Von 4G zu 5G

Was sich technisch verändert — und was biologisch relevant sein könnte

RAUM 1 — Bürger & Familien

Neue Sendemasten · Was ändert sich für mich · Eigenbeobachtung · Einfache Schritte

Warum steht plötzlich eine neue Antenne auf dem Nachbardach?

Vielleicht haben Sie es selbst erlebt: Ein neuer, kleiner Kasten taucht an der Straßenlaterne auf. Oder der Mobilfunkmast in der Nähe wird umgerüstet, und plötzlich ist im Prospekt von „5G“ die Rede. Die naheliegende Frage lautet dann: Verändert sich dadurch etwas für meine Gesundheit — und wenn ja, was genau?

Das ist eine berechtigte Frage. 5G ist nicht einfach „mehr vom Gleichen“ wie beim Wechsel der Generationen davor. Es verändert gleich mehrere Dinge auf einmal — wo die Antennen stehen, wie gezielt sie senden, und bei manchen Ausbaustufen auch, in welchem Frequenzbereich sie arbeiten.

Was verändert sich für mich im Alltag?

Stellen Sie sich den alten Mobilfunk wie eine Lampe vor, die ihr Licht gleichmäßig in den ganzen Raum abstrahlt. 5G funktioniert eher wie ein Scheinwerfer, der sein Licht gezielt in Ihre Richtung bündelt, sobald Sie Ihr Handy nutzen. Für Menschen in Ihrer Umgebung, die selbst gar nicht telefonieren, heißt das: Mehr solcher „Scheinwerfer“ sind gleichzeitig unterwegs.

Weil die neuesten, sehr hohen 5G-Frequenzen kaum durch Wände oder Bäume dringen, braucht es für eine gute Versorgung mehr, aber kleinere und schwächere Sendestationen in Wohnnähe — statt weniger, dafür großer Masten. Diese besonders hohen Frequenzen dringen zudem nur ganz oberflächlich in den Körper ein, ähnlich wie Sonnenlicht auf der Haut, nicht tief ins Körperinnere. Was das für den Körper auf lange Sicht bedeutet, wird noch erforscht — genau deshalb lohnt sich Aufmerksamkeit.

Mobilfunkstrahlung ist nicht gesundheitsförderlich, sondern eine biologische Belastung für den Organismus.

Vorsorge im Alltag

- Handy und Router nachts aus dem Schlafzimmer verbannen oder in den Flugmodus versetzen
- Beim Telefonieren Abstand schaffen: Lautsprecher (kostenlos) oder Luftschlauch-Headset (ab etwa 10 Euro, Stand Oktober 2026) nutzen, kein Kupferkabel am Ohr, und das Handy weit vom Körper entfernt halten.

- Dauernutzung von Funk konsequent vermeiden: Geräte nach Möglichkeit per Kabel betreiben (LAN statt WLAN), Funk nur bei Bedarf einschalten und sonst ausschalten
- Bei Neuanschaffung von Routern oder Geräten auf reduzierte Sendeleistung bzw. Eco-Modus achten
- Im Alltag Abstand zu Sendeanlagen halten, wo es möglich ist

Was verändert sich bei Ihnen?

Manche Menschen berichten nach der Umstellung auf 5G in ihrer Umgebung von neuen oder veränderten Beschwerden — Schlafstörungen, Kopfdruck, innere Unruhe. Andere merken nichts. Diese Beobachtungen sind kein Beweis für einen Zusammenhang, aber sie sind auch kein Zufall, den man ignorieren sollte. Wenn Sie selbst eine Veränderung wahrnehmen: Notieren Sie sich, wann sie auftritt, wie lange sie anhält und ob sie mit Ihrem WLAN- oder Mobilfunkverhalten zusammenhängt. Diese Selbstbeobachtung ist der erste, einfachste Schritt — und ein guter Ausgangspunkt für ein Gespräch mit Ihrer Ärztin oder Ihrem Arzt.

→ Ärztinnen und Ärzte finden im nächsten Abschnitt Beamforming, Millimeterwellen, ein Anamnese-Werkzeug und Gesprächsformulierungen.

