

Gesundheitliche Risiken durch die niederfrequenten Felder der Stromversorgung – Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse und offene Fragen

Health impact from low-frequency fields of electrical power supply – current scientific knowledge and open questions

Anne Dehos, Bernd Grosche, Blanka Pophof, Thomas Jung

Abstract

The construction of new power lines, due to the higher proportion of renewable sources for energy, makes it necessary to consider radiation protection aspects, too. The basis for risk assessment of low-frequency electric and magnetic fields, as they occur along power lines, is scientific evidence. There are proven effects but also discussed effects of long-term exposures. In order to protect the population from scientifically established health impacts exposure limits are defined in the German Electromagnetic Field Ordinance which is based on the Federal Immission Control Act (26th BImSchV). The discussion on possible long-term effects focuses mainly on childhood leukaemia and neurodegenerative diseases. Because of ambiguous evidence BfS recommends – when reconstructing the grid – a regulation that does not only ascertain that exposures are below the exposure limits but also includes an imperative for minimizing them as a precautionary measure.

Zusammenfassung

Beim Ausbau der Stromnetze, wie er durch den erhöhten Anteil an erneuerbaren Energien an der Stromversorgung notwendig ist, ist der Strahlenschutz ein wichtiger Aspekt. Grundlage für die Risikobewertung der niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder, die in der Umgebung von Stromleitungen entstehen, ist die Gesamtheit der wissenschaftlichen Ergebnisse zu gesundheitlichen Wirkungen. Um den Menschen vor den nachgewiesenen gesundheitlichen Wirkungen niederfrequenter Felder zu schützen, wurden in der 26. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (26. BImSchV) Grenzwerte rechtlich verbindlich festgelegt. Daneben werden vor allem weitere mögliche Langzeitwirkungen dieser Felder diskutiert und untersucht. Im Zentrum des Interesses stehen derzeit die Leukämie bei Kindern und neurodegenerative Erkrankungen. Aufgrund der nicht eindeutigen Datenlage zu diesen möglichen gesundheitlichen Risiken empfiehlt das BfS, bei dem anstehenden Ausbau des Stromnetzes eine Regelung zu treffen, die sowohl die Einhaltung der Grenzwerte zum Schutz vor Gesundheitsgefahren sicherstellt als auch aus Vorsorgeüberlegungen heraus ein Minimierungsgebot beinhaltet.

1. Einleitung

In Deutschland soll der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung deutlich erhöht werden. Damit verbunden ist ein wesentlicher Ausbau der Stromnetze. In diesem Zusammenhang werden in der Öffentlichkeit intensive Diskussionen um die Notwendigkeit und Machbarkeit des Neubaus und der Erweiterung des Hochspannungsnetzes geführt. Wenn die Planungen dann konkret werden, wird häufig die konkrete Trassenführung einzelner Hochspannungsleitungen diskutiert. So spielen derzeit hauptsächlich technische und wirtschaftliche Überlegungen sowie Fragen der Landschaftsplanung eine Rolle. Darüber hinaus müssen aber auch

Strahlenschutzaspekte zu möglichen gesundheitlichen Wirkungen der niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder, die in der Umgebung der Stromleitungen zwangsläufig auftreten, bei der Planung berücksichtigt werden.

Der Strahlenschutz bei Anlagen der Stromversorgung ist in der 26. BImSchV (Bundesregierung 1996) geregelt. Darin sind Grenzwerte für die niederfrequenten elektrischen und magnetischen Felder festgelegt. Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) setzt sich zusätzlich für geeignete Vorsorgemaßnahmen ein, die den bestehenden wissenschaftlichen

Unsicherheiten hinsichtlich der gesundheitlichen Wirkungen niederfrequenter Felder Rechnung tragen. Im Folgenden werden die Grundlagen der Risikobewertung für niederfrequente Felder, das heißt die nachgewiesenen und die wissenschaftlich diskutierten gesundheitlichen Wirkungen sowie die sich daraus ergebenden Vorsorgemaßnahmen, erläutert.

2. Ursache und Höhe der Exposition mit niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern

Bei jedem elektrischen Gerät oder jeder Stromleitung, an der eine elektrische Spannung anliegt, besteht ein niederfrequentes elektrisches Feld, auch wenn kein Strom fließt. Wenn in dem Gerät oder in der Leitung Strom fließt, entsteht zusätzlich ein niederfrequentes Magnetfeld.

