

Diese **Sonderausgabe** des BERENIS-Newsletters dokumentiert den gegenwärtigen Wissensstand zu biologischen Auswirkungen von Millimeterwellen (MMW) im Frequenzbereich von 5.8 bis 200 GHz und gibt eine aktuelle Einschätzung über den möglichen Zusammenhang von Exposition und deren Wirkungen auf die Gesundheit. Dafür wurden im Zeitfenster von Anfang 2019 bis August 2024 erschienene relevante Tier-, Human- und Zellstudien identifiziert und zusammenfassend beurteilt. Ein ausführlicher Bericht, in dem diese Studien detailliert vorgestellt werden, wurde im Mai 2025 vom BAFU veröffentlicht¹. Diese Sonderausgabe enthält eine Kurzfassung des Berichts.

Elektromagnetische Felder im Frequenzbereich 5.8-200 GHz – Biologische Effekte und Konsequenzen für die Gesundheit

Einleitung und Zielsetzung des Berichtes

Millimeterwellen (Wellenlängen im Millimeter-Bereich, daher die Bezeichnung MMW), d.h. hochfrequente elektromagnetische Felder (HF-EMF) mit Frequenzen über 6 GHz, werden in der Schweiz derzeit (Stand: 2025) noch nicht für den Mobilfunk eingesetzt. Mit der zunehmenden Nutzung mobiler Kommunikation und den damit verbundenen Änderungen der verwendeten Technologien ist jedoch davon auszugehen, dass MMW in Zukunft zunehmend zur Anwendung gelangen werden, um die Bandbreite zu erhöhen. Das Wissen über potenzielle biologische Auswirkungen der HF-EMF in den neuen Frequenzbändern ist beschränkt und deren mögliche gesundheitliche Folgen sind noch weitgehend unerforscht.

Charakteristika von Millimeterwellen

Bei Frequenzen über 6 GHz ist die Absorption auf die Oberfläche der exponierten Zellen, des Tieres und des Menschen konzentriert. Die eingestrahlte Leistungsdichte (ausgedrückt in W/m^2 - "incident power density" IPD) kann als geeignetes Mass für die Exposition von Geweben verwendet werden². Die Energieabsorption (Expositionsintensität mal Zeitdauer pro Volumen) kann zu einem lokalen oder systemischen Temperaturanstieg führen, was thermoregulatorische Reaktionen im Organismus auslösen oder Veränderungen im Energiehaushalt bewirken kann. Neben potenziellen athermischen Einflüssen auf biologische Funktionen und Mechanismen sollten deshalb hitzebedingte Auswirkungen berücksichtigt werden. Solche Temperaturerhöhungen können entweder direkt gemessen oder mit Hilfe von Computermodellierungsverfahren abgeschätzt werden.

Ziel dieses Sondernewsletters ist es, den gegenwärtigen Wissensstand zu dokumentieren und eine aktuelle Einschätzung zu einem möglichen Zusammenhang von MMW im Frequenzbereich von 5.8 bis 200 GHz auf die Gesundheit zu geben. Die gesundheitsrelevanten Effekte aus vielen verschiedenen experimentellen Endpunkten beziehen sich in erster Linie auf Krebs, neurologische Erkrankungen

¹ www.bafu.admin.ch (Thema: Elektrosmog und Licht > Publikationen und Studien > Studien), und <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=73167>

² Zum Schutz der Bevölkerung vor übermässigen thermischen Wirkungen empfiehlt ICNIRP 2020 einen Grenzwert (Referenzwert) für Ganzkörperexpositionen (unter Fernfeldbedingungen) von $10 \text{ W}/\text{m}^2$ gemittelt über 30 Minuten. Für lokale Expositionen (Teilkörperexpositionen) liegt der Referenzwert, gemittelt über 4 cm^2 und 6 Minuten, je nach Frequenz zwischen $40 \text{ W}/\text{m}^2$ (bei 6 GHz) und $20 \text{ W}/\text{m}^2$ (bei 300 GHz) sowie, gemittelt über 1 cm^2 und 6 Minuten, zwischen $60 \text{ W}/\text{m}^2$ (bei 30 GHz) und $40 \text{ W}/\text{m}^2$ (bei 300 GHz).

sowie Hauterkrankungen, umfassen aber auch andere biologische Prozesse, wie Reproduktion und Fertilität, entwicklungsbezogene, kognitive und physiologische Aspekte, sowie Mechanismen, die bei verschiedenen physiologischen sowie pathologischen Prozessen eine Rolle spielen, wie beispielsweise oxidativer Stress und programmiert Zelltod.

