# EMF UND GESUNDHEIT

## Stand der medizinischen Forschung

April 2026

**Verfasser:**

**ao.Univ.-Prof. Dr.med.univ. Gerald Haidinger**
**Facharzt für Sozialmedizin / Facharzt für Public Health**
**1180 Wien**

# Management Summary

Seit Ende der 1970er-Jahre wird weltweit intensiv zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen niederfrequenter elektromagnetischer Felder (ELF-EMF) geforscht. In diesen mehr als vier Jahrzehnten wurde eine große Zahl epidemiologischer Studien, gepoolter Analysen, Tierexperimente, In-vitro-Studien sowie mechanistischer Untersuchungen durchgeführt. Aufbauend auf dieser breiten Forschungsbasis konnte bis heute kein wissenschaftlich belegter Wirkmechanismus identifiziert werden, durch den niederfrequente Magnetfelder Krebs oder andere chronische Erkrankungen verursachen könnten.

Insbesondere für Leukämie im Kindesalter – die am häufigsten untersuchte Fragestellung – zeigen aktuelle große internationale Datensätze und Metaanalysen ein abnehmendes bis nicht mehr nachweisbares Risiko. Die in früheren Publikationen berichteten statistischen Assoziationen werden heute überwiegend als Ergebnis von methodischen Limitationen, Zufall oder Bias interpretiert. Für alle anderen Krebsarten – sowohl bei Kindern als auch bei Erwachsenen – besteht keine belastbare Evidenz für einen Zusammenhang mit ELF-EMF. Zudem liefern auch Tier- und Zellstudien keine Hinweise auf kausale biologische Effekte.

Die Bewertungen internationaler Fachgremien (WHO, IARC, ICNIRP, SCHEER/SCENIHR) kommen übereinstimmend zu dem Schluss, dass keine ausreichend starke Evidenz für einen kausalen Zusammenhang zwischen EMF-Exposition unterhalb der Grenzwertempfehlungen der ICNIRP (200 µT, 5 kV/m, LF Guidelines 2010) und gesundheitsschädlichen Wirkungen besteht. Epidemiologische Hinweise aus der Literatur sind schwach, nicht konsistent reproduzierbar und durch das Fehlen eines plausiblen Wirkmechanismus nicht kausal interpretierbar.

Insgesamt zeigt der aktuelle Forschungsstand, dass trotz jahrzehntelanger intensiver wissenschaftlicher Untersuchungen kein Nachweis eines gesundheitsschädlichen Effekts durch niederfrequente EMF vorliegt und die bestehenden Grenzwertempfehlungen der ICNIRP ein hohes Schutzniveau gewährleisten. Bei Einhaltung der geltenden Expositionsgrenzwerte für die Bevölkerung und für exponierte Arbeitnehmer:innen kann eine Gefährdung für die Gesundheit der Menschen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, da keinerlei Hinweise auf biologische Effekte existieren.

# Einleitung

Wissenschaftler:innen orientieren sich an der verfügbaren wissenschaftlichen Evidenz. Sie nutzen epidemiologische Daten, systematische Risikoabschätzungen und Vergleiche, um Risiken realistisch einzuordnen. Dieser Ansatz erbringt, welche Risiken tatsächlich belegt sind, welche nicht und in welchen Bereichen Unsicherheiten bestehen. Ziel ist es, im Sinne einer Förderung der Health Literacy, informierte Entscheidungen zu ermöglichen und gleichzeitig nicht begründete Sorge zu vermeiden.

Für eine verantwortungsvolle Risikokommunikation ist dieser Zugang entscheidend. Er nimmt Sorgen ernst und versucht, sie durch nachvollziehbare Informationen zu entkräften. Denn langfristig stärkt es die öffentliche Gesundheit und das Vertrauen in Wissenschaft und Institutionen, wenn Risiken realistisch erklärt werden.

Die von Stromleitungen abgegebenen niederfrequenten elektromagnetischen Felder (ELF-EMF), verfügen nicht über genügend Energie, um Zellen zu schädigen und Krebs auszulösen. Auch alle neueren Studien zeigen keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber Magnetfeldern und einem Risiko für Leukämie, auch nicht für Leukämie im Kindesalter. Für Erwachsene wurde ebenfalls kein Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber Magnetfeldern und Gesundheitsrisiken festgestellt [1].

Die humanmedizinisch relevante Forschung zur Bewertung des Gesundheitsrisikos elektromagnetischer Felder (EMF) lässt sich in verschiedene Bereiche unterteilen, darunter epidemiologische Studien, experimentelle Studien an Menschen und Tieren sowie In-vitro-Studien (an tierischen oder menschlichen Zellen). Auch Studien zu biophysikalischen Mechanismen, Dosimetrie und Expositionsbewertung können gegebenenfalls Berücksichtigung finden. Eine Gesundheitsrisikobewertung wertet die Evidenz innerhalb jedes dieser Bereiche aus, um sie schließlich aus allen Bereichen zusammenzuführen und eine kombinierte Bewertung zu erstellen. Diese kombinierte Bewertung sollte die Frage beantworten, ob eine Gesundheitsgefährdung für den Menschen besteht, also ob ein kausaler Zusammenhang zwischen Exposition und einer die Gesundheit schädigenden Wirkung besteht. Die Antwort auf diese Frage ist epidemiologisch gesehen kein eindeutiges Ja oder Nein, sondern es wird die Wahrscheinlichkeit des Vorliegens einer Gefährdung in Form eines Risikos (Relatives Risiko, Odds Ratio, Hazard Rate) ausgedrückt. Wird eine solche Gefährdung als gegeben angesehen, sollte die Risikobewertung auch das Ausmaß der Wirkung berücksichtigen und diese im Zusammenhang mit bestehenden und gültigen Grenzwerten einordnen.

Für die Beurteilung von Auswirkungen auf den Menschen ist die Epidemiologie per Definition eine essentielle und primäre Quelle der Evidenz, da sie sich mit realen Expositionen unter realistischen Bedingungen befasst. Die epidemiologischen Daten erhalten daher in der Gesamtbewertungsphase ein höheres Gewicht. Epidemiologische Daten müssen jedoch durch experimentelle Studien untermauert werden, um einen kausalen Zusammenhang zwischen Exposition und Gesundheit herzustellen. Wo dies relevant und möglich ist, werden auch Auswirkungen auf andere Spezies berücksichtigt. Ein Beispiel, das einige der Schwierigkeiten bei einer Gesamtbewertung verdeutlicht, ist die Bewertung von ELF-Magnetfeldern und deren möglicher kausaler Zusammenhang mit Leukämie im Kindesalter. Ältere epidemiologische Studien zeigten einen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber ELF-Magnetfeldern und einem leicht erhöhten Risiko für das Auftreten von Leukämie im Kindesalter. Allerdings fehlen Belege für einen kausalen Zusammenhang aus Beobachtungen in experimentellen Modellen, und ein plausibler biophysikalischer Wirkmechanismus ist nicht vorhanden. Dies hat die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC, 2002) auf Basis der damaligen Datenlage dazu veranlasst, ELF-Magnetfelder als „möglicherweise krebserregend für den Menschen“ (Gruppe 2B) einzustufen. Diese Gruppe umfasst viele verschiedene Stoffe (Aloe Vera-Extrakt, Ruß, Motorenabgase, Chloroform, div. Fungizide, div. Reinigungsmittel), bei denen eine karzinogene Wirkung wissenschaftlich nicht ausgeschlossen werden kann, aber keine eindeutige Evidenz hierfür vorliegt.

## Physikalische Grundlagen

Niederfrequente (ELF) elektromagnetische Felder (EMF) sind Naturerscheinungen, für deren Wahrnehmung der Mensch über kein entsprechendes Organ verfügt. Elektromagnetische Felder werden in einer Struktur durch die elektrische Spannung und den elektrischen Strom verursacht.

Man unterscheidet Wechselfelder – wie im vorliegenden Fall – deren Größe sich mit der Zeit periodisch ändert und Gleichfelder, die keine Änderung in der Zeit erfahren. Wechselfelder werden in Bezug auf ihren Verlauf, ihre Dauer und ihre Frequenz (Schwingungen pro Sekunde, Einheit Hertz: Hz) weiter unterschieden. In Abhängigkeit von der Frequenz werden nicht-ionisierende Felder (0-300 GHz) und ionisierende ("radioaktive") Strahlen (Frequenzen über 300 GHz) unterschieden. In Österreich wird das öffentliche Stromversorgungsnetz mit Wechselstrom betrieben, der eine Frequenz von 50 Hz aufweist.

Bei niedrigen Frequenzen (z.B. 50 Hz) können elektrische und magnetische Felder unabhängig voneinander bestehen, wobei elektrische Felder durch das Anlegen einer elektrischen Spannung („einschalten" der Hochspannungsleitung) und magnetische Felder durch einen elektrischen Stromfluss (Strom, der im Leiterseil fließt) verursacht werden.

Das elektrische Feld wird durch die elektrische Feldstärke E (Einheit Volt pro Meter, V/m) und durch die magnetische Feldstärke H (Einheit Ampere pro Meter, A/m) charakterisiert. Die magnetische Feldstärke kann auch als magnetische Flussdichte oder magnetische Induktion B (Einheit Tesla, T) angegeben werden:

$$1\ T = 1.000\ mT = 1.000.000\ \mu T.$$

Die Höhe der elektrischen und magnetischen Ersatzfeldstärke nimmt in etwa mit dem Quadrat der Entfernung von der Leitungsachse ab. Dies bedeutet: Der doppelte Abstand reduziert das magnetische Feld auf ein Viertel, ein dreifacher Abstand auf ein Neuntel.

Das elektrische Feld wird durch leitende Körper verzerrt bzw. verändert. Vor allem schirmen Bäume, Erdreich und Gebäudewände das elektrische Feld weitgehend ab.

## Basisrestriktion und Referenzwerte (nach [2])

ELF-Felder stehen hauptsächlich im Zusammenhang mit der Stromversorgung, insbesondere mit der Erzeugung, Verteilung und Nutzung von Wechselstrom. Die hierfür verwendete Frequenz beträgt in Europa 50 Hz. Im Alltag sind Menschen ELF-Feldern in der Nähe von Elektrogeräten und elektronischen Geräten ausgesetzt, auch Stromleitungen sind eine Quelle von ELF-Feldern [2].

