



Bundesamt
für Strahlenschutz

Spotlight on EMF Research

Spotlight on “The effect of mobile phone electromagnetic fields on the human resting state wake EEG and event-related potential: A systematic review and meta-analysis” by Prins et al. in Bioelectromagnetics (2025)

Kategorie [Hochfrequente Felder, Übersichtsarbeit]

Spotlight - Sep/2025 no.2 (Deu)

Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF)

1 Einordnung des Artikels in den Kontext durch das BfS

Das menschliche Gehirn ist möglicherweise in relevantem Maße hochfrequenten elektromagnetischen Feldern (HF-EMF) ausgesetzt, wenn ein Mobiltelefon in der Nähe des Kopfes betrieben wird. Daher werden mögliche Auswirkungen von HF-EMF auf verschiedene Aspekte der Gehirnfunktion seit vielen Jahren untersucht.

Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat ein internationales Projekt durchgeführt, um die möglichen gesundheitlichen Auswirkungen einer Exposition gegenüber HF-EMF systematisch zu bewerten. Im Rahmen dieses Projekts gab die WHO eine systematische Übersichtsarbeit in Auftrag, die die Auswirkungen einer HF-EMF-Exposition auf kognitive Funktionen in experimentellen Studien am Menschen bewertete [2] (siehe Spotlight - Jan/2025 no.1 [3]). Die systematische Übersichtsarbeit berücksichtigte jedoch nicht die Auswirkungen auf das menschliche Elektroenzephalogramm (EEG). Die vorliegende Studie [1] schließt diese Lücke und ergänzt die durch die WHO beauftragten systematischen Übersichtsarbeiten.

2 Resultate und Schlussfolgerungen aus der Perspektive von Prins et al.

Die vorliegende systematische Übersichtsarbeit [1] bewertet den Einfluss von Mobiltelefon-ähnlichen HF-EMF-Feldern auf das Ruhe-EEG und auf ereigniskorrelierte Potenziale (ERP), d. h. Hirnpotenziale, die z. B. durch Hör- und Sehreize hervorgerufen werden, in experimentellen Studien am Menschen.

Prins et al. orientierten sich bei der Literatursuche und -auswahl an dem PRISMA-Statement für die Erstellung systematischer Übersichtsarbeiten [4]. Drei Datenbanken (PubMed, Embase, EMF-Portal) wurden durchsucht. Berücksichtigt wurden geeignete Veröffentlichungen in von Experten begutachteten englischsprachigen Zeitschriften. Geeignet waren Studien, die sich auf das Wach-EEG im Ruhezustand und/oder ERP bei gesunden erwachsenen Menschen konzentrieren, die HF-EMF im von Mobiltelefonen genutzten Frequenzbereich ausgesetzt waren. Nur Studien, die ein randomisiertes, mindestens einfach verblindetes Studiendesign verwendeten und ausreichende Informationen über die Exposition lieferten, z. B. mindestens die Angabe von Expositionsmaßen außerhalb des Körpers, wurden eingeschlossen.

Insgesamt wurden 170 Publikationen bei der Literatursuche gefunden. Davon wurden am Ende 51 Studien, die zwischen 1995 und 2023 veröffentlicht wurden, in die systematische Übersichtsarbeit eingeschlossen. 31 Publikationen (dies entspricht 29 Studien, da in jeweils zwei Publikationen dieselben Gruppen von Teilnehmern untersucht wurden und diese daher zusammengefasst wurden) konzentrierten sich auf das Wach-EEG im Ruhezustand und 20 Studien auf ERP. Für 12 dieser Studien lagen geeignete quantitative Daten vor, deshalb konnten sie in die Metaanalysen einbezogen werden – sieben für das Ruhe-Wach-EEG und fünf für die ERP. Die meisten Studien untersuchten die Auswirkungen einer HF-EMF-Exposition mit Modulationscharakteristiken, die denen der zweiten Generation des Mobilfunks (2G) mit einer Frequenz um 900 MHz entsprechen. Die Stichprobengröße variierte zwischen 10 und 120 Teilnehmern. ERP wurden während verschiedener kognitiver Aufgaben, einschließlich visueller und auditorischer Unterscheidungsaufgaben, aufgezeichnet.