RAUM 2 — Ärzte & Therapeuten

Beamforming · Millimeterwellen · Hautexposition · Anamnese-Werkzeug

Warum der 4G-zu-5G-Übergang heute medizinisch nicht mehr ignoriert werden kann

Die EUROPAEM-EMF-Leitlinie 2016 stellt fest, dass neue drahtlose Technologien wiederholt ohne belegte Kenntnis ihrer Gesundheitswirkung eingeführt wurden, bevor überhaupt hochwertige Langzeitdaten vorlagen [1]. Beim Übergang zu 5G wiederholt sich dieses Muster: Beamforming, Netzverdichtung und Millimeterwellen verändern die Expositionsrealität von Patienten strukturell, während belastbare Langzeitstudien zu genau diesen neuen Signalmustern noch fehlen. Ein Patient, der über neue Beschwerden nach einer 5G-Umstellung in seiner Umgebung berichtet, reagiert damit möglicherweise auf eine reale, messbare Veränderung seiner HF-Exposition — nicht auf ein rein subjektives Phänomen.

Was verändert sich technisch — und warum ist das für die Praxis relevant?

Mechanismen-Übersicht

Die drei zentralen Veränderungsachsen betreffen (1) die räumliche Signalführung (Beamforming statt gleichmäßiger Rundstrahlung), (2) die Netzdichte (Kleinzellen statt großer Funkzellen) und (3) bei bestimmten Ausbaustufen den Frequenzbereich selbst (Millimeterwellen oberhalb 24 GHz mit stark reduzierter Eindringtiefe).

Beamforming: Wer profitiert, wer trägt die Zusatzlast?

5G-Basisstationen mit Massive-MIMO-Antennen senden nicht mehr gleichmäßig in alle Richtungen, sondern bilden gezielte, schmale Strahlenbündel zum jeweiligen Endgerät. Messungen an zehn deutschen 5G-Basisstationen im 3,6-GHz-Band zeigten: Im Median war die maximal mögliche Feldstärke 4,3-fach (rund 13 dB) höher als in einer Vergleichsstudie von 2013 an LTE-Stationen; die höchsten Werte traten, anders als bei 4G-Stationen mit festem Abstrahlmuster, bei höheren Elevationswinkeln auf [8]. ◯ Für den aktiven Nutzer sinkt die Downlink-Exposition durch die gezielte Bündelung häufig; für Personen im Umfeld, die selbst kein 5G-Gerät nutzen, steigt die Hintergrundexposition durch dieselbe Technik an [11]. ◯

Netzverdichtung: Näher am Menschen, aber schwächer im Einzelsignal?

Weil höherfrequente 5G-Signale schlechter durch Hindernisse dringen, erfordert der Netzausbau eine deutlich höhere Stationsdichte — sogenannte Small Cells, oft in Wohnnähe montiert. Modellrechnungen zeigen: Die Verdichtung senkt die Gesamtexposition aktiver Nutzer um den Faktor 2 bis 10, erhöht aber gleichzeitig die Hintergrundexposition von Nicht-Nutzern um etwa Faktor 1,6, da mehr Sendequellen gleichzeitig in Reichweite sind [11]. ◯ Für die Praxis bedeutet das: Die Aussage „5G-Stationen senden schwächer, also ist die Belastung geringer“ ist unvollständig — die Zahl der gleichzeitig wirksamen Quellen verändert sich mit, und genau diese kumulative Dauerexposition ist der Ansatzpunkt der EUROPAEM-Vorsorgewerte, die deutlich unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte liegen [1].

Millimeterwellen: Oberflächenexposition mit systemischer Wirkung?