Bei der Einwirkung von ELF-Feldern entstehen im Körper elektrische Felder und Ströme, die die körpereigenen elektrischen Felder und Stromflüsse, welche für normale biologische Funktionen notwendig sind, beeinflussen können. Darüber hinaus interagiert das ELF-Feld mit der Oberflächenladung des Körpers. Bei niedrigen Intensitäten unterhalb der Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung bleiben diese Wechselwirkungen meist unbemerkt und beeinträchtigen die Gesundheit nicht [2].

Ab einer bestimmten Schwelle der Exposition rufen die induzierten internen Felder reversible Effekte auf erregbare Zellen im Körper hervor. Dazu gehören beispielsweise ein schwaches Lichtflimmern am Rand des Gesichtsfelds (Phosphene), elektrische Ladungseffekte auf der Haut (ähnlich dem Aufstellen der Haare beim Kämmen) oder eine Stimulation von Nerven und Muskeln, die als Kribbeln wahrgenommen wird. Diese Effekte treten je nach Frequenz des Feldes bei unterschiedlichen Schwellenwerten auf, die jedoch alle um ein Vielfaches oberhalb der ICNIRP Grenzwerte von 200 µT für die magnetische Flussdichte und 5 kV/m für die elektrische Feldstärke (Anm.: jeweils bei einer Frequenz von 50 Hz) liegen. Bei höheren Intensitäten verursacht niederfrequente Strahlung irreversible kardiovaskuläre Schäden oder Gewebeverbrennungen [2]. Um diese Werte in Relation zu

setzen, werden nachfolgend typische Größenordnungen der Feldwerte von neuen Freileitungen bei Nennstrom angegeben:

- Direkt unter eine Freileitung: bis zu 35 µT und 4 kV/m
- In einer Entfernung von 100 m zur Trasse: 2 µT und 0,1 kV/m

Die potenziellen gesundheitlichen Auswirkungen einer langfristigen Exposition gegenüber niederfrequenten Feldern wurden in den letzten Jahrzehnten, beginnend in den 1970/80er Jahren, intensiv untersucht [2].

Ältere epidemiologische Studien deuteten darauf hin, dass eine langfristige Exposition gegenüber 50-60 Hz-Magnetfeldern mit einem leicht erhöhten Risiko für Leukämie im Kindesalter einhergehen könnten. Allerdings werden die früher berichteten statistischen Assoziationen heute überwiegend als Ergebnis von methodischen Limitationen, Zufall oder Bias interpretiert. Darüber hinaus wurde kein biophysikalischer Mechanismus identifiziert, und Ergebnisse aus Tier- und Zell-Laborstudien stützen nicht die Annahme, dass die Exposition gegenüber 50-60-Hz-Magnetfeldern Leukämie im Kindesalter verursacht. Daher lässt sich aus aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht schließen, dass eine Langzeitexposition gegenüber niederfrequenten Feldern Leukämie im Kindesalter auslöst.

Die Evidenz für Krebs bei Erwachsenen durch niederfrequente Feldexposition ist sehr schwach. Es gibt keine stichhaltigen wissenschaftlichen Belege für einen Zusammenhang zwischen niederfrequenter Feldexposition und Morbus Parkinson, Multipler Sklerose, Entwicklungs- und Reproduktionsstörungen sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Für Alzheimer und die Amyotrophe Lateral-Sklerose (ALS) ist die Evidenzlage unklar. Studien zu Symptomen, Schlafqualität und kognitiven Funktionen lieferten keine konsistenten Hinweise auf einen Effekt dieser Expositionsart [2].

Um gesundheitsrelevante Wechselwirkungen mit niederfrequenten Feldern zu vermeiden, empfiehlt die International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), die Exposition gegenüber diesen Feldern so zu begrenzen, dass der Schwellenwert, ab dem Wechselwirkungen zwischen menschlichen Körper und dem externen elektrischen und magnetischen Feld schädliche Auswirkungen im Körper hervorrufen, nicht erreicht wird. Die Expositionsgrenzwerte, die sogenannte Basisrestriktion, bezieht sich auf den Schwellenwert, ab dem schädliche Auswirkungen auftreten, und berücksichtigen wissenschaftliche Unsicherheiten bei der Bestimmung dieses Schwellenwerts. Sie werden in V/m als induzierte interne elektrische Feldstärke angegeben. Die Expositionsgrenzwerte außerhalb des Körpers, die sogenannten Referenzwerte, werden aus den Basisrestriktionen unter Annahme eines Worst-Case-Szenarios abgeleitet. Das heißt, wer die Referenzwerte (in der Luft) nicht überschreitet, hält auch die Basisrestriktion (im Körper) ein [2].

Basisrestriktion (Basic Restrictions): Dies sind die grundlegenden Expositionsgrenzwerte innerhalb des Körpers. Für ELF-MF werden sie als induzierte interne elektrische Feldstärke (gemessen in Volt pro Meter, V/m) ausgedrückt. Diese Werte liegen unterhalb des Schwellenwerts für nachgewiesene schädliche Gesundheitseffekte [2].

Referenzwerte (Reference Levels): Diese Werte sind für die praktische Anwendung und einfache Messung außerhalb des Körpers vorgesehen (z. B. magnetische Flussdichte in Mikrotesla, µT). Sie werden aus der Basisrestriktion mithilfe von "Worst-Case"-Annahmen abgeleitet. Die Einhaltung der Referenzwerte stellt sicher, dass die Basisrestriktion im Körper nicht überschritten werden [2].

Die ICNIRP wendet einen Sicherheitsfaktor auf die identifizierten Referenzwerte an, um wissenschaftliche Unsicherheiten und die Variabilität in der Bevölkerung zu berücksichtigen und so ein sehr hohes Schutzniveau für die Allgemeinbevölkerung zu gewährleisten. Bei 50 Hz wird ein Sicherheitsfaktor von 5 auf die Schwellenwerte für nachgewiesene biologische Wirkungen angewendet, um die Basisrestriktionen für die Allgemeinbevölkerung festzulegen [3].

Wissenschaftler verwenden komplexe computergestützte Dosisberechnungen und physikalische Modelle des menschlichen Körpers (Phantome), um zu bestimmen, welche externe magnetische Feldstärke genau diese interne elektrische Feldstärke von 0,02 V/m induziert. Diese Modelle berücksichtigen die "Worst-Case"-Orientierung des Körpers zum Feld hin. Sie zeigen, dass eine externe magnetische Flussdichte von 100 µT bzw. externe elektrische Feldstärke von 5 kV/m im menschlichen Körper eine interne elektrische Feldstärke induziert, die unterhalb der Basisrestriktion von 0,02 V/m liegt.

Dieser Sicherheitsfaktor von 5 reduziert die Basisrestriktion für die Allgemeinbevölkerung auf einen Wert, der weit unter dem Schwellenwert liegt, bei dem akute, reversible Effekte wie Nervenstimulation oder Phosphene (Lichtblitze) auftreten. Die Referenzwerte sind die messbaren externen Feldstärken (in Mikrotesla, µT), die bei Exposition die interne Basisrestriktion von 0,02 V/m im menschlichen Körper nicht überschreiten.

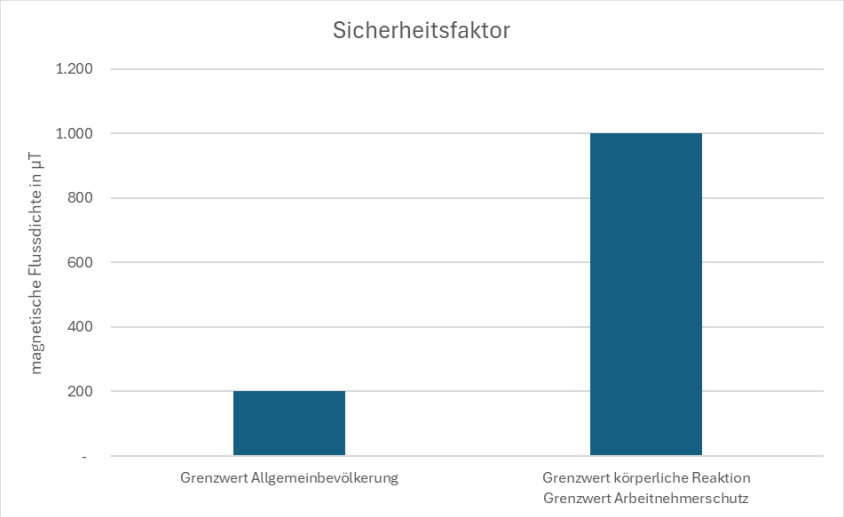


*Abbildung 1: Vergleich Grenzwert magnetische Flussdichte für die Allgemeinbevölkerung zum Grenzwert für körperliche Reaktionen (Sicherheitsfaktor 5)*

Die daraus abgeleiteten Referenzwerte (die externen messbaren Feldstärken in der Umgebung) betragen bei 50 Hz:

Magnetfeld: 200 µT (Mikrotesla) für die allgemeine Öffentlichkeit [3].

Elektrisches Feld: 5 kV/m (Kilovolt pro Meter) für die allgemeine Öffentlichkeit [3].

Die Höhe der elektrischen und magnetischen Ersatzfeldstärke nimmt in etwa mit dem Quadrat der Entfernung von der Leitungsachse ab. Dies bedeutet: Der doppelte Abstand reduziert das magnetische Feld auf ein Viertel, ein verdreifachter Abstand auf ein Neuntel.

Das elektrische Feld wird durch leitende Körper verzerrt bzw. verändert. Vor allem schirmen Bäume, Erdreich und Gebäudewände das elektrische Feld weitgehend ab.

Die Anhebung des Referenzwerts für magnetische Felder bei 50 Hz von 100 µT auf 200 µT in den ICNIRP 2010-Richtlinien [3] war eine Folge von verbesserten wissenschaftlichen Modellen und einer Präzisierung der "Worst-Case"-Annahmen, die den Basisrestriktionen zugrunde liegen.