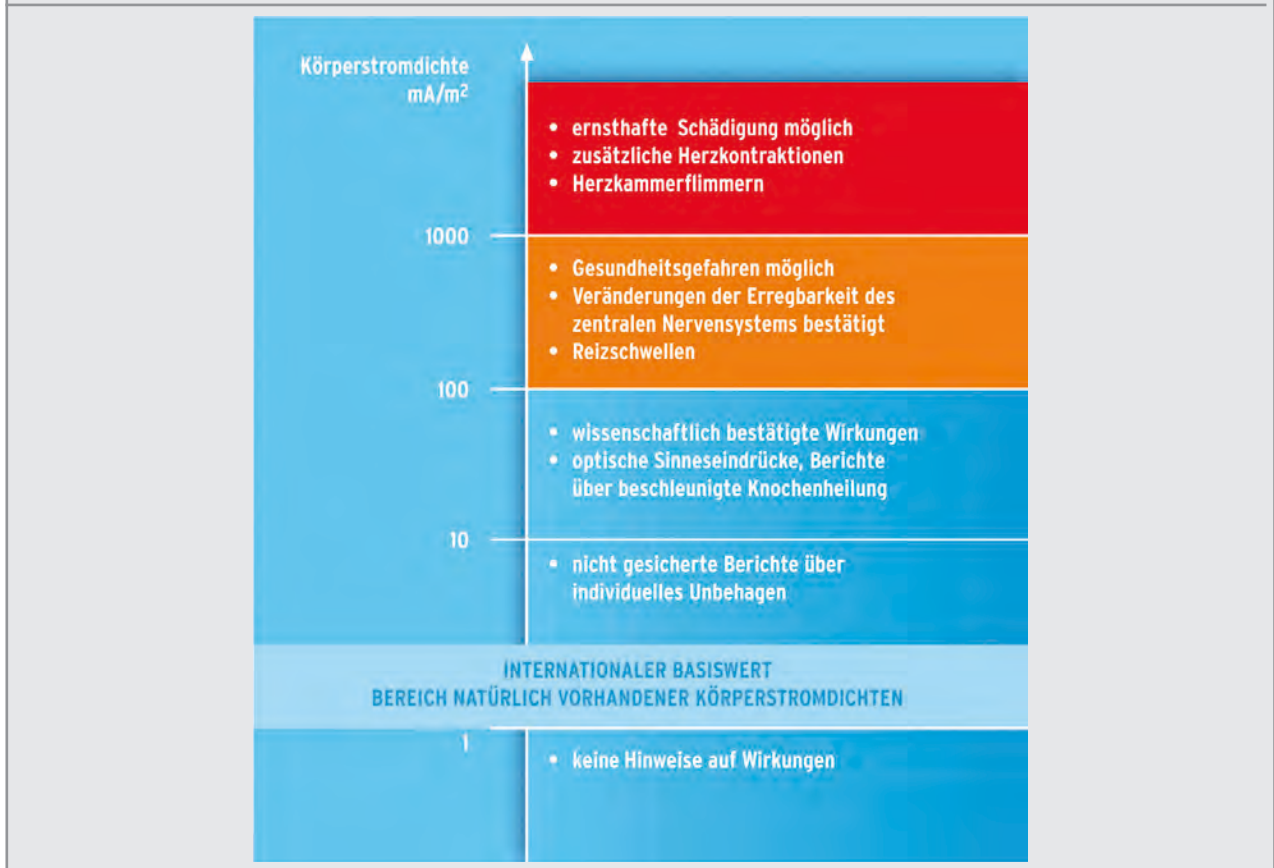
Die Stärke des elektrischen Feldes (in Volt pro Meter (V/m)) steigt bei sonst unveränderten Bedingungen mit der Spannung, die an einer Leitung anliegt. Die Stärke des Magnetfeldes (meistens als magnetische

Flussdichte in Tesla oder Mikrottesla (T bzw. μT) angegeben) hängt von der Stromstärke ab.

Elektrische Felder werden durch übliche Baumaterialien von Gebäuden und durch Erdreich gut abgeschirmt. Elektrische Felder von Freileitungen sind daher wegen der gegebenen guten Abschirmung im Inneren von Gebäuden nicht relevant. Magnetfelder sind dagegen nur mit großem Aufwand abzuschirmen. Von Baumaterialien werden sie kaum abgeschwächt, sodass die Magnetfelder von Frei- und Erdleitungen auch in Gebäude eindringen können.

Die Exposition der Bevölkerung mit niederfrequenten magnetischen Feldern liegt in der Regel weit unter den Grenzwerten von derzeit $100\ \mu\text{T}$, nämlich im Bereich von unter $0,2\ \mu\text{T}$. Den Hauptanteil liefern elektrische Geräte und Installationen im Haushalt. In der Nähe von Hochspannungsleitungen können allerdings relativ hohe Feldstärken auftreten. In Wohnungen, die nahe an einer Hochspannungsleitung liegen, kann diese einen deutlichen Beitrag zur Gesamtexposition der Bewohner mit niederfrequenten Magnetfeldern liefern.

Abbildung 1: Wirkungen unterschiedlicher Körperstromdichten. Quelle: BfS.



3. Nachgewiesene Wirkungen niederfrequenter Felder

Alle Lebewesen enthalten viele elektrisch geladene Teilchen, deren Bewegung zu elektrischen Strömen führt. Bei vielen Stoffwechselfvorgängen werden elektrisch geladene Teilchen bewegt und Nerven leiten ihre Signale in Form von elektrischen Impulsen weiter. Die natürliche Körperstromdichte erreicht dabei eine Größenordnung von 1–10 mA/m².

Niederfrequente elektrische und magnetische Felder, die auf den Körper einwirken, erzeugen zusätzliche Ströme im Inneren. Wenn diese Ströme eine bestimmte Schwelle übersteigen, führen sie zu biologischen Wirkungen, die teilweise wahrnehmbar sind, und bei höheren Strömen auch zu gesundheitlichen Gefahren. **Abbildung 1** zeigt den Zusammenhang zwischen möglichen biologischen Effekten beziehungsweise gesundheitlichen Gefahren und der im Körper erzeugten Stromdichte.

Treffen elektrische Felder von außen auf den Körper, wird dessen Oberfläche elektrisch aufgeladen. Um das auszugleichen, fließen im Inneren sogenannte Körperströme. Das elektrische Feld im In-

nern des Körpers ist bei 50-Hz-Feldern um etwa 5 bis 6 Größenordnungen geringer als das äußere Feld (ICNIRP 2010).

Im Gegensatz dazu werden von magnetischen Wechselfeldern – als Folge der magnetischen Induktion – elektrische Felder und Ströme im Inneren des Körpers direkt erzeugt (**Abbildung 2**).

Zusätzliche elektrische Felder und Ströme können oberhalb bestimmter Schwellenwerte Nerven und Muskeln stimulieren, was bei hohen Körperströmen bis zu Herzkammerflimmern und zusätzlichen Herzkontraktionen führen kann (**Abbildung 1**). In der Netzhaut des Auges können Magnetophosphene (schwache Lichtblitze an der Peripherie des Sehfeldes) induziert werden.

Die Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) bewertet laufend die wissenschaftliche Literatur zu den gesundheitlich relevanten Wirkungen niederfrequenter elektrischer und magnetischer sowie hochfrequenter elektromagnetischer Felder und erarbeitet daraus Empfehlungen für den Schutz des Menschen vor gesundheitlichen Gefahren durch diese Felder. Im Jahr 2010 hat die ICNIRP die bisherigen Empfehlungen (ICNIRP 1998) für die niederfrequenten Felder überarbeitet (ICNIRP 2010). In den früheren Empfehlungen war ein Höchstwert für die induzierte Körperstromdichte von 2 mA/m² als Basiswert festgelegt. In den überarbeiteten Empfehlungen wird die im Körper durch die Einwirkung niederfrequenter elektrischer und magnetischer Felder hervorgerufene elektrische Feldstärke begrenzt (**Tabelle 1**). Diese verursacht die nachgewiesenen biologischen und gesundheitlichen Wirkungen der niederfrequenten Felder auf Nerven, Muskeln und Gehirn. Um den wissenschaftlichen Unsicherheiten und möglicherweise besonders empfindlichen Personengruppen (z. B. Kinder oder kranke und alte Menschen) Rechnung zu tragen, wurde der Schwellenwert für die nachgewiesenen gesundheitlichen Wirkungen mit einem Reduktionsfaktor versehen.