Vorgehensweise

Systematische Auswahl von Studien

Die dieser Zusammenfassung zugrundeliegende «systematische Review» (siehe deutscher Bericht³) wurde nach standardisierten Grundsätzen durchgeführt, welche die Auswahl der Studien nach PECO-Kriterien (Population, Exposition, Vergleiche und Ergebnisse), eine systematische Abfrage in mindestens zwei Datenbanken und eine Dokumentation in Übereinstimmung mit den PRISMA-Richtlinien [1, 2] berücksichtigt. Diese systematische Review wurde gemäss wissenschaftlichen Empfehlungen durchgeführt [3, 4]. Insbesondere wurden Studien mit Zellkulturen (“*in vitro*”), Tieren und Probanden (“*in vivo*”) berücksichtigt, in denen biologische Effekte oder Mechanismen untersucht wurden, und in einer systematischen Bewertung unabhängig begutachtet. Eine Synthese der Studienresultate mit Relevanz für die Gesundheit wurde in folgenden Kategorien im Zusammenhang mit Krankheitsbildern und biologischen Wirkungen diskutiert:

1. Karzinogenese, neurodegenerative und andere neurologische Erkrankungen
2. Krankheiten/Wirkungen auf die am stärksten exponierten Organe wie Haut und Augen, einschliesslich thermischer Wirkungen
3. Kardiovaskuläre und immunologische Erkrankungen
4. Fruchtbarkeit, Fortpflanzung und Entwicklungsprozesse
5. Zelluläre Vitalität, Proliferation und Seneszenz
6. Stressreaktion und (zelluläre) Homöostase
7. Genetische und epigenetische Integrität (Transkriptomik/Proteomik)
8. Studien am Menschen, die neben Merkmalen der Gesundheit auch die Wahrnehmung einschliessen

Studienbeurteilung

Für die Bewertung der einzelnen Studien wurde eine Risikoanalyse durchgeführt, welche die Studienqualität beurteilt. Diese evaluiert die Studien in verschiedenen Bereichen (Domänen) bezüglich Sensitivität und Risiko für systemische Fehler (“risk of bias”, RoB) und liefert ein Mass für die Konfidenz in die Studienresultate. Die abschliessende Bewertung wurde anhand des sogenannten GRADE-Ansatzes (Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation⁴, nach standardisierten Richtlinien gemäss OHAT [3, 4] mit geringfügigen Anpassungen für Tier- und Zellstudien durchgeführt.

Zusammenfassung und Beurteilung von MMW

Im Zeitfenster von Anfang 2019 bis August 2024 wurden insgesamt 56 Studien, 29 Tier-/Humanstudien und 28 Zellstudien, ausgewählt und beurteilt. Die meisten Studien wurden im Sub-MMW

³ www.bafu.admin.ch (Thema: Elektrosmog und Licht > Publikationen und Studien > Studien), und <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=73167>

⁴ <https://www.gradeworkinggroup.org>

Frequenzbereich 5.8-29 GHz (n=16 *in vivo*, n=10 *in vitro*) durchgeführt, gefolgt von Studien mit MMW im Frequenzbereich von 50-100 GHz (n=5 *in vivo*, n=13 *in vitro*), 101-200 GHz (n=3 *in vivo*, n=6 *in vitro*) und 30-49 GHz (n=3 *in vivo*, n=3 *in vitro*). Insgesamt wurden für 20 Tierstudien signifikante Einschränkungen hinsichtlich der Exposition und der Dosimetrie in der Risikoanalyse festgestellt. Fast alle dieser Studien (n=14) weisen auch Limitierungen bei der Temperaturbewertung auf, was insbesondere für einige der beurteilten Kategorien, zum Beispiel: 4. Fruchtbarkeit, Fortpflanzung und Entwicklungsprozesse, relevant ist. Ähnliche Bewertungen mit Einschränkungen in verschiedenen Domänen ergaben sich auch für die Zellstudien.

Im begutachteten Zeitraum gibt es lediglich eine publizierte Tierstudie zur Krebsentstehung durch MMW im Frequenzbereich 5.8-29 GHz [5], die jedoch diverse Mängel in der Studienqualität aufweist. Die Datenlage erlaubt daher keine Aussagen zu möglichen Krebsrisiken durch MMW. Gut-kontrollierte Studien zur Gentoxizität, die sich im Bereich der gesetzlichen Grenzwerte bewegen, geben allesamt keine Hinweise auf karzinogene Effekte durch MMW in allen Frequenzbereichen [6-8]. Diese Befunde sind grundsätzlich im Einklang mit neueren Studien, in denen verschiedene Zellmodelle HF-EMF ausgesetzt wurden, die für die mobile Kommunikation vor 5G verwendet werden [9-11]. Relevant für die Krebsentstehung sind zudem Einflüsse auf die Vitalität und Proliferation der Zellen, wobei es hier beim aktuellen Wissenstand nicht möglich ist, eindeutige Schlussfolgerungen über die Auswirkungen der MMW-Exposition zu ziehen, da generell wenig Konfidenz in die Evidenz vorhanden ist und unterschiedliche experimentelle Ansätze verfolgt wurden.