Bei höheren 5G-Ausbaustufen (ab etwa 24 GHz) verändert sich die Eindringtiefe fundamental: Menschliche Haut wirkt bei diesen Frequenzen wie ein Sub-Terahertz-Empfänger, dessen Schweißdrüsenkanäle als helikale Antennenstrukturen fungieren und die Absorption der Energie in den obersten Hautschichten konzentrieren [7]. ◯ Ob diese oberflächliche Absorption Fernwirkungen auslösen kann, untersucht eine Tierstudie zu 27,5-GHz-Exposition: Sie dokumentierte ohne sichtbare Gewebeschäden signifikante Veränderungen der Genexpression entzündungsbezogener Marker sowie eine Degranulation von Mastzellen in der Haut [4]. ◯ Panagopoulos und Kollegen beschreiben, wie polarisierte, kohärente HF-Felder über spannungsgesteuerte Ionenkanäle oxidativen Stress und DNA-Schäden auslösen — ein Mechanismus, der grundsätzlich auch für die Pulsationsmuster von 5G-Signalen gilt [13]. Eine Untersuchung an menschlichen Hautzellen unter Laborbedingungen fand demgegenüber keine über Zufallsschwankungen hinausgehenden Effekte auf Genexpression oder DNA-Methylierung [5] ◯ — dieser negative Befund entkräftet die oben genannten positiven Befunde nicht, sondern zeigt, dass Zelltyp, Spezies und Expositionsprotokoll für das Ergebnis entscheidend sind.

Der zugrunde liegende Wirkmechanismus über spannungsgesteuerte Calciumkanäle (VGCC) und die Rolle gepulster, stark modulierter Signale werden in Artikel 10 ausführlich behandelt [12, 13].

Welche Patientengruppen benötigen besondere Aufmerksamkeit?

Klinisch relevant sind vor allem drei Gruppen: Personen, die in unmittelbarer Nähe neu installierter Kleinzellen wohnen oder arbeiten und über neu aufgetretene Beschwerden berichten; Personen mit vorbestehender elektromagnetischer Hypersensibilität (EHS), die gemäß EUROPAEM-Leitlinie als Teil der chronischen Multisystemerkrankungen einzuordnen ist und bei denen ein verändertes Frequenz- und Pulsationsmuster eine

veränderte Reizantwort auslösen kann [1]; sowie Kinder und Jugendliche, deren Expositionsdauer über die Lebensspanne länger sein wird als bei heute Erwachsenen. Für sie gilt: den Einstieg ins eigene Handy so spät wie möglich wählen, jedes Jahr zählt (mehr dazu in Artikel 16).

Formulierungsvorschläge für die Praxis

Ein Patient berichtet von Beschwerden seit der 5G-Umstellung in seiner Umgebung.

„Seit der Umstellung schlafen Sie schlechter. Das nehme ich ernst."

„Ihr Körper zeigt uns damit etwas. Das schauen wir uns gemeinsam an."

„Welche Funkquellen im Schlafzimmer können Sie für zwei bis vier Wochen abstellen?"

Was leistet Expositionskarenz als diagnostisches Werkzeug?

Anders als bei natürlichen Feldern lässt sich Mobilfunkexposition durch aktive Karenz gezielt reduzieren — das macht sie zu einem nutzbaren diagnostischen Instrument. Die EUROPAEM-Leitlinie empfiehlt als primären Therapieansatz die Reduktion oder Elimination hoher EMF-Expositionsquellen zu Hause und am Arbeitsplatz, um dem Körper eine Erholung der oxidativen und nitrosativen Regulationskapazität zu ermöglichen [1]. Eine zeitlich begrenzte, konsequente Reduktion (WLAN, Mobiltelefon, DECT nachts aus) über zwei bis vier Wochen kann im Rahmen der Anamnese helfen, einen Zusammenhang zwischen Symptomatik und HF-Exposition sichtbar zu machen, ohne dass dafür Abschirmmaterialien oder bauliche Maßnahmen nötig wären.

Ärztliches Fazit

Der Übergang von 4G zu 5G ist keine bloße Geschwindigkeitssteigerung, sondern eine strukturelle Veränderung der Expositionsmuster — in Signalführung, Netzdichte und teilweise auch Frequenzbereich. Diese Veränderung zeigen Feldmessungen und Modellrechnungen [8, 11]. Ein fehlender Warnhinweis in behördlichen Bewertungen ist kein Sicherheitsnachweis; er spiegelt vor allem eine methodisch enge, ausschließlich thermische Grenzwertlogik wider, die von der EUROPAEM-Leitlinie ausdrücklich als unzureichend kritisiert wird [1, 10].