Die ICNIRP bewertete die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und fortschrittlichere dosimetrische Berechnungen, die besser abbilden, wie magnetische Felder tatsächlich interne elektrische Felder im menschlichen Körper induzieren, neu. Neue "Worst-Case"-Modelle zeigten, dass die vorherigen Annahmen, die zum 100 µT-Referenzwert führten, übermäßig konservativ waren und eine Exposition annahmen, die unter realen Bedingungen extrem unwahrscheinlich war. Mit

präziseren Modellen konnte der externe Referenzwert erhöht werden, während die interne Basisrestriktion (0,02 V/m, 2 mA/m$^2$) weiterhin eingehalten und der Sicherheitsfaktor 5 beibehalten wurde. Die ICNIRP bekräftigte ihren Standpunkt, dass die Richtlinien ausschließlich auf wissenschaftlich belegten akuten Gesundheitseffekten (Nervenstimulation, Phosphene) basieren. Vermutete Langzeitwirkungen, wie das potenzielle Risiko für Kinderleukämie bei Expositionen über 0,3–0,4 µT (welche in einigen epidemiologischen Studien angedeutet wurden), werden als wissenschaftlich nicht hinreichend belegt angesehen, um als Grundlage für Expositionsgrenzwerte zu dienen [3].

Obwohl die ICNIRP den Referenzwert für das magnetische Feld im Jahr 2010 auf 200 µT anhob, behielten viele Länder der Europäischen Union die älteren 100 µT aus der EU-Ratsempfehlung von 1999 bei. Bei Einhaltung eines Grenzwertes von 100 µT für das magnetische Feld ergibt sich damit naturgemäß ein doppelt so hoher Sicherheitsfaktor von 10, d.h. erst bei der 10-fachen Exposition (1000 µT) wird im Körper ein internes elektrisches Feld von 0,02 V/m erzeugt.

## Grenz- und Richtwerte

Im Jahr 1999 hat der **Rat der Europäischen Union** (EU) eine Empfehlung zum Schutz der Bevölkerung bei Einwirken elektromagnetischer Felder (1999/519/EG) verabschiedet [4]. Diese stützt sich auf die *EMF-Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)* der ICNIRP aus dem Jahr 1998 [5]. Die EU-Ratsempfehlung enthält unter anderem Empfehlungen bezüglich der einzuhaltenden Grenzwerte und daraus abgeleiteter Referenzwerte für die Stromversorgung.

Als Referenzwerte für die Stromversorgung (50 Hertz) sind festgelegt:

für elektrische Felder: 5 Kilovolt pro Meter (5 kV/m)

für Magnetfelder: 100 Mikrotesla (100 µT)

Wie oben bereits ausgeführt, hat ICNIRP die Guidelines im Jahr 2010 geändert [3] und empfiehlt für die Frequenz 50 Hz einen Referenzwert von 200 µT für Magnetfelder. Die EU-Ratsempfehlung wurde aber nicht geändert, es bleibt bei dem Referenzwert von 100 µT.

In Österreich gilt außerdem die Verordnung des Bundesministers für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz über den Schutz der Arbeitnehmer:innen vor der Einwirkung durch elektromagnetische Felder (**Verordnung elektromagnetische Felder - VEMF**) [6]. Die Verordnung gilt in Arbeitsstätten, auf Baustellen und an auswärtigen Arbeitsstellen im Sinne des Arbeitsschutzgesetzes für Tätigkeiten, bei denen die Arbeitnehmer:innen während ihrer Arbeit einer Einwirkung durch elektromagnetische Felder ausgesetzt sind oder ausgesetzt sein können. Die niedrigsten Auslösewerte sind bei 50 Hz 1.000 µT für die magnetische Flussdichte B und 10 kV/m für die elektrische Feldstärke E. Durch die Einhaltung der Auslösewerte wird sichergestellt, dass die Expositionsgrenzwerte nicht überschritten werden. Die Auslösewerte werden informativ angeführt. Für besonders gefährdete oder schutzbedürftige Arbeitnehmer:innen gelten die Auslösewerte und Expositionsgrenzwerte gemäß der Empfehlung des Rates 1999/519/EG zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern [4] von 5 kV/m für die elektrische Feldstärke und 100 µT für die magnetische Flussdichte.

Die **OVE-Richtlinie R 23-1**, Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz, Teil 1: Begrenzung der Exposition von Personen der Allgemeinbevölkerung regelt die Exposition der Allgemeinbevölkerung [7] legt einen Referenzwert für das magnetische Feld bei 50 Hz von 200 µT und einen Referenzwert für das elektrische Feld von 5 kV/m fest. Weiters ist die gleichzeitige Exposition gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern zu berücksichtigen. In dieser OVE-Richtlinie ist zur vereinfachten Beurteilung der Exposition gegenüber gleichzeitig auftretenden elektrischen und magnetischen Feldern ein Gesamtexpositionsquotient (GEQ) definiert.

Gemäß der **OVE-Richtlinie R 23-3-1** [8] sind im Falle der Neuerrichtung oder wesentlichen Änderung von Anlagen und Leitungen jedoch bei Überschreitung des Effektivwertes von 100 µT der magnetischen Flussdichte weiterführende Maßnahmen für definierte Aufenthaltsbereiche (z.B. Wohngebäude, Kindergärten, Schulen, gewidmete Spielplätze, Krankenhäuser etc.) zu prüfen.

Für Deutschland sind in der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (**Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV**, [9]) Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor gesundheitlichen Gefahren durch elektrische und magnetische Felder von Gleichstrom- und Niederfrequenzanlagen festgelegt. Die Verordnung gilt seit 1997 und wurde im August 2013 novelliert. Sie beruht auf Empfehlungen der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) und der ICNIRP. Für eine Frequenz von 50 Hz sind eine Feldstärke von 5 kV/m und eine magnetische Flussdichte von 200 µT definiert. Allerdings dürfen Niederfrequenzanlagen mit einer Frequenz von 50 Hertz (das heißt Anlagen der öffentlichen Elektrizitätsversorgung) die Hälfte des Grenzwerts der magnetischen Flussdichte nicht überschreiten. Für diese Anlagen gilt damit auch weiterhin der vor der Novellierung gültige Grenzwert von 100 µT.

In den **Niederlanden** gelten für Strom-Leitungen die Niederfrequenz-Referenzwerte nach den ICNIRP-Empfehlungen. Seit 2005 existiert zusätzlich eine Empfehlung des niederländischen Infrastruktur- und Umwelt-Ministeriums für neu zu errichtende Stromübertragungs-Leitungen in sensiblen Bereichen, wonach eine magnetische Flussdichte von 0,4 µT im Jahresmittel nicht überschritten werden soll. Bei genauer Betrachtung handelt es sich um eine Empfehlung an lokale Behörden, bei neuen Anlagen einen Abstand zwischen Hochspannungsleitungen und „empfindlichen Nutzungen“ (d. h. Wohnungen, Schulen, Kindergärten und Kinderhorte) einzuhalten, so dass Kinder nicht langzeitig Magnetfeldern über 0,4 µT ausgesetzt sind. Der erforderliche Abstand wird anhand eines Jahresmittelwerts bei angenommener 30-prozentiger Auslastung der Leitung bestimmt und ist daher z.B. mit dem deutschen Grenzwert nicht vergleichbar (weil dieser für höchste Anlagenauslastung gilt). Da die Nachrüstung bestehender Leitungen nicht als Neuerrichtung gilt, trifft die Empfehlung außerdem auch nicht auf nachgerüstete Leitungen zu. Für das elektrische Feld gilt unverändert der ICNIRP-Referenzwert von 5 kV/m [10].

Die **Schweiz** hat über eine auf der ICNIRP-Empfehlung basierenden Grenzwertregelung hinaus in ihrer Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV vom Dezember 1999, Verordnung 815.710) zusätzlich auch einen Anlagegrenzwert – vorsorgliche Emissionsbegrenzung für die von einer Anlage allein erzeugte Strahlung – festgeschrieben [11]. Dieser Anlagegrenzwert von 1 µT gilt (neben ebenfalls vorhandenen Regelungen für bestehende Anlagen) für Neuanlagen und soll an Orten mit empfindlicher Nutzung eine vorsorgliche Verminderung der Langzeitbelastung sicherstellen. Dies ist ein Vorsorgewert, um auch hypothetische – wissenschaftlich derzeit nicht bewiesene – Risiken abzudecken. Die Schweizer Verordnung über Anlagegrenzwerte ist die derzeit weltweit strengste vorsorgliche Emissionsbegrenzung mit gesetzlich festgelegter Umsetzung, die aber auch viele Ausnahmeregelungen beinhaltet.

Die in verschiedenen Ländern bzw. von Organisationen empfohlenen und gesetzlich verankerten Grenzwerte stimmen bezüglich der Dauerexposition überein. **Schweden** hat die ICNIRP-Empfehlung übernommen, weist aber darauf hin, dass Maßnahmen zur Verringerung der Exposition umgesetzt werden sollen, wenn es wirtschaftlich vertretbar ist. Vor allem bei neuen Installationen soll bereits bei der Planung auf eine Begrenzung der Exposition geachtet werden.

Die Gesetze in der Schweiz und Italien enthalten für Neuanlagen mit den Anlagengrenzwerten als Vorsorgewerte eine Regelung, die über die österreichischen Empfehlungen sowie jene der anderen Staaten und von Organisationen hinausgeht.

In der folgenden Tabelle sind ausgewählte internationale und nationale Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinbevölkerung für unbegrenzte Expositionsdauer und für zeitlich begrenzte Expositionsdauer zum Schutz beruflich exponierter Personen dargestellt.

| GRENZWERTE FÜR ELEKTRISCHE (E) UND MAGNETISCHE (B) FELDER | | |
|---|---|---|
| | **Frequenz f = 50 Hz** | |
| **Land/Organisation**<br>**Verbindlichkeit/Jahr** | **E (kV/m)** | **B (µT)** |
| Österreich, (Norm, 2017; Verordnung<br>Allgemeinbevölkerung<br>berufliche Exposition | <br>5<br>10 | <br>200<br>500, 1.000/6.000/18.000[f] |
| Deutschland (Gesetz, 1996) | 5 | 100 |
| Niederlande (Empfehlung, 2005) | 5 | 100<br>0,4 [e] |
| Schweden (Empfehlung, 2003) | 5 | 100 |
| Finnland (Empfehlung, 2002) | 5<br>15[a] | 100<br>500 [a] |
| | | |
| Schweiz (Gesetz, 1999)<br>Allgemeinbevölkerung<br>berufliche Exposition | <br>5<br>10 | <br>100 (1[b])<br>500 |
| Italien (Gesetz, 1992 und 2003[b]) | 5 | 100<br>10 (Kinder>4h)<br>3 (Kinder 24h)[d] |
| WHO (Empfehlung, 1998) | 5 | 100 |
| EU (Ratsempfehlung, 1999/519/ EC) | 5 | 100 |

a zeitlich begrenzt

b Grenzwert für Wohnungen, Schulen und Krankenhäuser für den Eintrag einer einzelnen Feldquelle (Anlagengrenzwert für Neuanlagen, 24h-Mittel für Einzelanlagen)

c Grenzwert für Hochspannungsleitungen für Kinder bei Aufenthalt über 4 Stunden

d Zielwert für Hochspannungsleitungen für Kinder, 24h-Mittel

e Empfehlung für sensible Nutzungen bei Neubau und 30% Auslastung der Leitung, Jahresmittelwert

f Kopf/Rumpf/Gliedmaßen

## Medizinische Grundlagen

Die akuten Wirkungen einer Exposition durch elektromagnetische Felder sind gut dokumentiert und gesicherter Wissensstand der Medizin (Zusammenfassung und Übersicht in [4, 12, 13, 14]).