Studien zu möglichen Gesundheitseffekten von MMW liefern widersprüchliche Ergebnisse für funktionelle sowie deskriptive Biomarker, die Rückschlüsse auf kardiovaskuläre Symptome und/oder Krankheiten, oder Effekte auf das Immunsystem zulassen [12-16]. Lediglich zwei *in vivo*-Studien zu möglichen Gesundheitseffekten von HF-EMF im Frequenzbereich von 5.8-29 GHz und kardiovaskulären Erkrankungen wurden gefunden [12, 17]. Deren Ergebnisse betreffend EKG sowie strukturelle Veränderungen im Herzgewebe sind jedoch widersprüchlich. Studien an Zellkulturen gaben Hinweise auf einen vorübergehenden Anstieg von Entzündungsparametern sowie einer Aktivierung des Immunsystems nach Exposition im Frequenzbereich 5.8-29 GHz [15, 16].

Auswirkungen von MMW auf Fruchtbarkeit, Fortpflanzung und Entwicklungsprozesse wurden in insgesamt acht Studien untersucht [18-25]. Unter Berücksichtigung der Studienqualität gibt es Hinweise auf gewisse Beeinträchtigungen auf die Fortpflanzung und Entwicklungsprozesse durch HF-EMF im Frequenzbereich von 5.8-29 GHz, wie die Mehrgenerationenstudie in *C. elegans* zeigte, wenn die Exposition in einem frühen Entwicklungsstadium sowie chronisch (SAR: 4 W/kg) durchgeführt wurde [25]. Keine Anzeichen von oxidativem Stress wurden bei einer kurzzeitigen und starken Exposition mit 9.4 GHz HF-EMF gefunden [20].

Ein Anstieg von zellulärem und/oder oxidativem Stress könnte hierfür, wie auch für die Defizite in der Gedächtnisleistung verantwortlich sein, was auch in Studien mit Frequenzen oberhalb 10 GHz [26, 27], aber auch für Studien mit Frequenzen unterhalb 5.8 GHz beschrieben wurde (siehe Übersichtsarbeit von Schuermann und Mevissen [28]). Wirkungen zu oxidativem Stress wurden im [BERENIS Sondernewsletter vom Januar 2021](#) thematisiert. Hinweise auf Aktivitätsänderungen durch MMW von Enzymen, die das oxidative Gleichgewicht regulieren, in verschiedenen Geweben geben zwei ältere Studien mit Limitationen [29, 30].

In zwei Studien im Frequenzbereich 5.8-29 GHz wurden Defizite in der Gedächtnisleistung sowie strukturelle Veränderungen in verschiedenen Gehirnstrukturen gefunden [31, 32]. Studien in Nagetieren sowie solche mit primären Nervenzellen geben Hinweise auf eine Schmerzhemmung nach Exposition mit höheren Frequenzen (>60 GHz) [33-36]. Die Ergebnisse zur Weiterleitung von neuronalen Signalen, nämlich die Übertragung an der Synapse, sind nicht eindeutig [34, 35]. Globale Analysen von Genaktivitäten und Proteinen wurden teilweise herangezogen, um Mechanismen und

Biomarker für beobachtete Effekte von MMW bezüglich neurologischer Defizite, der Beeinflussung des Immunsystems und zu therapeutischen Wirkungen zu identifizieren. Mit diesem Ansatz wurde überzeugend gezeigt, dass expositionsabhängige Veränderungen der Genexpression durch 60 GHz MMW (200 W/m^2) überwiegend durch thermische Reaktionen verursacht wurden [37]. Dies unterstreicht die Bedeutung der Temperaturkontrolle und Dosimetrie in solchen *in vitro*-Expositionsmödellen.

Die Studien zu thermischen Effekten, insbesondere an Haut- und Augengewebe, die als wichtigstes Zielgewebe für MMW-Einflüsse gelten, basieren auf einer Vielzahl von Modellsystemen, d.h. Kaninchen, Ratten und Mäusen, Schweinen, Probanden sowie verschiedenen Zelltypen [15, 27, 38-44] und die hier berichteten Ergebnisse stimmen mit den Befunden früherer Übersichtsarbeiten überein [45-47]. Die meisten Studien, die mit MMW durchgeführt wurden, konzentrierten sich auf therapeutische Anwendungen, insbesondere für Schmerzbehandlung [13, 42, 48] und weniger auf thermische Schwellenwerte der MMW-Exposition. An der Fingerspitze von Versuchspersonen wurde eine Temperaturerhöhung von $0.9\text{--}1^\circ\text{C}$ als Schwellenwert für erzeugten Schmerz durch 28 GHz MMW im Bereich von $1260\text{--}3990 \text{ W/m}^2$ angegeben [42]. Eine Studie gibt Hinweise auf einen Anstieg der Wahrscheinlichkeit für eine Schädigung am Kaninchenauge bei hohen einfallenden Leistungsdichten ($1730, 2520, 3680 \text{ W/m}^2$) [40]. Für MMW in den Frequenzbändern, die möglicherweise von zukünftigen Telekommunikationstechnologien genutzt werden, ist die Dosimetrie und Datenlage lückenhaft und wenig detailliert, was Temperaturerhöhungen und thermische Effekte betrifft. Auch die Vielfalt der verwendeten Versuchsansätze lässt keine verlässlichen Rückschlüsse auf die thermischen Auswirkungen von MMW auf menschliches Haut- und Augengewebe zu.

