



Bundesamt
für Strahlenschutz

Spotlight on EMF Research

Spotlight on “Long-term residential magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality: An 18-year nationwide cohort study in Switzerland” by Sandoval-Diez et al. in Environment International (2026)

Kategorie [Statische und niederfrequente Felder, Epidemiologische Studie]

Spotlight - Apr/2026 no.2 (Deu)

Kompetenzzentrum Elektromagnetische Felder (KEMF)

1 Kontext

Niederfrequente Magnetfelder (NF-MF) sind allgegenwärtig, treten in der Allgemeinbevölkerung jedoch typischerweise nur in niedrigen Expositionsstärken auf. NF-MF sind von der IARC (International Agency for Research on Cancer) hauptsächlich auf der Grundlage epidemiologischer Studien zu kindlicher Leukämie als möglicherweise krebserzeugend für den Menschen (Gruppe 2B) [2] eingestuft worden. Für nicht-kanzerogene Endpunkte, insbesondere neurodegenerative Erkrankungen, ist die Evidenz bisher begrenzt und uneinheitlich. Ein großer Teil der vorhandenen epidemiologischen Literatur zu neurodegenerativen Erkrankungen und NF-MF stammt aus beruflichen Settings mit vergleichsweise hohen Expositionen und komplexen Ko-Expositionen. Für häusliche NF-MF haben nur wenige bevölkerungsbasierte Studien Endpunkte wie Alzheimer, andere Demenzformen, Amyotrophe Lateralsklerose (ALS), Parkinson und Multiple Sklerose untersucht, in der Regel mit nur wenigen hoch-exponierten Studienteilnehmern und uneinheitlichen Expositionsmaßen.

Vor diesem Hintergrund erweitert die landesweite Schweizer Kohortenstudie von Sandoval-Diez et al. [1] die Evidenzbasis zu Exposition am Wohnort gegenüber NF-MF und Sterblichkeit an neurodegenerativen Erkrankungen. Sie baut unmittelbar auf einer früheren Analyse der Swiss National Cohort (SNC) von Huss et al. auf, in der eine erhöhte Sterblichkeit an Alzheimer in der Nähe von Hochspannungsleitungen beobachtet wurde. Die neue Studie verlängert die Nachbeobachtungszeit auf 18 Jahre, verbessert die Expositionsbewertung durch den Einsatz validierter Abstandsmodelle und berücksichtigt erstmals in der Allgemeinbevölkerung sowohl Hochspannungsleitungen als auch die Exposition am Wohnort gegenüber NF-MF durch Bahnlinien.

2 Resultate und Schlussfolgerungen aus der Perspektive von Sandoval-Diez et al.

Sandoval-Diez et al. [1] nutzten Daten der Swiss National Cohort, einer Kohorte von 3.555.064 Erwachsenen im Alter von 30 Jahren oder älter zu Beginn der Studie und verfolgten diese von 2001 bis 2018. Daraus ergaben sich 55.377.543 Personenjahre Beobachtungszeit. Die Mortalität durch neurodegenerative Erkrankungen wurde anhand nationaler Sterberegister erhoben und umfasste Alzheimer (ICD 10 G30), andere Demenzformen (F01, F03), ALS (G12.2), Parkinson (G20) und Multiple Sklerose (G35). Die Todesursache wurde berücksichtigt, wenn sie als primäre, begleitende, nachfolgende oder initiale Todesursache aufgeführt war.

Mit Hilfe von Cox-Proportional-Hazards-Modellen wurde das Risiko, an einer bestimmten neurodegenerativen Todesursache in Abhängigkeit von der NF-MF-Exposition zu sterben, über das sogenannte Hazard Ratio (HR) berechnet. Die Exposition ging in das Modell sowohl kategoriell ein als auch als kontinuierliche Variable. Für letzteres wurde das Risiko pro Anstieg der NF-MF-Exposition um 1 μT berechnet. In den Modellen mit Alter als zugrunde liegender Zeitskala wurde nach Geschlecht, Sprachregion und Follow-up-Intervall stratifiziert; und adjustiert für Nationalität, Muttersprache, Familienstand, Bildung, sozioökonomische Position der Nachbarschaft, Grad der Urbanität, Luftverschmutzung (NO_2), Verkehrslärm und Wohnumgebung mit Begrünung.