Bei Magnetfeldern, die den Körper mit konstanten Flussdichten durchdringen, kann es bei über 800 mT (bei 50 Hz) zu Beeinträchtigungen der Herzfunktionen – von Herzrhythmusstörungen bis zum Kammerflimmern – kommen.

Bei Flussdichten von über 2 mT (2.000 µT) im Kopfbereich werden Flimmer-Erscheinungen (magnetische Phosphene) an der Peripherie des Sehfeldes wahrgenommen (“Lichtblitze sehen”).

In vivo Untersuchungen (am lebenden Menschen) mit Magnetfeldern mit Flussdichten unter 2 mT (2.000 µT) zeigen keinen Einfluss auf den menschlichen Organismus.

### Haushaltsgeräte und Elektroinstallationen (nach [15])

Niederfrequente elektrische und magnetische Felder werden auch durch Haushaltsgeräte und Elektroinstallationen im Haus erzeugt. Elektrische Feldstärken in der Umgebung von Haushaltsgeräten liegen in der Regel weit unterhalb des empfohlenen Referenzwertes. Lediglich unmittelbar an der Oberfläche einiger Geräte treten lokal hohe Feldstärkewerte auf – beispielsweise bei verschiedenen Küchen- oder Bohrmaschinen. Da die Feldverteilung räumlich sehr inhomogen ist, treten die Spitzenwerte nur punktuell auf. Allgemein nehmen die Feldstärken mit jedem Zentimeter Entfernung vom Gerät erheblich ab. Dies ist auch bei den magnetischen Flussdichten zu beobachten: Im Gebrauchsabstand von rund 30 cm sind die magnetischen Flussdichten der meisten Haushaltsgeräte bereits deutlich unter den empfohlenen Referenzwert abgesunken. Wenn der Referenzwert eingehalten ist, sind keine Gesundheitswirkungen zu erwarten:

In 30 cm Entfernung (in µT):

- Bohrmaschine 2 - 3,5
- Bügeleisen 0,12 - 0,3
- Haarfön 0,01 - 7
- Induktionskochfeld 2 - 6
- Mikrowellengerät 4 - 8
- Staubsauger 2 - 20

# Menschliche Gesundheit

## Epidemiologische Grundlagen

### Studientypen

Drei Arten epidemiologischer Studien tragen zur Beurteilung der Gesundheitsgefährdung beim Menschen bei: Kohortenstudien, Fall-Kontroll-Studien und Korrelationsstudien (oder ökologische Studien). Sehr selten liegen auch Ergebnisse randomisierter Studien vor. Fallserien und Fallberichte zu Krebserkrankungen beim Menschen können ebenfalls berücksichtigt werden. Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien setzen die untersuchten Expositionen in Beziehung zum Auftreten von Krebserkrankungen bei Einzelpersonen und liefern eine Schätzung des relativen Risikos (RR, Verhältnis der Inzidenz oder Mortalität bei Exponierten zur Inzidenz oder Mortalität bei Nicht-Exponierten) als wichtigstes Assoziationsmaß. In Korrelationsstudien sind die Untersuchungseinheiten in der Regel ganze Populationen (z. B. in bestimmten geografischen Gebieten oder zu bestimmten Zeitpunkten), und die Krebshäufigkeit wird mit einem zusammenfassenden Maß für die Exposition der Population gegenüber dem untersuchten Agens, Gemisch oder Expositionsfaktor in Beziehung gesetzt. Da die individuelle Exposition jedoch nicht dokumentiert wird, lässt sich aus Korrelationsstudien ein kausaler Zusammenhang weniger sicher ableiten als aus Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien. Fallberichte entstehen in der Regel aus einem Verdacht – meist basierend auf klinischer Erfahrung – dass das gleichzeitige Auftreten zweier Ereignisse – also einer bestimmten Exposition und dem Auftreten einer Krebserkrankung – deutlich häufiger vorkommt, als zufällig zu erwarten wäre. Fallberichte erfassen üblicherweise nicht alle Fälle in einer Population, definieren oder erfassen die Risikopopulation nicht und geben keine Schätzung der zu erwartenden Fallzahl ohne Exposition an. Die Unsicherheiten bei der Interpretation von Fallberichten und Korrelationsstudien machen diese, außer in seltenen Fällen, ungeeignet, um alleinige Grundlage für die Ableitung eines Kausalzusammenhangs zu bilden. Zusammen mit Fall-Kontroll-Studien und Kohortenstudien können relevante Fallberichte oder Korrelationsstudien jedoch wesentlich zur Beurteilung beitragen, ob ein Kausalzusammenhang vorliegt [16].

## Erhebung/Messung/Schätzung/Meta-Analysen

Echte Messungen einer Exposition sind in vielen Fällen aufwändig und teuer, daher wird in Studien gerne auf Erhebungen oder Schätzungen der Größe der Exposition ausgewichen. In vielen epidemiologischen Studien werden Ergebnisse von Erhebungen (Befragungen mittels Fragebogen) zur Analyse herangezogen. Die Angaben der Befragten werden vielfach nicht überprüft, sondern, so wie sie sind, in die Analysen einbezogen. Es kann dadurch ein Überschätzen oder Unterschätzen der tatsächlichen Größe der Exposition entstehen und das Ergebnis verfälscht werden (Bias). Für Meta-Analysen ist essentiell, auf die Qualität der einbezogenen Studien und Daten zu achten. Wenn Studien einbezogen werden, deren Qualität fraglich ist (z.B. weil eben nicht gemessen sondern befragt wurde), so kann auch das Ergebnis der Meta-Analyse in eine Richtung verzerrt werden.

## Kausalzusammenhang und Korrelation

Der Kausalzusammenhang beschreibt anhand von Kriterien den Zusammenhang einer Exposition mit der Entstehung einer Krankheit. Ein wichtiger Grundsatz in der Epidemiologie lautet: Korrelation ist nicht gleich Kausalität. Dies bedeutet, dass zwei Faktoren statistisch miteinander korrelieren können, ohne dass der eine Faktor den anderen verursacht. Beispielsweise wurde eine Korrelation zwischen der Zahl der brütenden Storchenpaare in Deutschland mit der Zahl der Geburten durchgeführt. Eine positive (auch eventuell statistisch signifikante) Korrelation bedeutet jedoch nicht, dass die Zahl der Geburten tatsächlich von der Zahl der brütenden Storchenpaare abhängig ist [17].

Korrelation ist ein statistisches Konzept, welches misst, wie stark sich eine Variable im Verhältnis zu einer anderen verändert. Der Korrelationskoeffizient ist eine numerische Darstellung dieser Beziehung und liegt zwischen -1 und 1. Steigen zwei Variablen in dieselbe Richtung, ist der Korrelationskoeffizient positiv. Beispielsweise nimmt das Gewicht tendenziell mit der Körpergröße zu. Verändern sich zwei Variablen in entgegengesetzte Richtungen, ist der Korrelationskoeffizient negativ. Beispielsweise sinkt die Anzahl der falschen Antworten in einer Prüfung, je mehr Zeit ein Schüler für die Vorbereitung aufwendet. Sind zwei Variablen nicht korreliert, ist der Korrelationskoeffizient 0 (oder nahe daran).

## Relatives Risiko, Odds Ratio und Hazard Ratio

Bei der Berechnung des Relativen Risikos wird Risiko für zwei mögliche Ausprägungen (z.B. Raucher versus Niemalsraucher) einer erklärenden Variablen (Exposition) berechnet. Das Verhältnis der beiden Risiken zueinander (das Risiko von Exponierten gegenüber von Nicht-Exponierten) wird berechnet, wobei den Nicht-Exponierten ein Risikowert von RR=1 zugeordnet wird. Üblicherweise wird es als Vielfaches ausgedrückt: Ein Relatives Risiko von RR=3 für eine bestimmte Erkrankung bedeutet, dass die exponierte Gruppe ein dreimal höheres Erkrankungsrisiko hat, verglichen mit Nicht-Exponierten (RR=1). Ein relatives Risiko von 1 bedeutet, dass für beide Kategorien der erklärenden Variablen (Exposition ja/nein) das selbe Risiko vorliegt, und dass die untersuchte Exposition vermutlich keinen Einfluss auf die Erkrankungswahrscheinlichkeit hat.

Bei der Berechnung der OR wird für jede der beiden Kategorien der erklärenden Variable (Exposition ja/nein) die Chance, eine Krankheit zu bekommen, bzw. sie nicht zu bekommen, berechnet. Die OR wird aus dem Verhältnis dieser beiden Chancen zueinander berechnet. Die Chance von Exponierten gegenüber von Nicht-Exponierten wird berechnet, wobei den Nicht-Exponierten eine Chance von OR=1 zugeordnet wird.

Die Hazard Ratio (HR) ist oft das einzige Effektmaß, das in vielen epidemiologischen Studien angegeben wird. Bei dichotomen, zeitlich konstanten Expositionen ist die HR definiert als das Risiko in den exponierten Gruppen geteilt durch das Risiko in den nicht exponierten Gruppen. Praktisch gesehen können Risiken als Inzidenzraten betrachtet werden, und somit lässt sich die HR näherungsweise als Verhältnis der Inzidenzraten interpretieren. Die HR wird üblicherweise mithilfe

eines Cox-Regressionsmodells mit proportionalen Risiken geschätzt, welches potenzielle Störfaktoren als Kovariaten einbeziehen kann.