Manifestiert durch Energiedeposition und Gewebeerwärmung, kann Zellstress durch thermische Effekte die Proteinfaltung beeinflussen und die vermehrte Expression von Hitzeschockproteinen verursachen. Dies wurde in diversen Studien, bei diversen MMW-Frequenzen, verschiedenen IPDs, Expositionzeiträumen und Zelltypen untersucht und gelegentlich auch nachgewiesen [6, 7, 37, 49-56]. Allerdings wurden keine Veränderungen der Hitzeschockproteine festgestellt, wenn Zellen des Auges für 24 Stunden HF-EMFs bei IPD von 10 W/m^2 mit Frequenzen von 5.8 GHz [7], 40 GHz [6] oder 60 GHz [56] exponiert wurden. Neuere Studien zu Hyperthermie, insbesondere Hitzeschockreaktionen durch intensive Pulse mit 58.4 GHz MMW, welche eine Permeabilität der Zellmembran verursachen, fokussieren auf die Therapie von Tumoren [57-59]. Nach einer Exposition bei 60 GHz (IPD von 200 W/m^2) wurden aber auch Veränderungen beobachtet, die auf erhöhte Permeabilität der Zellmembran zurückgeführt wurden [60]. Es fehlen aber gut durchgeführte Studien in Säugetieren, das Vertrauen in die verfügbare experimentelle Evidenz ist generell eingeschränkt und das Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen bleibt lückenhaft.

Schlussfolgerungen

Die Studien zu thermischen Wirkungen von MMW zeigen einen Anstieg der Temperatur bei den Labortieren in Abhängigkeit von der Frequenz sowie der Intensität. Die Datenlage erlaubt keine Aussagen zu möglichen Schwellenwerten, es gibt jedoch Hinweise, dass ein lokaler Temperaturanstieg von 1°C von Probanden (Menschen) detektiert werden kann (im Bereich $1260\text{--}3990 \text{ W/m}^2$). Die Daten aus anwendungsbezogenen Studien zeigen, dass insbesondere gepulste HF-EMF-Exposition ein interessantes Instrument für die Krebstherapie insbesondere für oberflächliche Hauttumoren ist.

Einige der *in vivo*-Studien geben Hinweise auf Beeinträchtigung des Lernverhaltens sowie strukturelle Veränderungen im Gehirn, die teilweise auch mit oxidativem Stress einhergehen, wie bereits bei niedrigeren Frequenzen ($<5.8 \text{ GHz}$) beobachtet wurde. Bei höheren Frequenzen im MMW-Bereich ($>60 \text{ GHz}$) gibt es Hinweise für eine veränderte Aktivität von Nervenzellen, die allerdings je nach Studie

in beide Richtungen gingen. Hinweise aus Zellstudien deuten auf eine erhöhte Permeabilität von Zellmembranen nach Exposition bei >60 GHz. Die Ursache dafür ist noch spekulativ, könnte aber durch oxidativen Stress oder Einflüsse auf Membran-Kanäle bedingt sein, insbesondere wenn gepulste MMW eingesetzt werden. Genaktivitäts-Analysen stützen teilweise die beobachteten Veränderungen von neuronalen sowie metabolischen Funktionen von Zellen. Bis anhin konnten aber keine eindeutigen, von der Exposition betroffenen Signalwege oder gar ein Biomarker identifiziert werden, was Schlussfolgerungen in Bezug auf die menschliche Gesundheit erschwert.

Effekte von MMW auf die Krebsentstehung sind aufgrund der neueren Daten aus *in vitro*-Studien zur Gentoxizität unwahrscheinlich. Allerdings wurde diesbezüglich nur eine Tierstudie publiziert, die Tumoren der Unterhaut untersuchte, aber erhebliche Mängel in der Studienqualität aufweist. Es gibt erste Hinweise auf Beeinträchtigung der Reproduktion nach chronischer Exposition mit 9.4 GHz MMW aus einer Mehrfachgenerationen-Studie mit Fadenwürmern, die wahrscheinlich auf oxidativen Stress zurückzuführen ist. Allerdings fehlen Studien an Säugetieren.

Insgesamt sind sehr viele der publizierten Studien mit erheblichen Mängeln, insbesondere bei der Expositionscharakterisierung sowie der Dosimetrie, behaftet, deren Ergebnisse keine kausalen Schlussfolgerungen zulassen. Bedingt durch diese häufigen Mängel lässt sich auch kaum eine verlässliche Dosis-Wirkungs-Korrelation ableiten. Eine Aussage zur Dosisabhängigkeit kann nicht getroffen werden, da Studien dazu fehlen und selten vergleichbare experimentelle Endpunkte evaluiert wurden.