Da die interne elektrische Feldstärke schwierig zu messen ist, wurden für den praktischen Strahlenschutz sogenannte Referenzwerte für die elektrische Feldstärke und die magnetische Flussdichte festgelegt. Halten die auf den Körper einwirkenden elektrischen und magnetischen Felder diese Referenzwerte ein, so ist gewährleistet, dass auch die Basiswerte im Körper eingehalten werden. Zur

Abbildung 2: Wirkung magnetischer Wechselfelder auf den Menschen. Quelle: BfS.

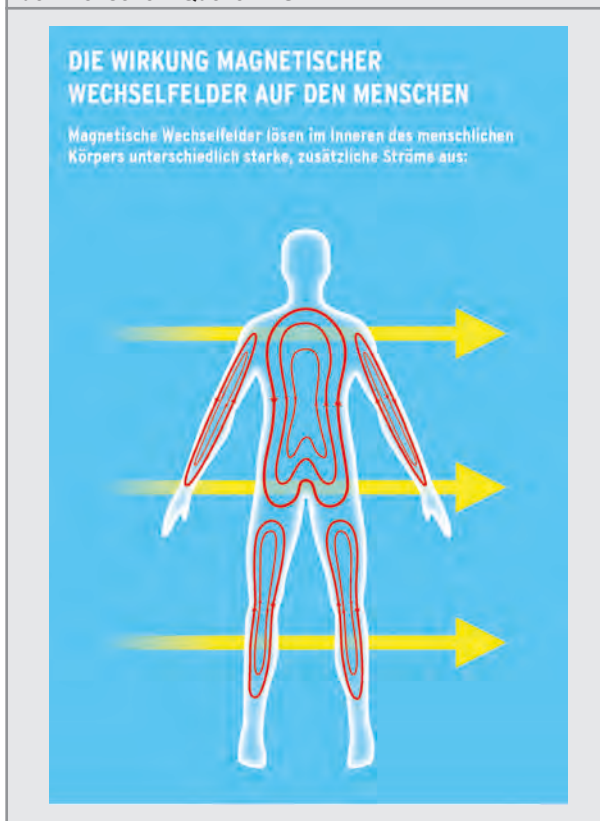


Tabelle 1: Von der ICNIRP 2010 beziehungsweise 1998 empfohlene Begrenzung der Einwirkung elektrischer und magnetischer Felder mit einer Frequenz von 16,6 Hz oder 50 Hz auf die allgemeine Bevölkerung.		
	ICNIRP 2010	ICNIRP 1998; 26. BImSchV
Basiswerte für 16,6 Hz und 50 Hz		
Interne elektrische Feldstärke <ul style="list-style-type: none"> • In allen Bereichen des Körpers • Im Gehirn Körperstromdichte <ul style="list-style-type: none"> • Im zentralen Nervensystem 	0,4 V/m 0,02 V/m	2 mA/m ²
Referenzwerte für 16,6 Hz		
<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Feldstärke • Magnetische Flussdichte 	5 kV/m 300 µT	10 kV/m 300 µT
Referenzwerte für 50 Hz		
<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Feldstärke • Magnetische Flussdichte 	5 kV/m 200 µT	5 kV/m 100 µT

Ableitung dieser Referenzwerte wurden anatomisch korrekte Modelle des menschlichen Körpers von Erwachsenen und Kindern herangezogen, die eine unterschiedliche Statur und ein unterschiedliches Alter hatten. Der Referenzwert für die magnetische Flussdichte für 50-Hz-Felder erhöhte sich durch diese bessere Modellierung von bisher 100 µT auf 200 µT.

In der derzeit gültigen 26. BImSchV (Bundesregierung 1996) sind für 16,6-Hz- und 50-Hz-Felder die bisher empfohlenen Referenzwerte als Grenzwerte festgelegt (siehe Geschwentner, Pözl 2011).

Tabelle 1 enthält einen Vergleich der bisher gültigen Basis- und Referenzwerte mit den von der ICNIRP im Jahr 2010 neu festgelegten Werten.

4. Wissenschaftlich diskutierte Wirkungen niederfrequenter Felder

Während die oben genannten Akutwirkungen niederfrequenter Felder wissenschaftlich abgesichert sind, gibt es vor allem bezüglich möglicher gesundheitlicher Langzeitwirkungen offene Fragen. Diese Wirkungen sind seit geraumer Zeit Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung.

Die folgenden möglichen Wirkungen niederfrequenter Felder werden diskutiert:

- Leukämie im Kindesalter,
- neurodegenerative Erkrankungen,
- Nervensystem und Verhalten,
- neuroendokrines System,

- kardiovaskuläres System,
- Immunsystem und Blutbild,
- Fortpflanzung und Entwicklung,
- Krebs,
- Elektrosensibilität.

Aufgrund der Ergebnisse epidemiologischer Studien liegt die Priorität der wissenschaftlichen Forschung derzeit auf der Leukämie im Kindesalter und den neurodegenerativen Erkrankungen.

4.1 Leukämie im Kindesalter

Im Jahre 1979 erschien eine Arbeit von Wertheimer und Leeper, in der ein Zusammenhang zwischen dem Risiko eines Kindes, an einem Tumor zu erkranken, und der Nähe des Wohnortes des Kindes zu einer Freileitung sowie deren Spannung beschrieben wurde (Wertheimer, Leeper 1979). Der Befund war hinsichtlich der Diagnose nicht spezifisch, sondern betraf alle Krebserkrankungen. Eine Erklärung für diesen Befund konnten die Autoren nicht liefern. Allerdings führten die Ergebnisse zu einer ganzen Reihe von Studien, die im Laufe der Zeit ein immer besseres Studiendesign aufwiesen. Dabei zeigte sich, dass die Diagnose, die hierbei im Vordergrund steht, die Leukämie im Kindesalter ist.