Empfehlung: Bei Patienten mit neu aufgetretenen, unklaren Beschwerden nach lokaler 5G-Umstellung ist eine strukturierte Expositionsanamnese sinnvoll, ergänzt durch eine zeitlich befristete Karenzphase als diagnostisches Mittel. Eine pauschale Entwarnung unterhalb der thermischen Grenzwerte ist wissenschaftlich nicht gerechtfertigt; eine vorsorgliche Reduktion vermeidbarer Exposition — insbesondere nachts und am Kopf — bleibt rational begründbar und deckt sich mit den EUROPAEM-Vorsorgewerten, unabhängig vom individuellen Ausgang der Diagnostik.

→ *Die Messdaten, Zellstudien und methodischen Grenzen finden Sie im folgenden Abschnitt.*

RAUM 3 — Wissenschaft & Fachkreise

Millimeterwellen · Beamforming-Messdaten · Methodische Grenzen · EUROPAEM-Einordnung

Was zeigen die Messdaten zur realen Exposition durch Beamforming?

Feldmessung an kommerziellen 5G-Basisstationen (3,6 GHz): Das vom Bundesamt für Strahlenschutz beauftragte Projekt von TU Ilmenau, RWTH Aachen und EM-Institut maß an zehn deutschen 5G-Massive-MIMO-Basisstationen mit je zehn Messpunkten. Beamforming verändert das Expositionsmuster gegenüber 4G: Anders als bei 4G-Stationen mit festem Abstrahlmuster traten die höchsten Werte bei höheren Elevationswinkeln auf. Im Median lag die maximal mögliche Feldstärke 4,3-fach (rund 13 dB) über der einer Vergleichsstudie von 2013 an LTE-Stationen [8].

Modellrechnung zur Gesamtexposition in 5G-Netzen (BAFU): Rechenmodelle zeigen: Die Verkleinerung der Funkzellen senkt die Exposition aktiver Nutzer um Faktor 2 bis 10, während die Hintergrundexposition von Nicht-Nutzern durch die höhere Stationsdichte um etwa Faktor 1,6 ansteigt [11].

Was zeigen Zellstudien zu Millimeterwellen an der Haut?

Mausstudie zu 27,5-GHz-Exposition und Hautentzündung (2025): Whole-body-Exposition von Mäusen gegenüber 27,5 GHz führt zu signifikanter Veränderung entzündungsbezogener Genexpression, Mastzell-Degranulation und reduziertem kutanem Glutamatspiegel, ohne histologisch sichtbare Gewebeschäden [4].

Humane Hautzellstudie, BfS-finanziertes Projekt (Constructor University Bremen): Untersuchungen an menschlichen Hautzellen bei verschiedenen Frequenzen und Leistungsflussdichten bis 10 mW/cm² finden keine über Zufallsschwankungen hinausgehenden Effekte auf Genexpression oder DNA-Methylierung [5]. Dieser negative Befund widerlegt die oben genannten Mausbefunde nicht — Spezies, Zelltyp und Expositionsprotokoll unterscheiden sich deutlich.

Haut als Sub-THz-Antennenstruktur (Betzalel, Ben Ishai, Feldman): Die Arbeit beschreibt, dass die Struktur der Schweißdrüsenkanäle in der menschlichen Haut bei Frequenzen im Sub-Terahertz-Bereich wie eine helikale Antenne wirkt und lokal die Absorption einfallender Millimeterwellenenergie verstärkt [7].

Ionenkanal-Mechanismus (Panagopoulos et al.): Der Ion-Forced-Oscillation-Mechanismus (Kräfte auf die Spannungssensoren von Ionenkanälen, oxidativer Stress, DNA-Schäden) und die Rolle gepulster Signale werden in Artikel 10 dargestellt und dort bewertet [12, 13].

Wie ordnen Reviews und die EUROPAEM-Leitlinie den Wissensstand ein?