Stellungnahme BERENIS zum Stand des Wissens, ICNIRP-Guidelines und Vorsorge

- Auch nach Sichtung und Einbezug der Studien der letzten fünf Jahre bleibt es schwierig, Schlussfolgerungen zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen einer HF-EMF-Exposition im MMW-Bereich zu machen. Der aktuelle Wissensstand ist nach wie vor ambivalent, und die Konfidenz in die vorhandene Beweislage ist beschränkt. Viele Studien sind mit Unsicherheiten behaftet und oft, insbesondere wenn die Expositionen im Bereich oberhalb der gesetzlichen Grenzwerte durchgeführt wurden, kann bei den Befunden ein Beitrag thermischer Effekte nicht ausgeschlossen werden.
- Auch wenn unterhalb der ICNIRP-Referenzgrenzwerte [61] keine gesundheitlichen Wirkungen nachgewiesen werden konnten, gibt es diesbezüglich noch diverse Unsicherheiten. Es gibt moderate Evidenz, dass HF-EMF-Exposition oberhalb 5.8 GHz zu einer verminderten Lernleistung führt, wobei dabei oxidativer sowie zellulärer Stress beteiligt sein könnte. Allerdings liegen diesbezüglich keine epidemiologischen Studien (>5.8 GHz) vor, sodass die Relevanz für die menschliche Gesundheit kaum abschliessend beurteilt werden kann. Wie schon im [Sondernewsletter vom Juli 2020](#) dargelegt, unterstützt BERENIS eine Berücksichtigung der präziseren Richtlinien bei kurzzeitigen und kleinflächigen Expositionen oberhalb von 6 GHz in der Schweizer Gesetzgebung, bevor die höheren Frequenzen in Zukunft für die mobile Kommunikation genutzt werden.
- Aufgrund dieser Unsicherheiten empfiehlt BERENIS weiterhin die konsequente Anwendung des Vorsorgeprinzips. In der Schweiz ist das Vorsorgeprinzip für Immissionen von fest installierten Sendeanlagen (z.B. Mobilfunkbasisstationen und Rundfunksender) mit dem Anlagegrenzwert der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) konkretisiert.
- Im Hinblick auf die geplante Nutzung des Frequenzbereichs oberhalb 5.8 GHz in neuen Kommunikations-Technologien bemerken wir, dass es zum jetzigen Zeitpunkt nur wenige wissenschaftliche Studien ohne Einschränkungen in der Studienqualität gibt. Insbesondere fehlen aussagekräftige Studien an Säugetieren. Daher ist es schwierig, Aussagen über mögliche

Gesundheitseffekte, insbesondere für die am stärksten exponierten Gewebe Haut und Augen, zu machen. Auch lässt sich keine Aussage zu ökologischen Auswirkungen von MMW machen, da Studien mit kleinen Tieren, wie Bienen und anderen Insekten, derzeit weitgehend fehlen. Qualitativ hochstehende Forschung zur Reduktion dieser Wissenslücken sollte angestossen und gefördert werden, um etwaige Auswirkungen auf die Gesundheit und die Umwelt in Zukunft besser beurteilen zu können.

Literaturangaben

1. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hrobjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P and Moher D (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372.
2. Page MJ, Moher D, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hrobjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P and McKenzie JE (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372.
3. NTP, National Toxicology Program. *Handbook for Conducting a Literature-based Health Assessment Using OHAT Approach for Systematic Review and Evidence Integration*. Office of Health Assessment and Translation. National Institute of Environmental Health Sciences., 2019.
4. NTP, National Toxicology Program. *OHAT Risk of Bias Rating Tool for Human and Animal Studies*. Office of Health Assessment and Translation. National Institute of Environmental Health Science. U.S. Department of Health and Human Service., 2019.
5. de Seze R, Poutriquet C, Gamez C, Maillot-Marechal E, Robidel F, Lecomte A and Fonta C (2020). Repeated exposure to nanosecond high power pulsed microwaves increases cancer incidence in rat. *PLoS One*, 15(4).
6. Koyama S, Narita E, Suzuki Y, Shiina T, Taki M, Shinohara N and Miyakoshi J (2019). Long-term exposure to a 40-GHz electromagnetic field does not affect genotoxicity or heat shock protein expression in HCE-T or SRA01/04 cells. *Journal of Radiation Research*, 60(4).
7. Miyakoshi J, Tonomura H, Koyama S, Narita E and Shinohara N (2019). Effects of Exposure to 5.8 GHz Electromagnetic Field on Micronucleus Formation, DNA Strand Breaks, and Heat Shock Protein Expressions in Cells Derived From Human Eye. *IEEE Transactions on Nanobioscience*, 18(2).
8. Lawler NB, Evans CW, Romanenko S, Chaudhari N, Fear M, Wood F, Smith NM, Wallace VP and Swaminathan Iyer K (2022). Millimeter waves alter DNA secondary structures and modulate the transcriptome in human fibroblasts. *Biomedical Optics Express*, 13(5).
9. Gläser K, Rohland M, Kleine-Ostmann T, Schrader T, Stopper H and Hintzsche H (2016). Effect of Radiofrequency Radiation on Human Hematopoietic Stem Cells. *Radiation Research*, 186(5).
10. Schuermann D, Ziemann C, Barekati Z, Capstick M, Oertel A, Focke F, Murbach M, Kuster N, Dasenbrock C and Schär P (2020). Assessment of Genotoxicity in Human Cells Exposed to Modulated Electromagnetic Fields of Wireless Communication Devices. *Genes*, 11(4).
11. Su LL, Wei XX, Xu ZP and Chen GD (2017). RF-EMF Exposure at 1800 MHz Did Not Elicit DNA Damage or Abnormal Cellular Behaviors in Different Neurogenic Cells. *Bioelectromagnetics*, 38(3).