### Konfidenzintervall

Ein Konfidenzintervall, kurz KI, auch Vertrauensbereich oder Erwartungsbereich genannt, ist in der Statistik ein Intervall, das die Präzision der Lageschätzung eines Parameters (z. B. eines Mittelwerts oder eines Risikos) angeben soll. Das Konfidenzintervall gibt den Wertebereich an, der mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit den Parameter der Verteilung einer Zufallsvariable einschließt. Diese Wahrscheinlichkeit wird durch das Konfidenzniveau, auch Konfidenzkoeffizient genannt, festgelegt und entspricht der nominalen Überdeckungswahrscheinlichkeit. Ein häufig verwendetes Konfidenzniveau ist 95 % (daher typischerweise in der wissenschaftlichen Literatur mit 95%CI abgekürzt).
Folglich lautet die korrekte Formulierung: Bei der Berechnung eines Konfidenzintervalls mit einem bestimmten Schätzverfahren enthält das Intervall den wahren Wert mit 95 % Wahrscheinlichkeit [18].
Bei Studien bedeutet eine große Bandbreite des Konfidenzintervalls unter Einschluss der „1“, dass das Ergebnis sowohl mit einem Null-Zusammenhang als auch mit einem erhöhten oder einem verminderten Risiko vereinbar wären.

### Beziehungen

Die Beziehung zwischen Exposition und Erkrankung kann einer Bewertung unterzogen werden. Diese Beziehung ist [19]:

stark: OR oder RR > 2 oder < 0.5, und statistisch signifikant
mäßig: OR oder RR > 2 oder < 0.5, und statistisch nicht signifikant, oder OR bzw. RR = 1.5 - 2.0 oder 0.5 - 0.75, und statistisch signifikant
schwach: OR oder RR = 1.5 - 2.0 oder 0.5 - 0.75, und statistisch nicht signifikant, oder < 1.5 oder > 0.75, und statistisch signifikant. Für nicht signifikante OR oder RR zwischen 0.75 - 1.50 wird keine Beziehung angenommen.

### Epidemiologische Evidenz (nach [19])

Was sind die Ursachen für Krebserkrankungen und was schützt davor? Ziel einer Bewertung der Evidenz ist es, mit ausreichender Sicherheit zu identifizieren, was Krebserkrankungen verursacht, was davor schützt und was wahrscheinlich keinen Einfluss hat. Dieselbe Bewertung zeigt auch auf, wo die Evidenz unzureichend ist und wo weiterer Forschungsbedarf besteht. Es gibt keine perfekte Methode, um festzustellen, ob beobachtete Zusammenhänge zwischen (beobachteten/gemessenen) Einflüssen und Krebs tatsächlich kausal sind.

Prinzipiell kann Evidenz in vier Kategorien eingeteilt werden [19]:

Überzeugend: Epidemiologische Studien zeigen konsistente Assoziationen, mit kleiner oder keiner Abweichung zum Gegenteil. Eine substantielle (mehr als 20 Studien) Zahl von akzeptablen Studien sollte vorliegen, vorzugsweise mit prospektivem Design, in verschiedenen Bevölkerungsgruppen, kontrolliert für mögliche Confounder.
Wahrscheinlich: Epidemiologische Studien zeigen Assoziationen, welche entweder nicht so konsistent sind, mit Studien welche die Hypothese nicht stützen, oder die Zahl der Studien reicht nicht aus, um ein definitives Urteil zu fällen.
Möglich: Epidemiologische Studien stützen in der Mehrzahl die Annahmen, sind aber limitiert in Bezug auf die Quantität, die Qualität oder die Konsistenz.
Unzureichend: Es gibt nur einige Studien, welche zwar konsistent in Bezug auf die Annahme sind, die aber nicht mehr als einen Hinweis auf eine mögliche Beziehung geben. Oftmals sind mehr gut geplante Studien notwendig.

## IARC

Die IARC (International Agency for Research on Cancer) ist eine Teilorganisation der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Die Aufgabe der IARC liegt in der Koordination und Durchführung der Forschung über die Ursachen für Krebserkrankungen beim Menschen, über die Mechanismen der Krebsentstehung und in der Entwicklung von wissenschaftlichen Strategien zur Bekämpfung von Krebs. Sie untersucht Wirkstoffe auf ihre Kanzerogenität. Dabei werden Daten zur Exposition, zu möglichen kanzerogenen Effekten beim Menschen, kanzerogenen Effekten bei Versuchstieren und andere relevante Daten berücksichtigt.

Nach Analyse der vorliegenden Daten ordnet die IARC Wirkstoffe oder Expositionen in eine der folgenden Gruppen ein:

Gruppe 1: Der Wirkstoff ist für Menschen kanzerogen.

Beispiele: Aflatoxin, Äthanol in alkoholischen Getränken, Benzol, Asbest, Dieselabgase, Chrom VI, Ultraviolette Strahlung (UV-A, UV-B und UV-C Strahlung), Plutonium, Tabakrauch, etc.

Gruppe 2A: Der Wirkstoff ist wahrscheinlich kanzerogen.

Beispiele: Acrylamid, Chloramphenicol, Nachtschichtarbeit, DDT (Insektizid), Konsum von rotem Fleisch, Holzrauch in Innenräumen, etc.

Gruppe 2B: Der Wirkstoff ist möglicherweise kanzerogen.

Beispiele: Russ, Motorenabgase (Benzin), Blei, niederfrequente magnetische Felder, etc.

Gruppe 3: Der Wirkstoff ist bezüglich der Kanzerogenität für Menschen nicht klassifizierbar.

Beispiele: volatile Anästhetika, Kaffee trinken, gechlortes Trinkwasser, Chloramine, Kohlenstaub, niederfrequente elektrische Felder, statische elektrische Felder und statische magnetische Felder, Paracetamol, etc.

In ihrer Monographie Nr. 80 (Nonionizing Radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields [16]) aus dem Jahre 2002 kommt die IARC zu folgender Einschätzung:

„Magnetic fields, extremely low-frequency (niederfrequente magnetische Felder) sind möglicherweise karzinogen für Menschen (Gruppe 2B)“

Im Detail führt sie dazu aus:

*- There is limited evidence in humans for the carcinogenicity of extremely low-frequency magnetic fields in relation to childhood leukaemia.*

*- There is inadequate evidence in humans for the carcinogenicity of extremely low-frequency magnetic fields in relation to all other cancers.*

Diese Einstufung niederfrequenter magnetischer Felder als mögliches Karzinogen geht auf die Ergebnisse von epidemiologischen Studien über einen möglichen Zusammenhang zwischen Kinderleukämie und niederfrequenten Feldern der Frequenzen 50 und 60 Hz zurück. Auslöser war eine 1979 von Wertheimer und Leeper publizierte, in Denver durchgeführte Fall-Kontroll-Studie, bei der in der Nähe von Hochspannungsleitungen lebende Kinder ein fast dreifach erhöhtes Risiko hatten, an Leukämie zu erkranken [20]. Seither wurden zu dieser Fragestellung viele Studien durchgeführt.

## Epidemiologische Studien

### Leukämie bei Kindern

Draper *et al*. [21] führten eine Fall-Kontroll-Studie in England und Wales durch (29.081 Kinder mit Krebserkrankungen, 1962-1995) und fanden ein erhöhtes Risiko für kindliche Leukämie in Abhängigkeit zum Abstand zu Hochspannungsleitungen.

Fünf Jahre später (2010) führte die gleiche Gruppe von Wissenschaftler:innen [22] erneut eine Analyse durch (28.968 Kinder, 1962-1995), sie führen an: „Das geschätzte relative Risiko liegt unter einem Fall pro Jahr. Eine Magnetfeldexposition im Geburtsjahr ist wahrscheinlich nicht die alleinige Ursache für den von uns zuvor berichteten Zusammenhang mit dem Abstand zu Freileitungen."

Und wiederum 4 Jahre später (2014, [23]) publizierte die gleiche Gruppe eine Analyse von 53.515 Kindern aus England, Wales und Schottland (1962-2008) und fanden über die Zeit ein abnehmendes Risiko für Leukämie. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass ein (früher publiziertes) möglicherweise erhöhtes Risiko für Leukämie nicht von physikalischen Effekten von Stromleitungen ausgeht, sondern dass dieses wahrscheinlich auf Bevölkerungseinflüsse in der Nähe von Stromleitungen zurückzuführen ist: „Ein mit der Zeit abnehmendes Risiko ist wahrscheinlich nicht auf eine physikalische Wirkung der Stromleitungen zurückzuführen, sondern eher auf veränderte Bevölkerungsmerkmale bei denjenigen, die in der Nähe von Stromleitungen leben."

Im Jahr 2011 erschien eine Studie des Public-Health Instituts Vorarlberg [24], in welcher untersucht wurde, ob innerhalb von 3 Bändern (≤50 m, 51-100 m, 101-200 m) entlang von 110 kV- und 220 kV-Starkstromleitungen die Krebsinzidenz bei der dort wohnenden Bevölkerung höher ist als jene der Bevölkerung, welche außerhalb dieser Bänder leben. Es ergab sich, dass „Keine auffällig erhöhte standardisierte Krebsinzidenzrate entlang der Hochspannungsbänder, sowohl der 100 als auch der 220 kV-Leitung, keine auffällig erhöhte standardisierte Sterblichkeitsrate nach Krebsdiagnose in Gaschurn, sowohl entlang der 110 als auch 220 kV-Leitung, keine auffällig erhöhte standardisierte Gesamtsterblichkeitsrate in Gaschurn und keine Auffälligkeiten beim Krebsdiagnosealter sowohl bei Frauen als auch bei Männern und keine Auffälligkeiten bezüglich der Krebslokalisationen" gefunden werden konnten. Der Autor folgert, dass: „in Gaschurn entlang der Hochspannungsleitungen nicht mehr Krebsfälle auftreten als man nach dem Vorarlberger Durchschnitt erwartet [und] es gibt keine Besonderheiten bezüglich der Verteilung der Krebsdaten in Gaschurn" [24].

Zahlreiche andere Studien wurden seither durchgeführt, viele von ihnen wurden in einer großen gepoolten Analyse ausgewertet [25]: 29.049 Kinder und 68.231 Kontrollen ergaben: „In dieser ersten umfassenden Metaanalyse zum Zusammenhang zwischen Leukämie im Kindesalter und der Entfernung zu Stromleitungen fanden wir ein geringes und ungenaues Risiko für Wohnorte in weniger als 50 m Entfernung zu 200+ kV-Leitungen, das sich nicht durch hohe Magnetfelder erklären ließ. Die Gründe für das erhöhte Risiko, das in dieser und vielen anderen Studien festgestellt wurde, sind weiterhin ungeklärt."