Zur Bewertung des Verzerrungsrisikos (Risk of Bias, RoB) wurde das für randomisierte Crossover-Studien entwickelte Cochrane-RoB-Tool 2.0 verwendet [5]. Es wurden sechs Bereiche des Verzerrungsrisikos bewertet: Randomisierung, Perioden- und Übertragungseffekte, Abweichungen von den beabsichtigten Behandlungen, fehlende Ergebnisdaten, die Messung des Ergebnisses und die Auswahl der berichteten Ergebnisse. Schließlich wurde für jede Studie das übergreifende Verzerrungsrisiko bestimmt und die Studien wurden in die Kategorien „geringes Verzerrungsrisiko“, „moderates Verzerrungsrisiko - einige Bedenken“ oder „hohes Verzerrungsrisiko“ eingestuft. Keine der eingeschlossenen Studien wurde mit einem geringen Verzerrungsrisiko bewertet. Bei 22 der EEG-Studien im Ruhezustand gab es einige Bedenken und sieben wurden mit einem hohen Verzerrungsrisiko bewertet. Bei zwölf der ERP-Studien gab es einige Bedenken, und acht wurden mit einem hohen Verzerrungsrisiko bewertet. Hauptursachen für ein Verzerrungsrisiko waren Randomisierung, Perioden- und Übertragungseffekte sowie selektive Berichterstattung. Ein Übertragungseffekt tritt auf, wenn eine mögliche Wirkung einer Exposition nach dem Ende der Exposition fortbesteht und die Reaktion des Teil-

nehmers in der folgenden Sitzung beeinflussen kann. Die Zeit, die benötigt wird bis der Übertragungseffekt verschwunden ist, ist die Auswaschperiode.

Metaanalysen mit zufälligen Effekten wurden für die Endpunkte Leistung des Ruhe-Wach-EEG im Alpha-Frequenzband (8,5 – 12,5 Hz) und ERP während verschiedener Unterscheidungsaufgaben durchgeführt. Die Latenz und Amplitude der ereigniskorrelierten Potenziale P300 und P100, die die Reaktion des Gehirns auf visuelle Reize beschreiben, sowie die Latenz und Amplitude der ereigniskorrelierten Potenziale P300 und N100, die auditorische Stimulation widerspiegeln, wurden in die Metaanalysen einbezogen. Die Ergebnisse der Metaanalysen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Leistung des Ruhe-EEG im Alpha-Frequenzband im Wachzustand mit offenen Augen war während einer 2G-ähnlichen Exposition im Vergleich zu keiner Exposition statistisch signifikant erhöht ($p = 0,04$). Keinen statistisch signifikanten Unterschied ergaben diesbezüglich die Ergebnisse der Metaanalysen mit geschlossenen Augen während der 2G-ähnlichen Exposition und mit offenen Augen während der 3G-ähnlichen Exposition. Der Anstieg der Alpha-Aktivität des Ruhe-EEG während einer HF-EMF-Exposition im Wachzustand wurde in weiteren Studien beobachtet, die verschiedene HF-EMF-Frequenzen abdeckten. Diese Studien waren Teil der Übersichtsarbeit, aber nicht Teil der Metaanalysen. Prins et al. kommen zu dem Schluss, dass es Hinweise auf eine Wirkung einer 2G-ähnlichen Exposition auf das Ruhe-EEG im Wachzustand mit offenen Augen gibt.

Es gab keine statistisch signifikanten Wirkungen einer Mobiltelefon-ähnlichen Exposition auf die analysierten Parameter der ereigniskorrelierten Potenziale (ERP) während visueller und auditorischer Unterscheidungsaufgaben.

Exposition - Endpunkt	Studienanzahl (Zahl Datensätze)	Stichprobengröße	Verzerrungsrisiko: Zahl der Studien	SMD [95 % KI]
Leistung des Ruhe-Wach-EEG im Alpha-Band (μV^2)				
2G - Augen offen	5 (6)*	322	Moderat: 5	0,16 [0,01; 0,32]
2G - Augen zu	3 (3)	81	Moderat: 2, Hoch: 1	-0,04 [-0,35; 0,27]
3G - Augen offen	1 (2)*	62	Moderat: 1	-0,16 [-0,51; 0,20]
ERP in visuellen Unterscheidungsaufgaben				
2G - P300 Latenz (ms)	2 (2)	156	Moderat: 2	0,12 [-0,10; 0,34]
2G - P300 Amplitude (μV)	2 (2)	156	Moderat: 2	-0,08 [-0,31; 0,14]
2G - P100 Latenz (ms)	2 (2)	156	Moderat: 2	-0,01 [-0,23; 0,21]
2G - P100 Amplitude (μV)	2 (2)	156	Moderat: 2	-0,05 [-0,28; 0,17]
ERP in auditorischen Unterscheidungsaufgaben				
2G - P300 Latenz (ms)	4 (5)*	209	Moderat: 3, Hoch: 1	0,20 [-0,14; 0,55]
2G - P300 Amplitude (μV)	3 (4)*	197	Moderat: 3	-0,05 [-0,25; 0,15]
2G - N100 Latenz (ms)	3 (4)*	194	Moderat: 2, Hoch: 1	-0,06 [-0,44; 0,33]
2G - N100 Amplitude (μV)	3 (4)*	194	Moderat: 2, Hoch: 1	0,01 [-0,28; 0,29]
3G - P300 Latenz (ms)	2 (3)	77	Moderat: 2	0,09 [-0,22; 0,41]
3G - P300 Amplitude (μV)	2 (3)	77	Moderat: 2	-0,11 [-0,43; 0,20]

Abkürzungen: SMD = standardisierte mittlere Differenz; KI = Konfidenzintervall.