12. Yao C, Wang H, Sun L, Ren K, Dong J, Wang H, Zhang J, Xu X, Yao B, Zhou H, Zhao L and Peng R (2022). The Biological Effects of Compound Microwave Exposure with 2.8 GHz and 9.3 GHz on Immune System: Transcriptomic and Proteomic Analysis. *Cells*, 11(23).
13. Minier L, Debouzy JC, Foerster M, Pierre V, Maindet C and Crouzier D (2023). Hypoalgesia and parasympathetic effects of millimeter waves on experimentally induced pain in healthy volunteers. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 42(1).
14. Zhang Q, Shang S, Li X and Lu X (2024). Anti-Inflammatory and Immunomodulatory Effects of 0.1 Sub-Terahertz Irradiation in Collagen-Induced Arthritis Mice. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(11).
15. Havas F, Cohen M, Krispin S and Attia-Vigneau J (2024). Protective Properties of Botanical Extracts against 5G Radiation-induced Damage to Human Skin, as Demonstrated in Preliminary Data from a Keratinocyte Cell Culture Model. *Frontiers in Bioscience (Landmark Ed)*, 29(1).
16. Yin Y, Xu X, Li D, Yao B, Wang H, Zhao L, Wang H, Dong J, Zhang J and Peng R (2023). Role of Cx43 in iPSC-CM Damage Induced by Microwave Radiation. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(16).
17. Yin Y, Xu X, Gao Y, Wang J, Yao B, Zhao L, Wang H, Wang H, Dong J, Zhang J and Peng R (2021). Abnormal Expression of Connexin43 in Cardiac Injury Induced by S-Band and X-Band Microwave Exposure in Rats. *Journal of Immunology Research*, 2021.
18. Belyavskaya A, Loginov P, Mavlutova E and Nikolaev A (2020). Changes in Male Reproductive System Under Adverse Environmental Conditions. *Archiv EuroMedica*, 10(2).
19. Nik Abdull Halim NMH, Mohd Jamili AF, Che Dom N, Abd Rahman NH, Jamal Kareem Z and Dapari R (2024). The impact of radiofrequency exposure on *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) development. *PLoS One*, 19(2).
20. Sun A, Li Z, Zhao X, Zhou H, Gao Y, Liu Q, Zhou S, Zhang C, Dong G and Wang C (2022). Pulsed High-Peak Power Microwaves at 9.4 GHz Do Not Affect Basic Endpoints in *Caenorhabditis elegans*. *Bioelectromagnetics*, 43(1).
21. Xue Y, Guo L, Lin J, Lai P, Rui G, Liu L, Huang R, Jing Y, Wang F and Ding G (2022). Effects of 5.8 GHz Microwaves on Testicular Structure and Function in Rats. *Biomed Research International*, 2022.
22. Ploskonos MV, Zulbalaeva DF, Kurbangalieva NR, Ripp SV, Neborak EV, Blagonravov ML, Syatkin SP, Sungrapova K and Hilal A (2022). Assessing the biological effects of microwave irradiation on human semen in vitro and determining the role of seminal plasma polyamines in this process. *Biomedical Reports*, 16(5).
23. Pecoraro R, Pavone SC, Scalisi EM, Ignoto S, Sica C, Indelicato S, Capparucci F, Iaria C, Salvaggio A, Sorbello G, Di Donato L and Bruno MV (2023). Multimarker Approach to Evaluate the Exposure to Electromagnetic Fields at 27 GHz on *Danio rerio* Larvae. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4).
24. Pecoraro R, Pavone SC, Scalisi EM, Sica C, Ignoto S, Contino M, Salvaggio A, Marmara D, Sorbello G, Di Donato L and Bruno MV (2022). Biological Effects of Non-Ionizing Electromagnetic Fields at 27 GHz on Sperm Quality of *Mytilus galloprovincialis*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4).
25. Sun A, Zhao X, Li Z, Gao Y, Liu Q, Zhou H, Dong G and Wang C (2022). Effects of Long-Term and Multigeneration Exposure of *Caenorhabditis elegans* to 9.4 GHz Microwaves. *Bioelectromagnetics*, 43(5).
26. Kesari KK and Behari J (2010). Microwave Exposure Affecting Reproductive System in Male Rats. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 162(2).