Die Exposition am Wohnort gegenüber NF-MF aus 220–380 kV Hochspannungsleitungen (Frequenz 50 Hz) und aus Bahnlinien (Frequenz 16,7 Hz) wurde mit Hilfe von Abstandsmodellen geschätzt. Diese Modelle wurden aus publizierten Mess- und Modellierungsdaten abgeleitet. Mit Hilfe nichtlinearer Regression wurde der Zusammenhang zwischen in der Literatur berichteter NF-MF-Exposition und Distanzdaten modelliert und die Modelle anhand von Innenraummessungen in 59 Wohnungen validiert. Die Korrelationen zwischen modellierten und gemessenen NF-MF waren moderat für 220–380 kV Hochspannungsleitungen (Spearman $r \approx 0,6$ – $0,7$) und hoch für Bahnlinien ($r \approx 0,8$ – $0,9$). Auf Grundlage von zensusverknüpften Wohnadressenverläufen wurde die individuelle Langzeitexposition als zeitgewichteter Mittelwert über vier überlappende 10-Jahres-Fenster berechnet, die den aufeinanderfolgenden Follow-up-Intervallen vorausgehen. Hierdurch wurden Wohnortwechsel explizit berücksichtigt. Dafür wurde der Beobachtungszeitraum in vier Zeiträume unterteilt (2001–2005, 2006–2010, 2011–2015, 2016–2018). Für jeden Zeitraum wurde ein vorangehendes 10-Jahres-Expositionsfenster definiert (1991–2001, 1996–2006, 2001–2011, 2006–2016), um die Langzeitexposition gegenüber NF-MF zu charakterisieren. Innerhalb jedes 10-Jahres-Fensters rekonstruieren die Au-

toren die individuellen Wohnverläufe, bestimmen die an jeder Adresse verbrachten Jahre und berechnen einen Durchschnitt der modellierten NF-MF, um die Langzeitexposition für Krankheiten mit langer Induktions- und Latenzzeit besser zu approximieren und Fehlklassifikationen durch Wohnortwechsel zu verringern.

In der Studienpopulation betrug die mediane Langzeitexposition gegenüber NF-MF von Hochspannungsleitungen $0,01 \mu\text{T}$ (Mittelwert $0,02 \mu\text{T}$), wobei $0,3 \%$ der Personen Werten über $0,3 \mu\text{T}$ ausgesetzt waren. Die NF-MF-Exposition durch Bahnlinien war höher (Median $0,03 \mu\text{T}$, Mittelwert $0,06 \mu\text{T}$), mit $2,4 \%$ der Personen bei Werten über $0,3 \mu\text{T}$.

Es wurde ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen der Langzeitexposition gegenüber NF-MF von Hochspannungsleitungen und der Sterblichkeit an Alzheimer und anderen Demenzformen beobachtet. Pro Anstieg der NF-MF-Exposition um $1 \mu\text{T}$ lag das Hazard Ratio (HR) bei $1,54$ (95 %-KI $1,23-1,92$) für Alzheimer und bei $1,31$ (95 %-KI $1,13-1,52$) für andere Demenzformen. Bezüglich NF-MF-Exposition durch Bahnlinien war keines der Risiken erhöht (Alzheimer: HR = $1,08$ (95 %-KI $0,99-1,18$), andere Demenzformen: HR = $0,99$ (95 %-KI $0,94-1,04$)).

Wenn die NF-MF-Exposition durch Hochspannungsleitungen kategorisiert wurde, zeigte sich ein positiver Trend im Mortalitätsrisiko für Alzheimer und andere Demenzformen über die mittleren Expositionskategorien ($0,05- < 0,10 \mu\text{T}$ und $0,10- < 0,30 \mu\text{T}$), jedoch nicht für die höchste Kategorie ($\geq 0,30 \mu\text{T}$), in der die Schätzungen nahe bei 1 lagen und breitere Konfidenzintervalle aufwiesen. Für die NF-MF-Exposition durch Bahnlinien zeigte sich in den kategorialen Analysen für keinen Endpunkt ein Trend.

Insgesamt beobachteten die Autoren für ALS, Parkinson und Multiple Sklerose konsistent Nullbefunde über kontinuierliche und kategoriale Expositionsmaße hinweg sowie in mehreren Sensitivitäts- und Subgruppenanalysen.