Während ein Teil der Studien sich auf die Nähe zu Freileitungen, und dabei auf Hoch- und Höchstspannungsleitungen konzentrierte (z. B. Draper et al. 2005), gab es eine andere Gruppe von Studien, die versuchten, die häusliche Belastung der Kinder mit niederfrequenten Magnetfeldern mit Hilfe von Messungen abzuschätzen. Hierzu gehörte auch eine

in Deutschland durchgeführte Fall-Kontroll-Studie (Michaelis et al. 1997), deren Ergebnisse durch eine spätere Studie bestätigt wurden, wobei sich der Zusammenhang am stärksten mit der nächtlichen Exposition zeigte (Schüz et al. 2000 und 2001).

Im Jahr 2000 veröffentlichten Ahlbom et al. eine gemeinsame Analyse der bis dahin vorliegenden Fall-Kontroll-Studien. Hierin wurden Studien berücksichtigt, für die 24- oder 48-Stunden-Messungen der Magnetfelder vorlagen oder entsprechende Berechnungen. Insgesamt konnte in dieser gepoolten Analyse mit den Daten aus neun bis dahin vorliegenden Studien bei 3.203 Kindern, die an einer Leukämie erkrankten, und 10.338 Kontrollen mit einer Magnetfeldexposition unterhalb von $0,4 \mu\text{T}$ kein Hinweis auf einen Zusammenhang zwischen Exposition und Erkrankung gesehen werden. Allerdings wurde bei den 44 Kindern mit Leukämien, bei denen die Exposition mindestens $0,4 \mu\text{T}$ betrug, eine Verdoppelung des Risikos beobachtet ($\text{OR}=2,00$; 95%-Konfidenzintervall = 1,27–3,13). Die Zahl der Kontrollen für diese Kinder betrug 62. Eine Berücksichtigung möglicher Störvariablen (Confounder) veränderte das Ergebnis nur unwesentlich. Insgesamt hatten 99,2% aller Kinder eine Belastung, die unter $0,4 \mu\text{T}$ lag, während für 0,8% der Kinder die Belastung $0,4 \mu\text{T}$ oder mehr betrug. Eine Erklärung für den Befund gab es nicht. Allerdings könnte ein Teil des beobachteten erhöhten Risikos auf eine Verzerrung bei der Auswahl der Studienteilnehmer (Selection Bias) zurückzuführen sein. Eine erweiterte gepoolte Auswertung mehrerer Studien verändert diese Aussage nicht (Kheifets et al. 2010).

Insgesamt ergibt sich in den verschiedenen Studien jeweils ein relativ konstanter Wert, ab dem ein erhöhtes Risiko zu beobachten ist. Dieser Wert liegt bei etwa $0,3\text{--}0,4 \mu\text{T}$ (zeitlich gemittelt). Eine jüngere Analyse aller vorliegenden Daten zeigt allerdings, dass die beste Beschreibung der Daten eine Dosis-Wirkungs-Beziehung ohne Schwelle sein könnte, das heißt, dass es auch im Expositionsbereich unterhalb von $0,3 \mu\text{T}$ ein wenn auch sehr kleines Risiko geben könnte (Kheifets et al. 2011). Allerdings lassen die Daten keine abschließende Aussage zu. Insbesondere ist bisher nicht geklärt, welcher biophysikalische Mechanismus für die Auslösung von Leukämie bei Kindern durch niederfrequente Magnetfelder verantwortlich sein könnte.

4.1.1 *Attributives Risiko*

Schätzungen darüber, wie hoch der Anteil der Leukämien im Kindesalter sein kann, der durch die Exposition mit niederfrequenten Magnetfeldern verursacht werden könnte (attributives Risiko), liegen bei 2 bis 4% in Nordamerika und bei knapp einem Prozent in Westeuropa (Schüz, Ahlbom 2008), also auch in Deutschland. Die bereits erwähnte Studie aus England und Wales schätzt diesen Anteil auf 0,2%, das entspräche dort etwa einem Fall pro Jahr (Kroll et al. 2010). Von verschiedenen Autorengruppen wird vorgeschlagen, dass sich die zukünftige Forschung zum Zusammenhang zwischen kindlicher Leukämie und niederfrequenten Magnetfeldern auf hoch exponierte Gruppen fokussiert und den möglicherweise vorhandenen Selektionsbias minimiert (Comba, Fazzo 2009; Schüz et al. 2009).

4.1.2 *Fehlende biologische Erklärung*

Bisher gibt es keine biologische Erklärung für die Befunde. Das klassische Modell der Tumorinduktion durch DNA-Schäden passt hier nicht, da elektrische und magnetische Felder solche Schäden nicht direkt verursachen können (Crumpton, Collins 2004).

In Laborversuchen an Zellen konnten bisher keine Tumor auslösenden Wirkungen niederfrequenter Felder nachgewiesen werden. Versuche an Tiermodellen, hauptsächlich an Mäusen, ergaben keine Befunde, die denen zur Leukämie im Kindesalter gleichen. Es ist aber einschränkend festzustellen, dass die bisher verwendeten Mausmodelle die menschliche Erkrankung Leukämie nur unzureichend abbilden. Daher wird nach besseren Tiermodellen gesucht.

4.1.3 *Einstufung durch die International Agency for Research on Cancer (IARC)*

Seit 2002 sind niederfrequente magnetische Felder von der IARC in Klasse 2B „möglicherweise kanzerogen“ eingestuft (IARC 2002). Die IARC ist Teil der Weltgesundheitsorganisation (WHO). Ausschlaggebend für die Einstufung niederfrequenter magnetischer Felder als „möglicherweise kanzerogen“ sind die konsistenten Ergebnisse der epidemiologischen Studien zum statistischen Zusammenhang zwischen einer Exposition mit niederfrequenten Magnetfeldern oberhalb einer Schwelle von etwa $0,3\text{--}0,4 \mu\text{T}$ (zeitlich gemittelt) und Leukämie im Kindesalter.