27. Verma S, Keshri GK, Karmakar S, Mani KV, Chauhan S, Yadav A, Sharma M and Gupta A (2021). Effects of Microwave 10 GHz Radiation Exposure in the Skin of Rats: An Insight on Molecular Responses. *Radiation Research*, 196(4).
28. Schuermann D and Mevissen M (2021). Manmade Electromagnetic Fields and Oxidative Stress-Biological Effects and Consequences for Health. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(7).
29. Kesari KK and Behari J (2009). Fifty-gigahertz microwave exposure effect of radiations on rat brain. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 158(1).
30. Kumar S, Kesari KK and Behari J (2010). Evaluation of genotoxic effects in male Wistar rats following microwave exposure. *Indian Journal of Experimental Biology*, 48(6).
31. Liu JJ, Zhang HY, Chen X, Zhang GB, Lin JK, Feng H and Chu WH (2022). 20-Hydroxyecdysone Improves Neuronal Differentiation of Adult Hippocampal Neural Stem Cells in High Power Microwave Radiation-Exposed Rats. *Biomedical and Environmental Sciences*, 35(6).
32. Wang H, Liu Y, Sun Y, Dong J, Xu X, Wang H, Zhao X, Zhang J, Yao B, Zhao L, Liu S and Peng R (2023). Changes in cognitive function, synaptic structure and protein expression after long-term exposure to 2.856 and 9.375 GHz microwaves. *Cell Communication and Signaling*, 21(1).
33. Ma S, Li Z, Gong S, Lu C, Li X and Li Y (2023). High Frequency Electromagnetic Radiation Stimulates Neuronal Growth and Hippocampal Synaptic Transmission. *Brain Sciences*, 13(4).
34. Zhao L, Yi R, Liu S, Chi Y, Tan S, Dong J, Wang H, Zhang J, Wang H, Xu X, Yao B, Wang B and Peng R (2023). Biological responses to terahertz radiation with different power density in primary hippocampal neurons. *PLoS One*, 18(1).
35. Sun L, Chen M, Wang H, Dong J, Zhao L and Peng R (2022). CaMKII δ Promotes Synaptic Plasticity under Terahertz Wave Radiation by Activation of the NF- κ B Pathway. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 13(25).
36. Tan SZ, Tan PC, Luo LQ, Chi YL, Yang ZL, Zhao XL, Zhao L, Dong J, Zhang J, Yao BW, Xu XP, Tian G, Chen JK, Wang H and Peng RY (2019). Exposure Effects of Terahertz Waves on Primary Neurons and Neuron-like Cells Under Nonthermal Conditions. *Biomedical and Environmental Sciences*, 32(10).
37. Martin C, Evrard B, Percevault F, Ryder K, Darde T, Lardenois A, Zhadobov M, Sauleau R, Chalmeil F, Le Dréan Y and Habauzit D (2024). Transcriptional landscape of human keratinocyte models exposed to 60-GHz millimeter-waves. *Toxicology In Vitro*, 97.
38. Emre M, Karamazi Y, Emre T, Avci Ç, Aydin C, Ebrahimi S and Pekmezekmek AB (2024). The effect of 6GHz radiofrequency electromagnetic radiation on rat pain perception. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 43(1-2).
39. Ijima E, Kodera S, Hirata A, Hikage T, Matsumoto A, Ishitake T and 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.
40. Kojima M, Suzuki Y, Tasaki T, Tatematsu Y, Mizuno M, Fukunari M and Sasaki H (2020). Clinical Course of High-Frequency Millimeter-Wave (162 GHz) Induced Ocular Injuries and Investigation of Damage Thresholds. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 41(7).
41. Kojima M, Tsai CY, Suzuki Y, Sasaki K, Tasaki T, Taki M, Watanabe S and Sasaki H (2019). Ocular Response to Millimeter Wave Exposure Under Different Levels of Humidity. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 40(5).
42. Yuasa A, Uehara S, Ushizawa K, Kodera S, Arai N, Hirata A and Otaka Y (2024). The thermal sensation threshold and its reliability induced by the exposure to 28 GHz millimeter-wave. *Frontiers in Neuroscience*, 18.