Die Autoren schließen daraus, dass die Ergebnisse ihrer Studie auf einen möglichen Zusammenhang zwischen langzeitiger Exposition am Wohnort gegenüber NF-MF von Hochspannungsleitungen und einer erhöhten Mortalität durch Alzheimer und andere Demenzformen hinweisen. Für ALS, Parkinson oder Multiple Sklerose finden sie keine Hinweise auf einen Zusammenhang. Für die NF-MF-Exposition durch Bahnlinien waren die beobachteten Assoziationen schwächer und nach Adjustierung für Umwelt-Ko-Expositionen nicht mehr vorhanden. Sandoval-Diez et al. merken an, dass aufgrund der Seltenheit hoher NF-MF-Exposition durch Hochspannungsleitungen oder Bahnlinien die bevölkerungsbezogenen attributablen Anteile für Alzheimer bei etwa $1,01 \%$ für die NF-MF-Exposition durch Hochspannungsleitungen und $0,43 \%$ für die NF-MF-Exposition durch Bahnlinien lägen, vorausgesetzt, die Assoziationen sind kausal. Zugleich betonen sie, dass ein Ableiten eines möglicherweise kausalen Zusammenhangs durch das Fehlen etablierter biologischer Mechanismen eingeschränkt bleibt, dass verbleibendes Confounding nicht vollständig ausgeschlossen werden kann und dass ihre Ergebnisse als Beitrag zur laufenden Debatte über NF-MF und neurodegenerative Erkrankungen zu verstehen sind, diese aber nicht abschließen.

3 Kommentare des BfS

Die Studie von Sandoval-Diez et al. [1] befasst sich mit einem Thema von hoher Relevanz für die öffentliche Gesundheit. Demenz, insbesondere die Alzheimer-Demenz, ist eine der führenden Todesursachen in alternenden Bevölkerungen [3, 4]. Belastbare Evidenz zu potenziell modifizierbaren umweltbedingten Risikofaktoren ist rar [5]. Diese Arbeit ist nach unserem Kenntnisstand die bislang größte epidemiologische Studie zu möglichen Zusammenhängen zwischen NF-MF-Exposition am Wohnort und Mortalität durch neurodegenerative Erkrankungen, mit landesweiter Abdeckung für die Schweiz, 18 Jahren Follow-up und einer detaillierten Nutzung von Wohnverlaufdaten.

Eine zentrale Stärke ist die Einbeziehung von Langzeitexpositionsmaßen. Zeitlich abhängige, zeitgewichtete Durchschnitte der Exposition über die jeweils vorangehenden 10 Jahre, kombiniert mit rekonstruierten Wohnortwechseln, liefern eine realistischere Abbildung langzeitiger Expositionsmuster. Dieser Ansatz ist methodisch besser auf die langen Induktions- und Latenzzeiten ausgerichtet, die für neurodegenerative Erkrankungen typisch sind. Er geht damit über viele frühere NF-MF-Krebsstudien hinaus, die sich auf eine einzelne

Adresse zum Zeitpunkt der Diagnose stützten. Dies ist auch in einer aktuellen Studie, der Fall-Kontroll-Studie von Mancini et al. [6] zu Leukämie im Kindesalter und NF-MF, der Fall. In dieser Arbeit wurde die Exposition gegenüber NF-MF durch Hochspannungsleitungen nur zu einem Zeitpunkt (Adresse bei Diagnose/Aufnahme) ohne Wohnverlauf modelliert. Für langsam verlaufende Erkrankungen wie Demenz erscheint das langzeitige, mobilitätsadjustierte Maß von Sandoval-Diez et al. besonders geeignet.

Wie in jeder Beobachtungsstudie bestehen jedoch Unsicherheiten in der Expositionsabschätzung. Sandoval-Diez et al. stützen sich auf vereinfachte, distanzbasierte Modelle, die per Design weder Innenraumquellen (z. B. Hausinstallation, Haushaltsgeräte) noch berufliche NF-MF-Exposition erfassen, obwohl diese zu den individuellen Langzeitdurchschnitten der Exposition beitragen können. Zudem wenden sie distanzbasierte Abstandsmodelle für 220–380-kV-Leitungen und Bahnlinien an, die empirisch anhand von Innenraummessungen in 59 Wohnungen validiert wurden. Für 220–380-kV-Leitungen korrelierten modellierte und gemessene Felder nur moderat, was auf eine beträchtliche unerklärte Variabilität hinweist. Die Distanz zu 36–150-kV-Leitungen war im Wesentlichen unkorreliert mit den gemessenen Feldern, sodass diese Quellen nicht für die Expositionsmodellierung verwendet wurden. Der Ausschluss von 36–150-kV-Leitungen verhindert, dass zusätzliches Rauschen in die modellierte Exposition eingebracht wird, lässt aber einen Teil der infrastrukturalen Beiträge zur gesamten NF-MF-Exposition unberücksichtigt. Diese Konstellation dürfte in erster Linie zu nicht-differenzieller Fehlklassifikation der Exposition führen, mit einer Tendenz, wahre Zusammenhänge zu unterschätzen, anstatt sie zu überschätzen.