4.1.4 Forschungsagenda des BfS zur Leukämie bei Kindern

Aufgrund der Stabilität der Ergebnisse aus epidemiologischen Studien hat das BfS eine mittel- bis langfristige Forschungsagenda zur Ätiologie von Leukämieerkrankungen bei Kindern entwickelt. Das BfS erachtet es als vordringlich, aufgrund des Fehlens einer Vorstellung darüber, welche biologischen Mechanismen bei der Entstehung von Leukämie bei Kindern beziehungsweise bei den Wirkungen verschiedener Umweltfaktoren eine Rolle spielen könnten, zunächst diese Mechanismen aufzuklären. Die Forschungsagenda umfasst folgende Punkte (Ziegelberger et al. 2011):

- 1) Biologische und genetisch-epidemiologische Untersuchungen an menschlichen Populationen mit dem Fokus auf der akuten lymphatischen Leukämie (ALL), da dies die häufigste Untergruppe bei an Leukämie erkrankten Kindern ist
 - a. Vorkommen sogenannter „First-hit“-Ereignisse
 - Häufigkeit der Vorläuferzellen für Leukämie bei neugeborenen Kindern
 - mögliche genetische Unterschiede in Bevölkerungen mit unterschiedlicher Erkrankungshäufigkeit (z. B. weiße [kaukasische] Bevölkerung gegenüber einer Bevölkerungsgruppe in Zentralafrika)
 - b. genetische Sequenzierung an Zellen erkrankter Kinder
 - Charakterisierung genetischer Veränderungen im Genom unveränderter Zellen und der Leukämiezellen bei Fällen mit ALL
 - c. Suche nach leukämie-spezifischen genetischen Veränderungen auch in anderen Zellen der Patienten
- 2) Tierversuche
 - a. Entwicklung von Mausmodellen, die die Leukämie beim Menschen abbilden
 - b. Untersuchungen an den Mausmodellen im Hinblick auf interne und externe Faktoren, die an der Entstehung der Leukämie-Erkrankung beteiligt sind.

4.2 Neurodegenerative Erkrankungen

Da Nervenzellen elektrisch arbeiten, kann nicht ausgeschlossen werden, dass die durch niederfrequen-

te elektrische und magnetische Felder induzierten Ströme einen dauerhaften negativen Einfluss auf Nervenzellen haben könnten. Dies betrifft vor allem beruflich exponierte Personen, die häufig und längerfristig stärkeren Magnetfeldern als die allgemeine Bevölkerung ausgesetzt sind. Diese Felder treten bei bestimmten Tätigkeiten auf, zum Beispiel in der Nähe von Transformatoren, Starkstromleitungen, in Elektrizitätswerken oder in elektrisch betriebenen Transportmitteln. Für beruflich Exponierte hat ICNIRP für die im Gehirn erzeugte elektrische Feldstärke einen Basiswert von 0,1 V/m und für die übrigen Bereiche des Körpers von 0,4 V/m festgelegt (ICNIRP 2010). Daraus wurde ein konservativer Grenzwert von 1 mT abgeleitet, der die Einhaltung des Basiswertes gewährleistet. In der Realität wird dieser Basiswert meistens deutlich unterschritten.

4.2.1 Epidemiologische Studien zu neurodegenerativen Erkrankungen bei beruflicher Magnetfeld-Exposition

Bereits ab den 1990er Jahren wurde in mehreren epidemiologischen Studien der gesundheitliche Zustand von Personen, die beruflich niederfrequenten Magnetfeldern ausgesetzt waren – überwiegend Arbeiter in großen Elektrizitätswerken – untersucht. Dabei war es oft schwierig, den Einfluss von Magnetfeldern von anderen möglichen Einflüssen, zum Beispiel Chemikalien, zu trennen. Ebenfalls war die retrospektive Bestimmung der tatsächlichen Exposition oft schwierig und ungenau. Die Qualität der jeweiligen Studien war dementsprechend unterschiedlich.

Zusammengefasst und bewertet wurden diese Arbeiten von Kheifets et al. (2009). Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass es keinen konsistenten Zusammenhang zwischen einer Magnetfeldexposition und verschiedenen Erkrankungen (Hirntumoren, Leukämie, Brustkrebs, kardiovaskuläre Erkrankungen) gibt. Demgegenüber hat die Analyse aber ein erhöhtes Auftreten von einigen neurodegenerativen Erkrankungen bei beruflich Exponierten ergeben. Dies sind meist langsam fortschreitende Erkrankungen des Nervensystems mit zunehmendem Verlust von Nervenzellen, die häufig zu Demenz und/oder Bewegungsstörungen führen. Es wurde vor allem für die Alzheimer-Demenz und die amyotrophe Lateralsklerose (ALS), nicht aber für die Parkinson-Krankheit und die multiple Sklerose ein erhöhtes Risiko festgestellt. Bei ALS blieb dabei unklar, ob es sich um einen direkten Zusam-

menhang mit Magnetfeldern handelt, oder um einen Einfluss elektrischer Schläge, die an entsprechenden Arbeitsplätzen häufiger vorkommen können. Die Expositionswerte der am stärksten exponierten Arbeiter in Elektrizitätswerken lagen durchschnittlich bei 0,3–0,5 μT .

Eine weitere Meta-Analyse (Garcia et al. 2008) konzentrierte sich ausschließlich auf die Alzheimer-Demenz und berichtete aufgrund von 14 ausgewerteten Kohorten- und Fall-Kontroll-Studien ebenfalls über ein erhöhtes Erkrankungsrisiko beruflich exponierter Personen. Die maximalen Expositionswerte lagen hier bei 0,2–2 μT .

Eine Einzelstudie (Röösli et al. 2007) wurde in der Schweiz an einem Kollektiv besonders hoch exponierter Lokführer durchgeführt. Die durchschnittliche Exposition betrug 20 μT . Es zeigte sich ein erhöhtes Risiko für Demenzerkrankungen im Allgemeinen sowie speziell für die Alzheimer-Demenz. Das Risiko für ALS war leicht erhöht, die Zahl der Fälle war aber sehr gering und das Ergebnis statistisch nicht signifikant. Es wurde kein erhöhtes Risiko für die Parkinson-Krankheit und multiple Sklerose gefunden.