EUROPAEM EMF Guideline 2016 (Belyaev, Dean, Eger, Kern et al.): Die Leitlinie dokumentiert, dass neue drahtlose Technologien wiederholt ohne belegte Kenntnis ihrer Gesundheitswirkung eingeführt wurden, und benennt eine starke Evidenzlage für Langzeitrisiken bestimmter EMF-Expositionen, darunter bestimmte Krebsarten, Alzheimer-Erkrankung und männliche Infertilität. Sie empfiehlt deutlich unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte liegende Vorsorgewerte [1].

Hardell & Nyberg, 5G-Appell und Fallstudien (2023): Die Autoren dokumentieren erste Fallberichte von Personen, die nach Installation von 5G-Sendern in ihrer Wohnumgebung neu aufgetretene Beschwerden entwickelten, und ordnen diese in den Kontext der bereits durch die Hardell-Gruppe belegten Kanzerogenität von Hochfrequenzstrahlung ein [2].

Review von Simkó & Mattsson (2019): Der Review wertete 94 Studien zu Frequenzen von 6 bis 100 GHz aus: 80 % der In-vivo- und 58 % der In-vitro-Studien zeigten Reaktionen auf die Exposition. Nach Einschätzung der Autoren liefern die verfügbaren Studien keine ausreichende Grundlage für eine Sicherheitsbewertung [6].

State-of-Science-Review (Karipidis, Mate, Urban, Tinker, Wood, 2021): Der Review kommt zu dem Schluss, dass die verfügbaren Studien zu Frequenzen oberhalb 6 GHz in Zahl und methodischer Einheitlichkeit begrenzt sind und dass für reale 5G-Expositionsszenarien mit Beamforming und Pulsation bislang keine spezifischen epidemiologischen Langzeitdaten existieren [3]. Ken Karipidis, Erstautor dieses Reviews, gehört der ICNIRP-Kommission seit Mai 2020 an (siehe Artikel 5 und 26).

Spielt die Pulsung selbst eine eigene Rolle?

Es wird diskutiert, ob technische Impulsfolgen biologisch anders wirken als gleichförmige Felder gleicher mittlerer Leistung. Eine naheliegende, noch ungeprüfte Überlegung lautet: Das Leben hat sich über sehr lange Zeiträume an natürliche Felder angepasst, an die regelmäßigen Pulsfolgen technischer Signale aber nicht. Impulse gibt es auch in der Natur, etwa bei Blitzen. Nach Panagopoulos und Kollegen unterscheiden sich technische Signale unter anderem durch Polarisation, Kohärenz und niederfrequente Pulskomponenten [13]. Das ist eine Hypothese, kein Befund. Den Wirkweg über spannungsgesteuerte Ionenkanäle bewertet Artikel 10.

Direkte Vergleiche von Dauerstrich und Pulsung: In einer Humanstudie veränderte eine pulsmodulierte 900-MHz-Exposition die Hirndurchblutung sowie das Wach- und Schlaf-EEG, während dieselbe Exposition ohne Pulsmodulation das EEG nicht veränderte [14]; die Einordnung steht in Artikel 13. In einer Zellstudie an humanen Hautfibroblasten (1,6 GHz, 0,4 W/kg, zwei Stunden) wurden bei Dauerstrich und bei Pulsung keine DNA-Doppelstrangbrüche und keine Zunahme von Mikrokernen gefunden. Beide Bedingungen veränderten jedoch Zytoskelett und Lysosomen, Hitzeschockproteine verhielten sich unterschiedlich, Autophagosomen traten nur nach Pulsung auf, und die Zahl multipolarer Spindeln stieg nach Pulsung signifikant an. Die Temperatur stieg in beiden Bedingungen um höchstens 0,35 °C [15]. Die Studie wurde vom italienischen Verteidigungsministerium im Rahmen eines EDA-Projekts gefördert. Dieselbe Arbeitsgruppe fand 2020 bei 2,45 GHz in den untersuchten genotoxischen und zytotoxischen Parametern keine signifikanten Unterschiede zwischen Dauerstrich und Pulsung [16].