* Zwei der Studien beinhalteten jeweils zwei Datensätze (Untergruppen von jungen Erwachsenen und älteren Menschen).

Tabelle 1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Metaanalysen von Prins et al.

3 Kommentare des BfS

Die Registrierung eines Protokolls vor der Durchführung einer Übersichtsarbeit zielt laut PRISMA-Richtlinien darauf ab, Verzerrungen zu reduzieren, die Transparenz zu erhöhen, die Prüfung zu erleichtern und das Vertrauen in systematische Übersichtsarbeiten zu verbessern. In der vorliegenden Veröffentlichung [1] gibt es keine Informationen über eine Registrierung oder ein veröffentlichtes Protokoll. Die Übersichtsarbeit bietet jedoch eine ausreichende Beschreibung der Ziele, Methoden und Überlegungen, um die Aussagekraft des Ansatzes zu bewerten.

Die Bewertung des Verzerrungsrisikos ist gut beschrieben. Prins et al. entschieden sich, das Risiko von Übertragungseffekten als „moderates Verzerrungsrisiko, d. h. einige Bedenken“ anstelle von „hohem Verzerrungsrisiko“ einzustufen, wenn die Zeit zwischen den experimentellen Sitzungen weniger als 24 Stunden betrug. Sie argumentieren, dass die Mechanismen von Übertragungseffekten nicht ausreichend bekannt sind und dass sie in Datenanalysen berücksichtigt werden können, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Es bleibt jedoch unklar, ob dies bei der Datenanalyse aller Studien mit Auswaschperioden von weniger als 24 Stunden berücksichtigt wurde. Der Mechanismus hinter Übertragungseffekten ist in der Tat wenig untersucht, aber eine kurze Pause zwischen den Sitzungen scheint nicht ausreichend zu sein, um sie verschwinden zu lassen [6]. Daher wird zur Minimierung des Einflusses eines möglichen Übertragungseffektes in Studien zum Schlaf-EEG [7] oder zur kognitiven Leistungsfähigkeit [8] eine Auswaschperiode von mindestens 24 Stunden empfohlen. Es ist sinnvoll, dieselben Regeln auch auf Studien zu Wach-EEG anzuwenden. Daher wurde das Verzerrungsrisiko für Übertragungseffekte möglicherweise von Prins et al. unterschätzt.

Prins et al. gaben an, dass sie nicht in der Lage waren, die Qualität der Verarbeitung der EEG-Daten und der Expositionsanlagen zu bewerten. Dies ist eine wesentliche Einschränkung, da mögliche Verzerrungen durch diese technischen Faktoren unerkannt bleiben könnten. Obwohl ein mögliches Wissen der Teilnehmer über die Exposition im Zuge der Bewertung des Verzerrungsrisikos beurteilt wurde, bedeutet die fehlende Bewertung des Expositionsaufbaus eine zusätzliche potenzielle Quelle von Verzerrungen. Dies liegt daran, dass die Wirksamkeit von Verblindungsmaßnahmen zur Verhinderung einer möglichen Wahrnehmung der Exposition, z. B. durch Geräusche oder Wärme, nicht beurteilt werden konnte. Zudem wurde ein möglicher Publikationsbias nicht berücksichtigt.

Um die Ergebnisse einer systematischen Übersichtsarbeit korrekt zu interpretieren, ist es wichtig, die Sicherheit der Evidenz der Ergebnisse zu bewerten, z. B. durch die Anwendung von GRADE (Grading of Recommendations Assessment, Development, and Evaluation) [9]. Eine solche Bewertung wurde von Prins et al. nicht durchgeführt. Daher ist es schwierig zu beurteilen, wie zuverlässig die Ergebnisse sind.

Prins et al. fanden keine Wirkungen einer HF-EMF-Exposition auf ERP, die während kognitiver Aufgaben aufgezeichnet wurden. Dies stimmt mit den Ergebnissen einer systematischen Übersichtsarbeit von Pophof et al. über die Auswirkungen einer HF-EMF-Exposition auf die kognitive Leistungsfähigkeit von Menschen [2] überein, die 14 der von Prins et al. eingeschlossenen Studien zu ERP ebenfalls enthielt. Pophof et al. kommen zu dem Schluss, dass es meist moderate bis hohe Sicherheit für die Evidenz gibt, dass eine kurzfristige HF-EMF-Exposition bei SAR-Werten unterhalb der empfohlenen Grenzwerte [10] die untersuchten Bereiche der kognitiven Funktion nicht negativ beeinflusst.