Mehrere weitere Limitationen sind für die Interpretation der Ergebnisse bedeutsam. Erstens waren, trotz der sehr großen Kohorte, nur 0,3 % der Teilnehmenden über längere Zeiträume NF-MF-Expositionen $\geq 0,3 \mu\text{T}$ durch Hochspannungsleitungen ausgesetzt (2,4 % für Bahnlinien). Ergebnisse für kontinuierliche Exposition werden daher überwiegend von Kontrasten im niedrigen Expositionsbereich bestimmt, und kategoriale Schätzungen am oberen Rand der Verteilung sind unpräzise. Beide Analysen sind dadurch beeinträchtigt. Zweitens werden Strom- und Bahnnetze als statisch behandelt; als Quelle zeitlicher Variation der Exposition wird nur die Wohnmobilität berücksichtigt. Drittens liegen keine individuellen Daten zu beruflicher NF-MF-Exposition, Lebensstilfaktoren und Krankengeschichte vor, sodass verbleibendes Confounding nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, auch wenn weitere Analysen nahelegen, dass ein unbeobachteter Confounder in moderatem bis starkem Ausmaß sowohl mit Exposition als auch mit Outcome assoziiert sein müsste, um die beobachteten Demenzrisiken vollständig zu erklären.

Eine weitere wichtige Limitation betrifft die Validität von Angaben auf Todesbescheinigungen, die ein mögliches Fehlklassifikationsrisiko mit sich bringt, insbesondere für Demenz [7] und Parkinson [8], die untererfasst sein können. Da das Ausmaß der Untererfassung möglicherweise nach sozioökonomischem Status variiert und sozioökonomischer Status sowohl mit Exposition als auch mit Diagnose korreliert, kann ein Bias nicht a priori ausgeschlossen werden. Allerdings veränderte die Adjustierung für Bildung und Swiss-SEP (Swiss socioeconomic position index) die Risikoschätzer nicht wesentlich, und das Muster von Nullbefunden für ALS [9] und Parkinson [10] steht im Einklang mit früheren Studien zur Exposition am Wohnort, sodass größere Verzerrungen insgesamt unwahrscheinlich erscheinen.

Im Kontext systematischer Reviews und Metaanalysen sind die Ergebnisse von Sandoval-Diez et al. zur Demenz kompatibel mit moderaten Risikozunahmen, die für berufliche NF-MF-Exposition berichtet wurden [11, 12], und mit Bewertungen von Fachgremien wie SCHEER [13], die die Evidenz als schwach einordnen. Für ALS zeigen Metaanalysen moderate Zusammenhänge in hoch-exponierten Arbeitsplätzen [14], jedoch nicht am Wohnort [9]. Die Nullbefunde bei Sandoval-Diez et al. stimmen für die Wohnexposition mit diesem Muster überein. Bezüglich Parkinson kommt eine systematische Übersichtsarbeit, die sowohl berufliche als auch wohnbezogene Studien einbezieht, zu dem Schluss, dass die Evidenz für einen NF-MF-Effekt nicht überzeugend ist [10]. Das ist wiederum im Einklang mit den hier berichteten Nullassoziationen.

Zusammenfassend leistet die Studie von Sandoval-Diez et al. einen wichtigen Beitrag zur Evidenzlage zu NF-MF und neurodegenerativen Erkrankungen, insbesondere durch ihre Langzeit-, mobilitätsadjustierte Expositionsabschätzung und die erstmalige Einbeziehung von NF-MF-Exposition durch Bahnlinien. Die beobachteten positiven Zusammenhänge zwischen langzeitiger Wohnexposition gegenüber NF-MF aus Hochspannungsleitungen und Demenzmortalität rechtfertigen weitergehende Forschung. Angesichts der geringen Prävalenz höherer Expositionen, der Abhängigkeit von distanzbasierter Modellierung ohne detaillierte Lastverläufe, der

Verwendung von Mortalitätsdaten und des Fehlens etablierter biophysikalischer Mechanismen ist die bisherige Evidenz jedoch unzureichend, um einen kausalen Zusammenhang zu belegen. Vielmehr unterstreicht die Studie den Bedarf an groß angelegten und gepoolten Analysen mit harmonisierter Expositionsbewertung auf Individualebene (wohnbezogen, beruflich und innenraumbezogen), flankiert von vertiefter mechanistischer und experimenteller Forschung zu NF-MF und neurodegenerativen Erkrankungen.