4.2.2 Epidemiologische Studie an der allgemeinen Bevölkerung

Bisher wurde zum Zusammenhang zwischen Magnetfeldexposition und der Alzheimer-Demenz nur eine epidemiologische Studie an der allgemeinen Bevölkerung durchgeführt (Huss et al. 2008). Als Grundlage diente die gesamte Bevölkerung der Schweiz in den Jahren 2000 bis 2005. Die Ergebnisse zeigten ein erhöhtes Risiko für Alzheimer-Demenz bei Personen, die in einer Entfernung von weniger als 50 Metern zu einer Hochspannungsleitung (220–380 kV) wohnten. Das Risiko stieg zusätzlich mit der Wohndauer.

4.2.3 Alzheimer-Demenz

Die Alzheimer-Demenz ist eine Erkrankung des Gehirns, die überwiegend bei Personen im Alter über 65 Jahren auftritt. Infolge der steigenden Lebenserwartung der deutschen Bevölkerung steigt auch die Anzahl an Alzheimer-Demenz erkrankter Patienten und die gesellschaftliche Bedeutung der Krankheit. In der Zukunft ist mit einer weiteren Steigerung zu rechnen, daher wird intensiv nach Ursachen sowie Therapiemöglichkeiten gesucht. Nur etwa 5 bis 10 % der Erkrankungen sind erblich

bedingt, alle anderen entstehen spontan im Verlauf des Alterungsprozesses.

An der Entstehung der Alzheimer-Demenz sind unter anderem Mutationen in den Genen für einige Proteine (Amyloid-Vorläufer-Protein, Presenilin und Tau-Protein) beteiligt. Diese führen zu Ablagerungen des β -Amyloid-Peptids im Gehirn, das Plaques bildet und zum Absterben von Nervenzellen führt. Trisomien der Chromosomen 21 (Down-Syndrom) und 17, auf denen sich zwei der genannten Gene befinden, stellen ebenfalls ein erhöhtes Risiko dar, an der Alzheimer-Demenz zu erkranken. Weitere Ursachen werden in entzündlichen und oxidativen Prozessen im Gehirn vermutet. Ob und welche Rolle Umweltfaktoren spielen, ist unbekannt, eine gesunde Lebensweise soll sich aber protektiv auswirken.

Nach welchem biologischen Mechanismus niederfrequente Magnetfelder in die geschilderten Prozesse eingreifen könnten, ist unbekannt und wurde bisher kaum untersucht (Übersichtsarbeit siehe Maes, Verschaeve 2011). Es ist aus der Fachliteratur bekannt, dass starke Magnetfelder im Millitesla (mT)-Bereich in oxidative Prozesse eingreifen und die Bildung freier Radikale begünstigen können. Ebenfalls besteht die Möglichkeit, dass sie die Zellteilung beeinflussen. Eine epidemiologische (Sobel, Davanipour 1996) und eine experimentelle (del Giudice et al. 2007) Studie deuten darauf hin, dass niederfrequente Magnetfelder die Sekretion des β -Amyloid-Peptids begünstigen könnten.

4.2.4 Amyotrophe Lateralsklerose

Amyotrophe Lateralsklerose (Übersichtsarbeit siehe Wijesekera, Leigh 2009) ist eine degenerative Erkrankung der Nervenzellen, die aus dem Gehirn und dem Rückenmark die Muskelbewegungen steuern. Dadurch kommt es zu Muskelschwäche und Muskelschwund, was wiederum zu Geh-, Sprech- und Schluckstörungen führt. ALS ist sehr selten und tritt nur bei etwa 5 von 100.000 Personen auf. Diese erkranken meistens in einem Alter von über 50 Jahren. Die Krankheit ist nicht heilbar und führt im Durchschnitt innerhalb von 3 bis 5 Jahren zum Tod. Durch Therapien können nur die Symptome gelindert werden. Etwa 5 bis 10 % der Erkrankungen sind erblich bedingt, bei den restlichen Erkrankten sind die Ursachen weitestgehend unbekannt.

Etwa 20 % der erblichen Form von ALS sind durch eine Mutation des Gens für das Enzym Superoxid-

Dismutase verursacht, das an oxidativen Prozessen beteiligt ist. Weiterhin kommt es zu einem Anstieg des neuronalen Botenstoffes Glutamat, zu Proteinansammlungen, Funktionsstörungen von Mitochondrien, die am Energiehaushalt der Zellen beteiligt sind, und zum Zelltod. Ähnlich wie bei der Alzheimer-Demenz spielen freie Radikale und neuronale Entzündungen ebenfalls eine Rolle. Ob und welche Rolle Umweltfaktoren spielen, ist weitestgehend unbekannt, die Beteiligung einiger Metalle, wie Zink und Kupfer, die auch Bestandteile bestimmter Enzyme sind, wird diskutiert. Wie niederfrequente Magnetfelder in die genannten Prozesse eingreifen könnten, ist ebenfalls unbekannt und wurde bisher nicht untersucht. Eine Beteiligung an oxidativen oder entzündlichen Prozessen wäre ähnlich wie bei der Alzheimer-Demenz eine mögliche Hypothese.

4.2.5 Forschung zu neurodegenerativen Erkrankungen

Um die aufgezeigten Wissenslücken zu schließen und mögliche Wirkmechanismen aufzudecken, die helfen könnten, den in den epidemiologischen Studien gefundenen Zusammenhang zwischen niederfrequenten Magnetfeldern und Alzheimer-Demenz und ALS zu erklären, ist weitere vor allem experimentelle biologische Forschung nötig. Deshalb wird vom BfS das Forschungsvorhaben „Auswirkungen niederfrequenter elektromagnetischer Felder auf die Entstehung und den Verlauf von neurodegenerativen Erkrankungen im experimentellen Modell“ an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz gefördert. Die Studie soll prüfen, ob und wie niederfrequente Magnetfelder im Tiermodell (transgene Mäuse mit Defekten in den an der Alzheimer-Demenz und an ALS beteiligten Genen) den Verlauf beider Krankheiten beeinflussen. Die Ergebnisse werden Ende 2013 erwartet. Nähere Informationen und ein erster Zwischenbericht sind im Internetangebot des BfS unter http://www.bfs.de/de/elektro/nff/weitere_informationen/Neurodegenerative_Erkrankungen (Abrufdatum: 16.01.2013) zu finden.