Beide Zellstudien stammen aus derselben Arbeitsgruppe, untersuchten kurze Expositionen an Zellkulturen und enthalten keinen klinischen Endpunkt. Aus ihnen folgt weder, dass gepulste Felder grundsätzlich biologisch aktiver sind als Dauerstrich, noch das Gegenteil. Sie sprechen dafür, die Pulsung als eigenes Expositionsmerkmal zu behandeln und nicht nur die mittlere SAR anzugeben: Pulsdauer, Wiederholrate, Tastverhältnis und Spitzenwerte gehören in jede Studienbeschreibung.

Welche methodischen Grenzen begrenzen die Aussagekraft?

Die aktuelle Studienlage zu 5G-spezifischen Frequenzen — insbesondere oberhalb 24 GHz — weist mehrere strukturelle Lücken auf: Es liegen bislang keine veröffentlichten epidemiologischen Langzeitstudien zu realen 5G-New-Radio-Signalen mit Beamforming vor, da diese Technologie erst seit wenigen Jahren im Feldeinsatz ist

[3]. ○ Die Frage der Studienfinanzierung ist auch hier als methodischer Faktor zu benennen, nicht als automatischer Beweis für Verzerrung: Eine ausführliche Einordnung dieses Zusammenhangs findet sich in Artikel 28. Die grundsätzliche Frage, warum Einzelstudien zu ähnlichen Expositionsbedingungen unterschiedliche Ergebnisse liefern, wird in Artikel 7 vertieft behandelt.

Zu betonen ist: Der negative Befund der humanen Hautzellstudie [5] widerlegt die positiven Befunde der Mausstudie [4] und die in Artikel 10 dargestellten Ionenkanal-Befunde nicht automatisch — beide Befundtypen können bei unterschiedlichem biologischem Material oder Expositionsregime gleichzeitig zutreffen. Die umgekehrte Aussage gilt hier ausdrücklich nicht symmetrisch: Wo ein Wirkmechanismus wie die VGIC-Dysfunktion in mehreren unabhängigen Arbeiten reproduziert wurde (Artikel 10), hebt eine einzelne Nullstudie diesen Befund nicht auf.

Wie ordnen Behörden und Fachgremien die Lage ein — und wo liegt der methodische Kern der Kritik?

Das IEEE-Gremium COMAR stellt fest, dass Millimeterwellen aufgrund ihrer geringen Eindringtiefe innere Organe nicht direkt exponieren, räumt aber ein, dass die Forschungslage zu biologischen Effekten von Millimeterwellen deutlich schmaler ist als zu niedrigeren Frequenzen [9]. Eine kritische Analyse der ICNIRP-Expositionsbewertungsmethodik für 5G-Millimeterwellen zeigt, dass die ausschließliche Oberflächenbewertung der Exposition thermische Schäden an Haut und Hornhaut nicht ausreichend erfasst [10]. Die EUROPAEM-Leitlinie geht in ihrer Kritik weiter: Sie ordnet die ICNIRP-Grenzwerte als reine Akutschutz-Werte gegen thermische Effekte ein, die nichtthermische, kumulative Langzeitwirkungen methodisch gar nicht erfassen können [1]. Eine ausführliche Einordnung institutioneller Verflechtungen bei ICNIRP findet sich in Artikel 26. Diese regulatorische Einordnung dient hier der Darstellung der Kommunikationslage, nicht als eigenständiger Wirkungsnachweis.

Zusammengefasst gilt für die Ausgangsfrage: Kein Nachweis einer Schädigung durch die neuen 5G-Expositionsmuster bedeutet nicht, dass deren Sicherheit belegt wäre. Für Beamforming und Netzverdichtung liegen Messdaten und Modellrechnungen zu veränderten Expositionsmustern vor [8, 11]; für die biologische Langzeitwirkung von Millimeterwellen und gepulsten 5G-Signalen beschreibt der in Artikel 10 behandelte Ionenkanal-Mechanismus einen biophysikalisch beschriebenen Wirkpfad [13], dessen klinische Langzeitrelevanz für die neuen 5G-Frequenzbereiche jedoch noch nicht durch epidemiologische Studien belegt ist.

