.Sc.	David Gräfrath	
Studienüberwachung	-	-	50	50	-	-	-	100
Studiendesign/Konzeption	20	-	20	60	-	-	-	100
Suche	45	-	45	5	-	-	5	100
Titel-/Abstract-Screening	60	-	20	5	10	5	-	100
Volltextscreening mit Datenextraktion	60	-	20	5	10	5	-	100
Bewertung der Studienqualität	80	-	10	5	5	-	-	100
Datenauswertung	90	5	5	-	-	-	-	100
Interpretation der Datenauswertung	90	5	5	-	-	-	-	100
Verfassung der Dissertation	100	-	-	-	-	-	-	100
Korrektur der Dissertation	-	90	10	-	-	-	-	100

*IASU – Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Philine Johanna Scheelhaase
Geburtsdatum	02.12.1999
Geburtsort	Hannover
Staatsangehörigkeit	Deutsch

Ausbildungsweg

12/2025	3. Staatsexamen (sehr gut) Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
10/2024	2. Staatsexamen (gut) Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
11/2022	Beginn der Promotion am Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin
09/2021	1. Staatsexamen (Ärztliche Basisprüfung, gut) Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
10/2018	Aufnahme des Studiums der Humanmedizin Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
07/2017	Allgemeine Hochschulreife Andreas-Vesalius Gymnasium Wesel

Auszeichnungen

12/2024	1. Preis – 26. Symposium „Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft Für Nachwuchswissenschaftler“ der DGAUM und GfA Forum Arbeitsphysiologie & Lieselotte und Dr. Karl Otto Winkler Stiftung