4.3 Weitere wissenschaftlich diskutierte Wirkungen

In ihren Environmental Health Criteria 238 zu den niederfrequenten Feldern (WHO 2007a) hat die WHO die wissenschaftlichen Publikationen zu diesem Themenbereich zusammengefasst und bewertet. Daraus hat sie eine Forschungsagenda (WHO 2007b) entwickelt. Die Bewertung der WHO wird hier kurz zusammengefasst. Ergänzend zu den an

relevanten gesundheitlichen Wirkungen orientierten Studien empfiehlt die WHO invitro-Experimente zur Klärung der möglichen biophysikalischen Mechanismen für die Wirkung niederfrequenter Felder auf biologisches Gewebe.

4.3.1 Nervensystem und Verhalten

Bekannte Effekte niederfrequenter Felder auf das Nervensystem sind die Stimulation von Nervenzellen und die Auslösung von Magnetophosphenen (siehe oben). Die Frage, ob niederfrequente Magnetfelder das Elektroenzephalogramm, den Schlaf oder die kognitive Leistungsfähigkeit beim Menschen, insbesondere auch bei Kindern, beeinflussen, ist bisher nicht geklärt. Entsprechende Untersuchungen hält die WHO für erforderlich.

4.3.2 Neuroendokrines System

Im Vordergrund bei der Untersuchung der möglichen Effekte niederfrequenter Felder auf die Hormonproduktion stand lange Zeit das Hormon Melatonin. Die Ergebnisse aus Studien am Menschen und aus Untersuchungen an Tieren oder isolierten Pinealdrüsen waren aber widersprüchlich. Eindeutige Effekte niederfrequenter Magnetfelder auf die Wirkung von Melatonin auf Zellen ergaben sich ebenfalls nicht. Auch hinsichtlich Effekten auf Stress-Hormone, Wachstumshormone oder Hormone, die den Stoffwechsel beeinflussen, gibt es keine konsistenten Ergebnisse. Die Experten erwarten keine damit verbundenen gesundheitlich nachteiligen Wirkungen niederfrequenter Felder (WHO 2007a).

4.3.3 Kardiovaskuläres System

Gesundheitlich relevante Wirkungen niederfrequenter Felder auf das kardiovaskuläre System konnten bisher nicht konsistent nachgewiesen werden, auch nicht bei höheren beruflich bedingten Expositionen (Kheifets et al. 2007).

4.3.4 Immunsystem und Blutbild

Untersuchungen an Erwachsenen oder an Tieren ergaben bisher keine eindeutigen Ergebnisse hinsichtlich der möglichen Wirkung niederfrequenter Felder auf das Immunsystem oder das Blutbild. In Bezug auf den kindlichen Organismus und das sich entwickelnde hämatopoetische System gibt es allerdings kaum veröffentlichte Ergebnisse. Da das möglicherweise erhöhte Risiko für Leukämie bei Kindern vor allem Kinder unter 5 Jahren betrifft, wird die Erforschung der Wirkung niederfrequenter Magnetfelder auf die Entwicklung des hämatopoetischen Systems

als vordringlich betrachtet. Eine wichtige Voraussetzung dafür sind geeignete Tiermodelle.

4.3.5 Fortpflanzung und Entwicklung

In epidemiologischen Studien zeigten sich bisher keine eindeutigen negativen Effekte einer mütterlichen oder väterlichen Exposition mit niederfrequenten Feldern auf die Fortpflanzung. Es gibt aber vereinzelte Hinweise auf ein erhöhtes Fehlgeburtsrisiko bei Exposition der Mutter (siehe Juutilainen 2003). Diesen Hinweisen sollte nachgegangen werden. In großen Säugetierstudien über mehrere Generationen wurden keine negativen Effekte niederfrequenter elektrischer Felder selbst mit hohen Feldstärken auf die vorgeburtliche Entwicklung gefunden. Untersuchungen an Nicht-Säugetieren, bei denen Störungen der frühen Entwicklung auftraten, werden als für den Menschen wenig relevant betrachtet. Für niederfrequente Magnetfelder zeigten sich in einigen Studien geringfügige Skelettanomalien, die aber als unbedeutend angesehen werden (siehe Juutilainen 2005).

4.3.6 Krebs

Seit den 1970er Jahren werden mögliche Zusammenhänge zwischen niederfrequenten Magnetfeldern und Krebserkrankungen untersucht. Einige epidemiologische Studien fanden einen Zusammenhang zwischen einer Exposition mit niederfrequenten Feldern und dem Risiko an Brustkrebs, Hirntumoren und Leukämie zu erkranken (Kheifets et al. 1999). Andere Studien konnten diese Befunde aber nicht bestätigen. Neuere große epidemiologische Studien mit verbessertem Design ergaben zum Beispiel keinen Zusammenhang mehr zwischen niederfrequenten Magnetfeldern und Brustkrebs. Eine zusammenfassende Bewertung der vorliegenden Studien ergibt bei Erwachsenen keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen niederfrequenten Feldern und dem Risiko, an Krebs zu erkranken, auch nicht bei lang andauernder Einwirkung (siehe Kheifets et al. 2009). Den Hinweisen aus epidemiologischen Studien auf ein möglicherweise erhöhtes Risiko für Hirntumoren bei Kindern sollte aber nachgegangen werden.

Eine direkte Schädigung der DNA und eine daraus resultierende Karzinogenität niederfrequenter Felder ist unwahrscheinlich, eine Wirkung der Felder auf eine durch andere Noxen ausgelöste maligne Entartung von Zellen kann aber nach bisherigem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen werden. Der Untersuchung dieser möglichen Effekte wird in der WHO-Forschungsagenda (WHO 2007b) hohe

Priorität zuerkannt. Auch andere möglicherweise krebsfördernde Wirkungen niederfrequenter Felder sollten weiter untersucht werden.