Expertengremien haben die Evidenz für die Auswirkungen einer HF-EMF-Exposition auf die Gehirnfunktion bewertet: Die Deutsche Strahlenschutzkommission gibt an, dass es eingeschränkte Evidenz für Auswirkungen einer HF-EMF-Exposition auf Wach-EEG und eingeschränkte bis unzureichende Evidenz für Wirkungen auf ERP gibt [11]. Das internationale wissenschaftliche Komitee SCHEER (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks) schlussfolgert, dass die unter HF-EMF-Exposition beobachteten Veränderungen des EEG mit biologischen Wirkungen verbunden sein könnten, aber keine nachteiligen gesundheitlichen Auswirkungen haben [12]. Die vorliegende Studie von Prins et al. [1] fasst systematisch den derzeitigen Wissensstand über die Auswirkungen von HF-EMF auf das EEG im Wachzustand zusammen. Ihr Ergebnis, dass es mögliche Wirkungen einer HF-EMF-Exposition auf das Wach-EEG gibt, stimmt mit den obigen Aussagen überein, muss jedoch durch weitere qualitativ hochwertige Studien untermauert werden.

Referenzen

- [1] Prins, AC, Baas, K, van der Meer, JN, Jacobs, M, Nederveen, AJ. The effect of mobile phone electromagnetic fields on the human resting state wake EEG and event-related potential: A systematic review and meta-analysis. *Bioelectromagnetics*. 2025; 46(1):e22531.
DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.22531>.
- [2] Pophof, B, Kuhne, J, Schmid, G, Weiser, E, Dorn, H, Henschenmacher, B, Burns, J, Danker-Hopfe, H, Sauter, C. The effect of exposure to radiofrequency electromagnetic fields on cognitive performance in human experimental studies: Systematic review and meta-analyses. *Environment International*. 2024; 191:108899.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108899>.
- [3] Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF), Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Spotlight on "The effect of exposure to radiofrequency electromagnetic fields on cognitive performance in human experimental studies: Systematic review and meta-analyses" by Pophof et al. in *Environment International* (2024). *Spotlight on EMF Research*; Spotlight - Jan/2025 no.1.
URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0221-2025011649475>.
- [4] Page, MJ, McKenzie, JE, Bossuyt, PM, et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *PLoS Medicine*. 2021; 18(3):e1003583.
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003583>.
- [5] Sterne, JAC, Savovic, J, Page, MJ, et al. RoB 2: A revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ*. 2019; 366:l4898.
DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.l4898>.
- [6] Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF), Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Spotlight on "Effects of mobile phone electromagnetic fields on brain waves in healthy volunteers" by van der Meer et al. in *Scientific Reports* (2023). *Spotlight on EMF Research*; Spotlight - Dec/2024 no.4.
URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2024121749259>.
- [7] Danker-Hopfe, H, Eggert, T, Dorn, H, Sauter, C. Effects of RF-EMF on the human resting-state EEG - the inconsistencies in the consistency. Part 1: Non-exposure-related limitations of comparability between studies. *Bioelectromagnetics*. 2019; 40(5):291-318.
DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.22194>.
- [8] Regel, SJ, Achermann, P. Cognitive performance measures in bioelectromagnetic research - critical evaluation and recommendations. *Environmental Health*. 2011; 10:10.
DOI: <https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-10>.
- [9] Guyatt, GH, Oxman, AD, Schunemann, HJ, Tugwell, P, Knottnerus, A. GRADE guidelines: A new series of articles in the *Journal of Clinical Epidemiology*. *Journal of Clinical Epidemiology*. 2011; 64(4):380-382.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2010.09.011>.
- [10] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*. 2020; 118(5):483-524.
DOI: <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210>.
- [11] Strahlenschutzkommission des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (SSK). *Elektromagnetische Felder des Mobilfunks im Zuge des aktuellen 5G-Netzausbaus – Technische Aspekte und biologische Wirkungen im unteren Frequenzbereich (FR1, bis ca. 7 GHz) : Stellungnahme*. 2021.
URL: https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/2021/2021-12-10_Stgn_5G_Mobilfunk.html.

- [12] Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER). *Opinion on the need of a revision of the annexes in the Council Recommendation 1999/519/EC and Directive 2013/35/EU, in view of the latest scientific evidence available with regard to radiofrequency (100 kHz - 300 GHz).* 2023.
URL: https://health.ec.europa.eu/system/files/2023-06/scheer_o_044.pdf.

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

www.bfs.de

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: spotlight@bfs.de

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2025090854670

Spotlight - Sep/2025 no.2 (Deu)