Eine weitere Studie von Brabant *et.al* [26] in Form eines systematischen Reviews inklusive Meta-Analyse findet ein erhöhtes Risiko für Kinder-Leukämie in Abhängigkeit von der magnetischen Flussdichte (> 4 µT), allerdings kein (statistisch signifikant) erhöhtes Risiko in Abhängigkeit zur Entfernung von Hochspannungsleitungen und zu Hochspannungs- bzw. Niederspannungsleitungen. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass der Einfluss von Heizdecken zu einem erhöhten Risiko führt, zu einem sehr geringen Grad auch der Einfluss elektrischer Uhren am Nachttisch. Alle anderen untersuchten Expositionen führen zwar (in Abhängigkeit von den in die Meta-Analyse aufgenommenen Studien) zu erhöhten Risiken, allerdings mit Konfidenz-Intervallen, welche die „1" miteinschließen, was nahelegt, dass die gefundenen Ergebnisse zufällig sind.

Große gepoolte Analysen mit Individualdaten können aussagekräftigere Ergebnisse liefern, wie zum Beispiel die aktuellste gepoolte Studie [27] mit Daten von 24.994 Fällen und 30.769 Kontrollen. In dieser wurde eine OR von 1,01 (95% KI 0,61-1,66, Vergleich <0,1 µT vs. ≥0,4 µT) für das Risiko von

Leukämie im Kindesalter bei Kindern im Kontext von ELF-MF ermittelt. Die Autor:innen schreiben: „Unsere Ergebnisse stehen im Widerspruch zu früheren zusammenfassenden Analysen und zeigen einen abnehmenden bis gar keinen Zusammenhang zwischen MF und Leukämie im Kindesalter. Dies könnte auf methodische Probleme, Zufall oder einen tatsächlichen Rückgang des Effekts zurückzuführen sein."

Die neuesten in der wissenschaftlichen Literatur auffindbaren Studien sind jene von Zagar *et al*., Malagoli *et al*., Nguyen *et al*. und Malavolti *et al*.

Zagar *et al*. [28] stellten eine effiziente numerische Methode zur Berechnung der Exposition durch alle Stromleitungen in Slowenien vor und wandten diese auf alle 110-400 kV-Freileitungen und 110 kV-Erdkabel des Landes an. Die Magnetfeldexposition wurde in folgende Gruppen eingeteilt: <0,1 µT (Hintergrund), 0,1–0,2 µT, 0,2–0,3 µT, 0,3–<0,4 µT und ≥0,4 µT. Anschließend wurde allen im slowenischen Krebsregister zwischen 2005 und 2016 erfassten Fällen von Krebserkrankungen im Kindesalter (0–14 Jahre), Leukämie im Kindesalter (0–19 Jahre) und Hirntumoren (0–29 Jahre) eine Wohnortexposition zugeordnet. Nur 0,5 % der Bevölkerung lebten in Gebieten mit einer Magnetfeldstärke von >0,1 µT. Im Verlauf der 12 Jahre der Krebsregistrierung wurden lediglich ein exponierter Fall von Leukämie (in der Gruppe 0,1–0,2 µT) und ein exponierter Fall von Hirntumoren (Gruppe 0,2–0,3 µT) beobachtet. Aufgrund der sehr geringen Anzahl exponierter Personen waren auch die erwarteten Krebsfallzahlen sehr niedrig. Beispielsweise wurden für die Expositionsgruppe ≥0,4 µT nur 0,5 Fälle von Krebs jeglicher Art und jeweils 0,2 Fälle von Leukämie und Hirntumoren erwartet. Die Studie ist interessant, weil sie eine numerisch effiziente Methode zur Modellierung der Exposition gegenüber Magnetfeldern von Freileitungen für ein ganzes Land entwickelt. Da Slowenien ein kleines Land ist, wurden nur sehr wenige Fälle erwartet und beobachtet, und die Aussagekraft der Studie war viel zu gering, um den Zusammenhang zwischen Magnetfeldexposition und neu aufgetretenen Krebserkrankungen zu beurteilen [29].

Malagoli *et al*. [30] untersuchten in einer Fall-Kontroll-Studie mit 182 im italienischen Kinderkrebsregister zwischen 1989 und 2019 diagnostizierten Fällen und jeweils vier Kontrollpersonen aus Daten des nationalen Gesundheitsdienstes die Exposition gegenüber Hochspannungsleitungen als Risikofaktor für Leukämie im Kindesalter (0–15 Jahre). Die Kontrollpersonen wurden hinsichtlich Geschlecht, Geburtsjahr und Wohnprovinz gematcht. Die Entfernung zu den Hochspannungsleitungen wurde anhand von Geodaten der Adressen zum Zeitpunkt der Diagnose und der zwischen 1998 und 2011 aktiven Hochspannungsleitungen mit einer Spannung von ≥ 132 kV bestimmt. Die Feldstärke basierte auf Messungen der Stromlast im Jahr 2001 und Daten zur Phasenkonfiguration. Zu den Störfaktoren zählten Luftverschmutzung ($PM_{10}$), Transformator-Stationen in Gebäuden, Landnutzung und soziodemografische Indikatoren. Acht Fälle und 15 Kontrollpersonen lebten in einem Abstand von weniger als 100 m zu einer Hochspannungsleitung. Von diesen wies nur ein Fall eine Feldstärke von ≥ 0,4 µT und zwei Fälle sowie eine Kontrollperson eine Feldstärke von ≥ 0,1 µT auf. In logistischen Regressionsmodellen mit einer Vergleichsgruppe von >400 m war ein Wohnort <100 m von einer Hochspannungsleitung mit einer Odds Ratio (OR) von 2,0 (95%-KI: 0,8–5,0) für jegliche Leukämie und 2,2 (95%-KI: 0,8–6,0) für akute lymphatische Leukämie assoziiert. Eine Exposition von ≥0,1 µT war im Vergleich zu <0–1 µT mit einer OR von 7,5 (95%-KI: 0,7–82,8) assoziiert. Die Autoren schlussfolgern: „In dieser italienischen Population war die Nähe zu Hochspannungsleitungen mit einem erhöhten Risiko für Leukämie im Kindesalter verbunden." Zu den Einschränkungen der Studie gehörten der Zeitraum der Expositionsbewertung, die sehr geringe Anzahl von Teilnehmern mit potenziell relevanter Exposition [29] und die Tatsache, dass die 95% Konfidenzintervalle die „1" miteinschließen.

Nguyen *et al*. [31] analysierten eine frühere Studie zur Exposition gegenüber ELF-MF von Stromleitungen und deren Zusammenhang mit Leukämie im Kindesalter in Kalifornien, USA, erneut. Der Raum unter Stromleitungen wird mitunter von kommerziellen Baumschulen genutzt. Baumschulen gehören zu den landwirtschaftlichen Betrieben mit hohem Pestizideinsatz, und Pestizide wurden ebenfalls mit Leukämie im Kindesalter in Verbindung gebracht. Daher untersuchten die Autoren, ob die Pestizidexposition als Störfaktor für den Zusammenhang zwischen ELF-MF und

Leukämie im Kindesalter wirkt. Die Autoren kamen zu dem Schluss: „Unsere Ergebnisse stützen jedoch nicht, dass Gärtnereien die beobachteten Risiken für Leukämie im Kindesalter in Verbindung mit der Nähe zu Stromleitungen und der Exposition gegenüber Magnetfeldern erklären. Allerdings schränkte die geringe Anzahl von Probanden, die gleichzeitig hohen Magnetfeldern, der Nähe zu Stromleitungen und der Exposition gegenüber Gärtnereien ausgesetzt waren, unsere Möglichkeiten zur vollständigen Beurteilung potenzieller Störfaktoren ein“ [29].

Malavolti *et al*. [32] analysierten denselben Datensatz wie oben beschrieben (Malagoli *et al*.), konzentrierten sich jedoch auf die Nähe von Wohngebieten zu Umspannwerken, die Strom von 15 kV auf 380 V umwandeln. Die Studie umfasste alle 13.434 solcher Umspannwerke in zwei italienischen Provinzen. Fünf Fälle von Leukämie im Kindesalter und 17 Kontrollpersonen lebten weniger als 25 m von einer Hochspannungsleitung entfernt, während zwei Fälle und acht Kontrollpersonen weniger als 15 m von Umspannwerken entfernt lebten. Bei einer Entfernungsgrenze von 15 m bzw. 25 m zwischen exponierten und nicht exponierten Personen betrugen die jeweiligen Odds Ratios (OR) für Leukämie 1,0 (95%-KI: 0,2–4,9) bzw. 1,2 (95%-KI: 0,4–4,3). In Subanalysen waren die Punktschätzungen bei Kindern, die nach dem fünften Lebensjahr diagnostiziert wurden, höher, basierten jedoch auf einer noch geringeren Fallzahl und wiesen wiederum sehr breite Konfidenzintervalle auf. Die Autoren kommen zu dem Schluss: „Obwohl wir keinen allgemeinen Zusammenhang zwischen der Nähe des Wohnorts zu Umspannwerken und Leukämie im Kindesalter feststellen konnten, gab es Hinweise auf ein erhöhtes Risiko für Leukämie bei Kindern ab 5 Jahren. Die Aussagekraft war aufgrund der geringen Anzahl exponierter Kinder eingeschränkt“ [29].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die hier vorgestellten (neueren) Studien nicht klären können, ob ein in epidemiologischen Studien beobachteter Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber ELF-MF und Leukämie im Kindesalter kausal ist oder nicht [29]. Auch das von der EU-Kommission beauftragte SCHEER (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks) kommt in Zusammenhang mit Leukämie-Erkrankungen bei Kindern zu dem Schluss [33]: „Veröffentlichte systematische Übersichtsarbeiten zu Leukämie und ELF-EMF-Exposition, die hauptsächlich auf Fall-Kontroll-Studien basieren, ergaben konsistente, aber moderate Risikoschätzungen für ELF-MF-Exposition. Es gab jedoch zu wenige Belege, um eine Dosis-Wirkungs-Kurve zu erstellen. Bezüglich Leukämie im Kindesalter ist die Evidenz aus epidemiologischen Studien (der primären Evidenzquelle) schwach bis moderat. Die in den meisten Studien verwendeten Tiermodelle waren jedoch für die Untersuchung von Leukämie im Kindesalter ungeeignet, weshalb die Evidenz aus dieser Quelle schwach ist. Darüber hinaus gibt es schwache Belege für Interaktionsmechanismen bei der Induktion von Neoplasien durch ELF-MF-Exposition. Insgesamt ist die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen ELF-MF-Exposition und Leukämie im Kindesalter daher schwach.“

Die ICNIRP ist der Ansicht [34], dass die derzeit vorhandenen wissenschaftlichen Belege für einen kausalen Zusammenhang zwischen längerer Exposition gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern und einem erhöhten Risiko für Leukämie im Kindesalter zu schwach sind, um als Grundlage für Expositionsrichtlinien zu dienen. Insbesondere wenn der Zusammenhang nicht kausal ist, ergibt sich durch eine Reduzierung der Exposition kein gesundheitlicher Nutzen.