Wissensstandsmarker

- ○ **Hinweise vorhanden** — Erste Beobachtungen liegen vor. Noch keine unabhängige Bestätigung.
- ◉ **Unabhängig bestätigt** — Mehrere Forschungsgruppen kommen zu vergleichbaren Ergebnissen.
- ● **Biophysikalisch belegt** — Wirkmechanismus reproduzierbar nachgewiesen und beschrieben.

#	Quelle
1	Belyaev I, Dean A, Eger H, Hubmann G, Jandrisovits R, Kern M, Kundi M, Moshammer H, Lercher P, Müller K, Oberfeld G, Ohnsorge P, Pelzmann P, Scheingraber C, Thill R: EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. Rev Environ Health. 2016;31(3):363–397. https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0011
2	Hardell L, Nyberg R: The 5G microwave technology 3.5 GHz — what do we know today about health risks? First 5G case studies and the 5G Appeal. World J Clin Oncol. 2023 (17. Oktober 2023).
3	Karipidis K, Mate R, Urban D, Tinker R, Wood A: 5G mobile networks and health—a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz. J Expo Sci Environ Epidemiol. 2021;31(4):585–605.
4	Kim J, et al.: Early-life exposure to 27.5 GHz 5G millimeter-wave radiation induces skin-related biological responses in mice. 2025. PMID: 42260123.
5	Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Constructor University Bremen: Effects of the exposure with centimeter and millimeter waves (5G) on human skin cells. BfS-Forschungsprojekt, bfs.de.
6	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(18):3406. https://doi.org/10.3390/ijerph16183406
7	Betzalel N, Ben Ishai P, Feldman Y: The human skin as a sub-THz receiver – Does 5G pose a danger to it or not? Environ Res. 2018;163:208–216.
8	TU Ilmenau, RWTH Aachen, EM-Institut, im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS): Measurement and analysis of RF EMF exposure to 5G mobile communication base stations with beamforming. Forschungsbericht, 2022.
9	IEEE Committee on Man and Radiation (COMAR): Technical Information Statement: Health and Safety Issues concerning Exposure to RF Energy from 5G Network Devices. Health Phys. 2020;119(2):236–238.
10	Redmayne M, Maisch DR: ICNIRP Guidelines' Exposure Assessment Method for 5G Millimetre Wave Radiation May Trigger Adverse Effects. Int J Environ Res Public Health. 2023;20(7):5267.
11	Sarrebourse T, et al.: Modelling of Total Exposure in Hypothetical 5G Mobile Networks for Varied Topologies and User Scenarios. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Schweiz, Forschungsbericht, 2020.
12	Pall ML: Millimeter (MM) wave and microwave frequency radiation produce deeply penetrating effects: the biology and the physics. Rev Environ Health. 2022;37(3):303–321.
13	Panagopoulos DJ, Karabarbounis A, Yakymenko I, Chrousos GP: Human-made electromagnetic fields: Ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage (Review). Int J Oncol. 2021;59(5):92.
14	Huber R, Treyer V, Borbély AA, Schuderer J, Gottselig JM, Landolt HP, Werth E, Berthold T, Kuster N, Buck A, Achermann P: Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG. J Sleep Res. 2002;11(4):289–295. https://doi.org/10.1046/j.1365-2869.2002.00314.x
15	Massaro L, De Sanctis S, Franchini V, Regalbuto E, Alfano G, Focaccetti C, Benvenuto M, Cifaldi L, Sgura A, Berardinelli F, Marinaccio J, Barbato F, Rossi E, Nardozi D, Masuelli L, Bei R, Lista F: Study of genotoxic and cytotoxic effects induced in human fibroblasts by exposure to pulsed and continuous 1.6 GHz radiofrequency. Front Public Health. 2024;12:1419525. https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1419525
16	Regalbuto E, Anselmo A, De Sanctis S, Franchini V, Lista F, Benvenuto M, et al.: Human fibroblasts in vitro exposed to 2.45 GHz continuous and pulsed wave signals: evaluation of biological effects with a multimethodological approach. Int J Mol Sci. 2020;21:7069. https://doi.org/10.3390/ijms21197069