43. Furman O, Komoshvili K, Levitan J, Yahalom A, Marks H, Borodin D and Liberman-Aronov S (2020). The Lack of Toxic Effect of High-Power Short-Pulse 101 GHz Millimeter Waves on Healthy Mice. *Bioelectromagnetics*, 41(3).
44. Foroughimehr N, Clayton AHA and Yavari A (2024). Exploring Skin Interactions with 5G Millimeter-Wave through Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy. *Electronics*, 13(9).
45. Wood A, Mate R and 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 and Environmental Epidemiology*, 31(4).
46. Simkó M and Mattsson MO (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).
47. Karipidis K, Mate R, Urban D, Tinker R and 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 and Environmental Epidemiology*, 31(4).
48. Walters TJ, Blick DW, Johnson LR, Adair ER and Foster KR (2000). Heating and pain sensation produced in human skin by millimeter waves: Comparison to a simple thermal model. *Health Physics*, 78(3).
49. Zhadobov M, Nicolaz CN, Sauleau R, Desmots F, Thouroude D, Michel D and Le Dréan Y (2009). Evaluation of the Potential Biological Effects of the 60-GHz Millimeter Waves Upon Human Cells. *Ieee Transactions on Antennas and Propagation*, 57(10).
50. Nicolaz CN, Zhadobov M, Desmots F, Ansart A, Sauleau R, Thouroude D, Michel D and Le Drean Y (2009). Study of narrow band millimeter-wave potential interactions with endoplasmic reticulum stress sensor genes. *Bioelectromagnetics*, 30(5).
51. Le Quement C, Nicolas Nicolaz C, Zhadobov M, Desmots F, Sauleau R, Aubry M, Michel D and Le Drean Y (2012). Whole-genome expression analysis in primary human keratinocyte cell cultures exposed to 60 GHz radiation. *Bioelectromagnetics*, 33(2).
52. Le Quement C, Nicolaz CN, Habauzit D, Zhadobov M, Sauleau R and Le Drean Y (2014). Impact of 60-GHz millimeter waves and corresponding heat effect on endoplasmic reticulum stress sensor gene expression. *Bioelectromagnetics*, 35(6).
53. Haas AJ, Le Page Y, Zhadobov M, Boriskin A, Sauleau R and Le Drean Y (2016). Impact of 60-GHz millimeter waves on stress and pain-related protein expression in differentiating neuron-like cells. *Bioelectromagnetics*, 37(7).
54. Zhadobov M, Sauleau R, Le Coq L, Debure L, Thouroude D, Michel D and Le Dréan Y (2007). Low-power millimeter wave radiations do not alter stress-sensitive gene expression of chaperone proteins. *Bioelectromagnetics*, 28(3).
55. Millenbaugh NJ, Roth C, Sypniewska R, Chan V, Eggers JS, Kiel JL, Blystone RV and Mason PA (2008). Gene expression changes in the skin of rats induced by prolonged 35 GHz millimeter-wave exposure. *Radiation Research*, 169(3).
56. Koyama S, Narita E, Shimizu Y, Suzuki Y, Shiina T, Taki M, Shinohara N and Miyakoshi J (2016). Effects of Long-Term Exposure to 60 GHz Millimeter-Wavelength Radiation on the Genotoxicity and Heat Shock Protein (Hsp) Expression of Cells Derived from Human Eye. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(8).
57. Orlacchio R, Le Page Y, Le Dréan Y, Le Guével R, Sauleau R, Alekseev S and Zhadobov M (2019). Millimeter-wave pulsed heating in vitro: cell mortality and heat shock response. *Scientific Reports*, 9(1).
58. Orlacchio R, Nikolayev D, Le Page Y, Le Drean Y and Zhadobov M (2022). Millimeter-Wave Heating In Vitro: Local Microscale Temperature Measurements Correlated to Heat Shock Cellular Response. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 69(2).

59. Orlacchio R, Page YL, Dréan YL and Zhadobov M (2023). Millimeter-Wave Pulsed Heating in Vitro: Effect of Pulse Duration. *IEEE Journal of Electromagnetics RF and Microwaves in Medicine and Biology*, 7(2).
60. Le Pogam P, Le Page Y, Habauzit D, Doué M, Zhadobov M, Sauleau R, Le Dréan Y and Rondeau D (2019). Untargeted metabolomics unveil alterations of biomembranes permeability in human HaCaT keratinocytes upon 60 GHz millimeter-wave exposure. *Scientific Reports*, 9(1).
61. ICNIRP (2020). ICNIRP Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, 118.

Kontakt

Dr. Stefan Dongus
Sekretariat BERENIS
Schweizerisches Tropen- und Public Health-Institut
Department Epidemiology and Public Health
Environmental Exposures and Health Unit
Kreuzstrasse 2, 4123 Allschwil
Tel: +41 61 284 8111
E-Mail: stefan.dongus@swisstph.ch

Weitere Informationen:

[Beratende Expertinnen- und Expertengruppe nicht-ionisierende Strahlung \(BERENIS\)](#)

[Literaturdatenbank zu allen BERENIS-Newslettern mit Suchfunktion](#)

[Abkürzungsverzeichnis \(als pdf\)](#)