Die WHO kommt (im Jahr 2007) zu dem Schluss: „Ein Großteil der wissenschaftlichen Forschung zu den Langzeitrisiken durch ELF-MF konzentrierte sich auf Leukämie im Kindesalter. Im Jahr 2002 veröffentlichte die IARC eine Monographie, in der ELF-Magnetfelder als „möglicherweise krebserregend für den Menschen“ eingestuft wurden. Diese Einstufung bezeichnet Substanzen, für die es begrenzte Hinweise auf eine krebserregende Wirkung beim Menschen und unzureichende Hinweise auf eine krebserregende Wirkung in Tierversuchen gibt. Diese Einstufung basierte auf gepoolten Analysen epidemiologischer Studien, die ein konsistentes Muster eines zweifach erhöhten Risikos für Leukämie im Kindesalter in Verbindung mit einer durchschnittlichen Exposition gegenüber Magnetfeldern im Bereich der Netzfrequenz von über 0,3 bis 0,4 µT in Wohnräumen aufzeigten. Die Arbeitsgruppe kam zu dem Schluss, dass weitere Studien seither den Status dieser Einstufung nicht verändern.

Die epidemiologischen Belege werden jedoch durch methodische Probleme, wie beispielsweise eine mögliche Selektions-Verzerrung, geschwächt. Darüber hinaus gibt es keine allgemein anerkannten biophysikalischen Mechanismen, die darauf hindeuten würden, dass Expositionen gegenüber niedrigen Feldstärken an der Krebsentstehung beteiligt sind. Sollten also Auswirkungen durch die Exposition gegenüber diesen schwachen Magnetfeldern bestehen, müssten diese auf einem bisher unbekannten biologischen Mechanismus beruhen. Zudem verliefen Tierstudien überwiegend negativ. Insgesamt ist die Evidenz im Zusammenhang mit Leukämie im Kindesalter daher nicht ausreichend, um einen kausalen Zusammenhang zu belegen.

Leukämie im Kindesalter ist eine vergleichsweise seltene Erkrankung. Die Zahl der Neuerkrankungen weltweit wurde im Jahr 2000 auf 49.000 geschätzt. Durchschnittliche MF-Expositionen über 0,3 µT in Haushalten sind selten: Schätzungsweise leben nur 1 % bis 4 % der Kinder unter solchen Bedingungen. Sollte der Zusammenhang zwischen Magnetfeldern und Leukämie im Kindesalter kausal sein, würde die Zahl der weltweit auf Magnetfeldexposition zurückzuführenden Fälle – basierend auf den Werten des Jahres 2000 – auf 100 bis 2400 pro Jahr geschätzt. Dies entspräche 0,2 bis 4,95 % der Gesamtinzidenz in diesem Jahr. Sollten ELF-Magnetfelder das Krankheitsrisiko tatsächlich erhöhen, wären die Auswirkungen der ELF-EMF-Exposition auf die öffentliche Gesundheit im globalen Kontext betrachtet, begrenzt.

Eine Reihe weiterer negativer gesundheitlicher Auswirkungen wurde im Hinblick auf einen möglichen Zusammenhang mit der Exposition gegenüber ELF-Magnetfeldern untersucht. Dazu gehören andere Krebserkrankungen im Kindesalter, Krebserkrankungen bei Erwachsenen, Depressionen, Suizid, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Fortpflanzungsstörungen, Entwicklungsstörungen, immunologische Veränderungen, neurobehaviorale Effekte und neurodegenerative Erkrankungen. Die WHO-Arbeitsgruppe kam zu dem Schluss, dass „die wissenschaftlichen Belege für einen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber ELF-Magnetfeldern und all diesen gesundheitlichen Auswirkungen deutlich schwächer sind als bei Leukämie im Kindesalter. In einigen Fällen (z. B. bei Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder Brustkrebs) deuten die Ergebnisse darauf hin, dass diese Felder die Erkrankungen nicht verursachen.“ Und es wird festgestellt: „Beim Bau neuer Anlagen und der Entwicklung neuer Geräte, einschließlich Haushaltsgeräten, sollten kostengünstige Methoden zur Expositionsreduktion geprüft werden. Geeignete Maßnahmen zur Expositionsreduktion variieren von Land zu Land. Allerdings sind Maßnahmen, die auf willkürlich festgelegten niedrigen Expositionsgrenzwerten beruhen, nicht gerechtfertigt.“ [35]

### Andere Erkrankungen (nach 27)

Insgesamt gibt es moderate Evidenz (hauptsächlich aus Humanstudien) für einen Zusammenhang zwischen beruflicher Exposition gegenüber ELF-EMF und amyotropher Lateralsklerose (ALS), schwache Evidenz für einen Zusammenhang zwischen beruflicher ELF-EMF-Exposition und M. Alzheimer sowie Demenz. Die Evidenz für eine Exposition im Wohnbereich und diese neurodegenerativen Erkrankungen ist hingegen nur unsicher bis schwach. Zwischen EMF-Exposition und M. Parkinson oder Multipler Sklerose konnte kein signifikanter Zusammenhang festgestellt werden. Es konnten keine systematischen Reviews oder Metaanalysen zur Exposition gegenüber ELF-EMF und neurophysiologischen Auswirkungen gefunden werden. Daher lassen sich noch keine eindeutigen Schlussfolgerungen zu potenziellen Effekten ziehen. Die verfügbaren systematischen Reviews und Metaanalysen zeigten keinen Zusammenhang zwischen ELF-EMF-Exposition und Schwangerschaft oder reproduktiven Auswirkungen.

## Elektrohypersensitivität

Die von Betroffenen mit „elektromagnetischer Hypersensibilität“ beschriebenen Symptome können schwerwiegend und mitunter behindernd sein. Es hat sich jedoch als schwierig erwiesen, unter

verblindeten Bedingungen nachzuweisen, dass die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern diese Symptome auslösen kann. Dies deutet darauf hin, dass „elektromagnetische Hypersensibilität“ nicht mit dem Vorhandensein elektromagnetischer Felder zusammenhängt, obwohl weitere Forschung zu diesem Phänomen erforderlich ist [36].

Leszczynski [37] veröffentlichte eine Übersichtsarbeit zur wissenschaftlichen Evidenz bezüglich der individuellen EMF-Sensibilität. Er berücksichtigte darin sowohl Provokations- als auch Beobachtungsstudien (Umfragen), obwohl Querschnittsstudien keinen Kausalzusammenhang zwischen subjektiven oder objektiven Symptomen und EMF-Exposition belegen können. Darüber hinaus fehlen in der Übersichtsarbeit die Kriterien für die Literaturauswahl sowie eine Beschreibung des methodischen Vorgehens bei der Überprüfung der ausgewählten Studien. Der Autor kommt zu dem Schluss, dass die meisten Studien keinen kausalen Zusammenhang zwischen EMF und elektromagnetischer Hypersensibilität (EHS) feststellen konnten, zumindest nicht hinsichtlich akuter Effekte, da die Studien „keine verzögerten EMF-Reaktionen untersuchen konnten“. Der Autor identifiziert mehrere methodische Mängel der bisherigen Studien und schlägt vor, sowohl subjektive Symptome als auch objektive Biomarker zur Kausalitätsforschung heranzuziehen, „da die wissenschaftlichen Forschungsdaten nicht ausreichen, um als Beweis für das Fehlen eines Kausalzusammenhangs“ (zwischen EMF-Exposition und EHS) zu dienen [33].

## Aktive und passive Körperhilfsmittel

Der Herzschrittmacher ist das wohl bekannteste aktive Körperhilfsmittel. Darüber hinaus wurden aber seit mehr als 100 Jahren unterschiedlichste aktive und passive Körperhilfsmittel entwickelt und eingesetzt [38, 39]. Es kann zwischen aktiven und passiven Körperhilfsmitteln unterschieden werden, welche entweder als Implantat im Körper oder als Gerät am Körper getragen werden. Aktive Körperhilfsmittel verfügen über eine Energiequelle und überwachen, unterstützen und/oder ersetzen Körperfunktionen. Beispiele hierfür sind Herzschrittmacher, Cardioverter und Defibrillatoren, Hörgeräte, Medikamentendosiersysteme, Neurostimulatoren, Cochlea- und Hirnstamm-Implantate, Rückenmarkstimulatoren und Telemetrie-Systeme zur Messung verschiedener Körperfunktionen. Zu den passiven Körperhilfsmitteln zählen künstliche Gelenke, Schienen, Platten und Stabilisatoren samt Nägeln und Schrauben, Herzklappen und Stents in Blutgefäßen.

In Bezug auf elektrische und magnetische Felder ist bei Menschen mit aktiven und passiven Körperhilfsmittel darauf zu achten, dass deren Implantate oder am Körper getragene Geräte nicht von externen Feldern ungünstig beeinflusst werden. Bei aktiven Körperhilfsmitteln würde eine unerwünschte Beeinflussung durch ein magnetisches oder elektrisches Feld beispielsweise zu einer Fehlfunktion führen, bei passiven Körperhilfsmitteln zu Anziehungsphänomenen und Dislokation oder zu unerwünschten Erwärmungen. Aus diesem Grund wurden in einem Bericht des Deutschen Bundesministeriums für Arbeit und Soziales [38] Schwellenwerte für aktive und passive Körperhilfsmittel publiziert, unterhalb welcher eine unerwünschte Beeinflussung auszuschließen ist:

Für Wechselstrom mit 50 Hz (Haushalt) gilt für Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln ein Spitzenwert von 9 kV/m bzw. von 111 A/m (entspricht etwa 139 µT), vergleiche dazu die Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP von 5 kV/m und 200 µT. Für Beschäftigte mit passiven Körperhilfsmitteln gilt ein Spitzenwert von 28,3 kV/m bzw. von 1528 A/m, was etwa 1916 µT entspricht.