Referenzen

- [1] Sandoval-Diez, N, Loizeau, N, Huss, A, Rössli, M, Vienneau, D. Long-term residential magnetic field exposure and neurodegenerative disease mortality: An 18-year nationwide cohort study in Switzerland. *Environment International*. 2026; 208:110145.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2026.110145>.
- [2] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. *Non-ionizing radiation, part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields*. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans 80. Lyon: IARC Press, 2002.
URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12071196/>.
- [3] Liu, W, Deng, W, Gong, X, Ou, J, Yu, S, Chen, S. Global burden of Alzheimer's disease and other dementias in adults aged 65 years and over, and health inequality related to SDI, 1990-2021: Analysis of data from GBD 2021. *BMC Public Health*. 2025; 25:1256.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s12889-025-22378-z>.
- [4] Yu, DT, Li, RX, Sun, JR, Rong, XW, Guo, XG, Zhu, GD. Global mortality, prevalence and disability-adjusted life years of Alzheimer's disease and other dementias in adults aged 60 years or older, and the impact of the COVID-19 pandemic: A comprehensive analysis for the global burden of disease 2021. *BMC Psychiatry*. 2025; 25:503.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s12888-025-06661-2>.
- [5] Jones, A, Ali, MU, Mayhew, A, Aryal, K, Correia, RH, Dash, D, Manis, DR, Rehman, A, O'Connell, ME, Taler, V, Costa, AP, Hogan, DB, Wolfson, C, Raina, P, Griffith, L. Environmental risk factors for all-cause dementia, Alzheimer's disease dementia, vascular dementia, and mild cognitive impairment: An umbrella review and meta-analysis. *Environmental Research*. 2025; 270:121007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121007>.
- [6] Mancini, M, Hemon, D, Faure, L, Clavel, J, Goujon, S. Residential exposure to magnetic field due to high-voltage power lines and childhood leukemia risk in mainland France - GEOCAP case-control study, 2002-2010. *Environmental Research*. 2025; 278:121638.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121638>.
- [7] Hobson, P, Meara, J. Mortality and quality of death certification in a cohort of patients with Parkinson's disease and matched controls in North Wales, UK at 18 years: A community-based cohort study. *BMJ Open*. 2018; 8(2):e018969.
DOI: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-018969>.
- [8] Benito-Leon, J, Louis, ED, Villarejo-Galende, A, Romero, JP, Bermejo-Pareja, F. Under-reporting of Parkinson's disease on death certificates: A population-based study (NEDICES). *Journal of the Neurological Sciences*. 2014; 347(1-2):188-192.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jns.2014.08.048>.
- [9] Rössli, M, Jalilian, H. A meta-analysis on residential exposure to magnetic fields and the risk of amyotrophic lateral sclerosis. *Reviews on Environmental Health*. 2018; 33(3):309-313.
DOI: <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0019>.
- [10] Huss, A, Koeman, T, Kromhout, H, Vermeulen, R. Extremely low frequency magnetic field exposure and Parkinson's disease: A systematic review and meta-analysis of the data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015; 12(7):7348-7356.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph120707348>.
- [11] Jalilian, H, Teshnizi, SH, Rössli, M, Neghab, M. Occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and risk of Alzheimer disease: A systematic review and meta-analysis. *Neurotoxicology*. 2018; 69:242-252.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.12.005>.

- [12] Gunnarsson, L-G, Bodin, L. Occupational exposures and neurodegenerative diseases: A systematic literature review and meta-analyses. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019; 16(3):337.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16030337>.
- [13] SCHEER (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks). *Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF): Update with regard to frequencies between 1 Hz and 100 kHz – final opinion*. 2025.
DOI: <https://doi.org/10.2875/3515904>.
- [14] Huss, A, Peters, S, Vermeulen, R. Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of ALS: A systematic review and meta-analysis. *Bioelectromagnetics*. 2018; 39(2):156–163.
DOI: <https://doi.org/10.1002/bem.22104>.

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:0221-2026041559872

Spotlight - Apr/2026 no.2 (Deu)