## Schlussfolgerung

Aus fachlicher Sicht kann festgestellt werden, dass nach über 40-jähriger Forschung nicht eindeutig geklärt ist, ob von ELF-MF ein erhöhtes Risiko für Leukämie-Erkrankungen bei Kindern ausgeht, dass die Erhöhung dieses Risikos, wenn gegeben, jedoch sehr schwach ist und davon ausgegangen werden kann, dass sich dieser Effekt nicht auf die Zahl von Leukämie-Erkrankungen bei Kindern auswirkt.

Für andere Erkrankungen liegen nach jahrzehntelanger Forschung keine Hinweise vor, dass die Exposition gegenüber elektrischen und/oder magnetischen Feldern (50 Hz) unterhalb der Grenzwertempfehlungen der ICNIRP der Gesundheit schaden.

Weiters ist anzumerken, dass aus medizinischer Sicht die in Österreich anzuwendenden Grenzwerte zum Schutz der Gesundheit der Allgemeinbevölkerung und zum Schutz der Arbeitnehmer:innen als ausreichend angesehen werden können.

Nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft kann ein sehr geringfügig erhöhtes Leukämierisiko im Kindesalter nicht vollständig ausgeschlossen werden. Magnetische Felder unterhalb der geltenden Expositionsgrenzwerte könnten allenfalls zu einer sehr kleinen zusätzlichen Risikoerhöhung beitragen. Dieses mögliche zusätzliche Risiko ist im Vergleich zu anderen gut belegten umweltmedizinischen Risikofaktoren, wie der Exposition gegenüber Benzol oder ionisierender Strahlung, als vernachlässigbar gering einzustufen.

# Literatur


1 American Institute for Cancer Research. https://www.aicr.org/cancer-prevention/healthy-lifestyle/other-lifestyle-risks/ (accessed 14.12.2025).

2 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): https://www.icnirp.org/en/frequencies/low-frequency/index.html (accessed: 14.12.2025).

3 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Physics 99(2010)6:818-836.

4 EU Ratsempfehlung (1999/519/EG - Council Recommendation on the Limitation of Exposure of the General Public to Electromagnetic Fields - 0 Hz to 3000 GHz); und EU (Directive 2004/40/EG)

5 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics 74(1998)4:494-522.

6 Republik Österreich (Hrsg.). Verordnung der Bundesregierung über den Schutz der Bediensteten vor der Einwirkung durch elektromagnetische Felder (Verordnung elektromagnetische Felder Bund – B-VEMF). Bundesgesetzblatt BGBl. II Nr. 384/2016 i.d.g.F.

7 Österreichischer Verband für Elektrotechnik (Hrsg). OVE Richtlinie R 23-1, Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz, Teil 1: Begrenzung der Exposition von Personen der Allgemeinbevölkerung. Wien, OVE, 2017.

8 Österreichischer Verband für Elektrotechnik (Hrsg). OVE Richtlinie R 23-3-1, Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz, Teil 3-1: Magnetische Felder – Maßnahmen an der feldquelle zur Expositionsreduktion für die Allgemeinbevölkerung bei Errichtung oder wesentlicher Änderung ortsfester Anlagen und Leitungen der Stromversorgung. Wien, OVE, 2021.

9 Bundesrepublik Deutschland (Hrsg). Sechsundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BimSchV). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/ (accessed 14.12.2025).

10 EMF-Portal (Hrsg). Grenzwerte im internationalen Vergleich. https://www.emf-portal.org/de/cms/page/home/more/limits/limit-values-compared-internationally (accessed: 14.12.2025).

11 Bundesamt für Umwelt (BAFU): Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV). Erläuternder Bericht, 2006; siehe auch BUWAL Unterlagen in http://www.bafu.admin.ch/elektrosmog

12 Silny J.: Nichtionisierende elektromagnetische Felder. In: Wichmann H.E, H.W. Schlipköter G. Fülgraff: Handbuch der Umweltmedizin. Bd. III, Ecomed, 1993/94, VII-2.1, 21. Erg.3/01

13 Schütz J., J. Michaelis: Nichtionisierende elektromagnetische Felder - Epidemiologie. In: Wichmann H.E, H.W. Schlipköter G. Fülgraff: Handbuch der Umweltmedizin. Bd. III, Ecomed, 1993/94, VII-2.1.1, 21. Erg.3/01

14 Bundesministerium für Gesundheit und Konsumentenschutz: Studie dokumentierter Forschungsresultate über die Wirkung elektromagnetischer Felder. Teil 1: Niederfrequente elektrische und magnetische Felder, Wien 1996

15 Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg). Elektromagnetische Felder. https://www.bfs.de/DE/themen/emf/nff/anwendung/haushalt-elektro/haushalt-elektro.html (accessed: 14.12.2025).

16 World Health Organisation - International Agency for Research on Cancer: Non-ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. Lyon, IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol 80. 2002, Lyon, France.

17 Sies H. A new parameter for sex education. Nature 332(1988):495.

18 Dorey FJ. In Brief: Statistics in Brief: Confidence Intervals: What is the Real Result in the Target Population? Clin Orthop Relat Res. 468(2010)11:3137–3138.
19 World Cancer Research Fund/American Institute for Cancer Research. Diet, Nutrition, Physical Activity and Cancer: A Global Perspective. Continuous Update Project Expert Report, 2018.
20 Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. Am J Epidemiol. 109(1979)3:273-284.
21 Draper G, Vincent T, Kroll ME, Swanson J. Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. BMJ 7503(2005)330:1290-1294.
22 Kroll ME, Swanson J, Vincent T, Draper GJ. Childhood cancer and magnetic fields from high-voltage power lines in England and Wales: a case–control study. Brit J Cancer 103(2010):1122-1127.
23 Bunch KJ, Keegan TJ, Swanson J, Vincent TJ, Murphy MFG. Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines: childhood cancer risk in Britain 1962‑2008. Brit J Cancer.110(2014)5:1402-1408.
24 Concin H (Hrsg: Public-Health Institut Vorarlberg). Gaschurn Krebsinzidenz, Krebs- und Gesamtsterblichkeit 1985 – Mitte 2011. https://www.aks.or.at/wp-content/uploads/2018/04/Gaschurn-Krebsbericht-1985_2011.pdf (accessed: 14.12.2025).
25 Amoon AT, Crespi CM, Ahlbom A, Bhatnagar M, Bray I, Bunch KJ, Clavel J, Feychting M, Hémon D, Johansen C, Kreis C, Malagoli C, Marquant F, Pedersen C, Raaschou-Nielsen O, Röösli M, Spycher BD, Sudan M, Swanson J, Tittarelli A, Tuck DM, Tynes T, Vergara X, Vinceti M, Wünsch-Filho V, Kheifets L. Proximity to overhead power lines and childhood leukaemia: an international pooled analysis. Brit J Cancer 119(2018)3:364–373.
26 Brabant C, Geerinck A, Beaudart C, Tirelli E, Geuzaine C, Bruyère O. Exposure to magnetic fields and childhood leukemia: a systematic review and meta-analysis of case-control and cohort studies. Rev Environ Health 38(2022)2:229-253.
27 Amoon AT, Swanson J, Magnani C, Johansen C, Kheifets L. Pooled analysis of recent studies of magnetic fields and childhood leukemia. Environ Res. 204(2022)A:111993.
28 Zagar T, Valic B, Kotnik T, Korat S, Tomsic S, Zadnik V, Gajsek P. Estimating exposure to extremely low frequency magnetic fields near high-voltage power lines and assessment of possible increased cancer risk among Slovenian children and adolescents. Radiol Oncol. 57(2023)1:59-69.
29 Swedish Radiation Safety Authority (SSM). Report number: 2025:04 ISSN: 2000-0456.
30 Malagoli C, Malavolti M, Wise LA, Balboni E, Fabbi S, Teggi S, Palazzi G, Cellini M, Poli M, Zanichelli P, Notari B, Cherubini A, Vinceti M, Filippini T. Residential exposure to magnetic fields from high-voltage power lines and risk of childhood leukemia. Environmental Res. 232 (2023):116320.
31 Nguyen A, Crespi CM, Vergara X, Kheifets L. Commercial outdoor plant nurseries as a confounder for electromagnetic fields and childhood leukemia risk. Environmental Research 212(2022):113446.
32 Malavolti M, Malagoli C, Wise LA, Poli M, Notari B, Taddei I, Fabbi S, Teggi S, Balboni E, Pancaldi A, Palazzi G, Vinceti M, Filippini T. Residential exposure to magnetic fields from transformer stations and risk of childhood leukemia. Environ Res. 245(2024):118043.
33 Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks SCHEER. Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF): Update with regard to frequencies between 1Hz and 100 kHz. https://health.ec.europa.eu/consultations/scheer-public-consultation-preliminary-opinion-potential-health-effects-exposure-electromagnetic_en (accessed: 14.12.2025).
34 International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection (Hrsg). ICNIRP Guidelines For Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz). Health Physics 99(2010)6:818-836.

35 World Health Organization (Hrsg). Exposure to extremely low frequency fields Backgrounder June 2007. https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/exposure (accessed: 14.12.2025).
36 Rubin GJ, Das Munshi J, Wessely S. Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. Psychosom Med. 67(2005)2:224-232.
37 Leszczynski D. Review of the scientific evidence on the individual sensitivity to electromagnetic fields (EHS). Rev Environ Health 37(2022)3:423-450.
38 Heinrich H, Börner F. Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz - Sicherheit von Beschäftigten mit aktiven und passiven Körperhilfsmitteln bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern. Bericht der EMF-Arbeitsgruppe des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales, Forschungsbericht 451. Berlin, Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2015, ISSN 0174-4992.
39 Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA, Hrsg). Personen mit aktiven Implantaten in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern Nr. 50. Wien, OEK – Österreichisches elektrotechnisches Komitee und AUVA, 2009.