4.3.7 Elektrosensibilität

Die Wissenschaft versucht seit langem, dem Phänomen „Elektrosensibilität“ auf die Spur zu kommen. Die davon betroffenen Personen führen verschiedene unspezifische Beschwerden, wie zum Beispiel Kopfschmerzen, Schlafstörungen, Müdigkeit und Konzentrationsstörungen, auf das Vorhandensein niederfrequenter elektrischer und magnetischer aber auch hochfrequenter elektromagnetischer Felder in ihrer Umwelt zurück. Eine Studie des BfS hat gezeigt, dass sich knapp zwei Prozent der deutschen Bevölkerung selbst als elektrosensibel bezeichnen (http://www.emf-forschungsprogramm.de/forschung/risikokommunikation/risikokommunikation_abges/risiko_025.html [Abrufdatum: 16.01.2013]).

Fazit der zahlreichen bisher durchgeführten Studien ist, dass ein ursächlicher Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern und den Beschwerden elektrosensibler Personen mit hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen ist. Diese Einschätzung wird auch von der WHO geteilt (WHO 2005).

5. Vorsorgeempfehlungen des BfS

Aufgrund der beschriebenen wissenschaftlichen Unsicherheiten hinsichtlich der gesundheitlichen Wirkungen niederfrequenter Felder empfiehlt das BfS, bei dem anstehenden Ausbau der Stromtrassen ein zweistufiges Schutzkonzept zu verfolgen.

In Stufe eins sind Grenzwerte entsprechend dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik auf der Basis nachgewiesener Wirkungen festzulegen und gesetzlich zu verankern. In Planung und Vollzug ist die Einhaltung der Grenzwerte sicherzustellen.

Stufe zwei beinhaltet Vorsorgeregulungen. Unterhalb der Grenzwerte sind Vorsorgemaßnahmen zu ergreifen, um den wissenschaftlichen Unsicherheiten Rechnung zu tragen und mögliche Gesundheitsrisiken zu minimieren. Auch die Vorsorge sollte gesetzlich verankert werden.

Der zusätzliche Immissionsbeitrag einer neuen oder wesentlich veränderten Hochspannungsleitung sollte die bestehende zivilisatorisch bedingte

Hintergrundbelastung an Orten, wo sich Personen gewöhnlich einen großen Teil des Tages aufhalten, nicht wesentlich erhöhen. Bei Gleichstromanlagen soll der zusätzliche Immissionsbeitrag nicht höher als die natürliche Hintergrundbelastung (Erdmagnetfeld) sein. Dies kann erreicht werden durch die technische Auslegung der Anlage (Phasenbelegung, Erdverkabelung etc.) und durch Beachtung bestimmter Abstände zwischen Anlage und Wohnungen (siehe Geschwentner, Pözl 2011). Es ist aber auch festzuhalten, dass ein großer Teil der Feldexpositionen nicht durch Freileitungen verursacht wird, sondern durch häusliche Installationen und durch im Haus betriebene Elektrogeräte. Hier kann die Bevölkerung selbst in Eigenverantwortlichkeit wesentlich zur Reduzierung der Exposition beitragen. Empfehlungen dazu gibt das BfS unter http://www.bfs.de/de/elektro/faq/emf_faq_vorsorge.html (Abrufdatum: 16.01.2013).

Literatur

- Bundesregierung (1996): Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV). BGBl. I S. 1966.
- Comba P, Fazzo L (2009): Health effects of magnetic fields generated from power lines: new clues for an old puzzle. In: *Ann Ist Super Sanita* 45: 233–237.
- Crumpton MJ, Collins AR (2004): Are environmental electromagnetic fields genotoxic? In: *DNA Repair (Amst)* 3: 1385–1387.
- Del Giudice E, Facchinetti F, Nofrate V et al. (2007): Fifty Hertz electromagnetic field exposure stimulates secretion of betaamyloid peptide in cultured human neuroglioma. In: *Neurosci Lett.* 418(1): 9–12.
- Draper G, Vincent T, Kroll ME, Swanson J (2005): Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. In: *BMJ* 330: 1290.
- Garcia AM, Sisternas A, Hoyos SP (2008): Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a metaanalysis. In: *Int. J. Epidemiol.* 37(2): 329–340.
- Geschwentner D, Pözl C (2011): Ausbau der Stromtransportnetze aus Sicht des Strahlenschutzes. In: *UMID* 3: 5–12.
- Huss A, Spoerri A, Egger M (2008): Residence Near Power Lines and Mortality From Neurodegenerative Diseases: Longitudinal Study of the Swiss Population. In: *Am J Epidemiol* 169(2):167–175.
- IARC (2002): IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Nonionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. Lyon, IARC, 2002 (Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 80).
- ICNIRP (1998): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields. In: *Health Physics* 74(4): 494–522.
- ICNIRP (2010): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz–100 kHz). In: *Health Physics* 99(6): 818–836.
- Juutilainen J (2003): Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields. In: *Radiat Protect Dosim* 106(4): 385–390.
- Juutilainen J (2005): Developmental effects of electromagnetic fields. In: *Bioelectromagnetics* 26 (S7): 107–115.
- Kheifets LI, Gilbert ES, Sussman SS et al. (1999): Comparative analyses of the studies of magnetic fields and cancer in electric utility workers: studies from France, Canada, and the United States. In: *Occup Environ Med* 56: 567–74.
- Kheifets L, Ahlbom A, Johansen C, Feychting M, Sahl J, Savitz D (2007): Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease. In: *Scand J Work Environ Health* 33: 5–12.
- Kheifets L, Bowman JD, Checkoway H et al. (2009): Future needs of occupational epidemiology of extremely low frequency electric and magnetic fields: review and recommendations. In: *Occup. Environ Med.* 66(2): 72–80.
- Kheifets L, Ahlbom A, Crespi CM, Draper G, Hagihara J, Lowenthal RM, Mezei G, Oksuzyan S, Schuz J, Swanson J, Tittarelli A, Vinceti M, Wunsch Filho V (2010): Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. In: *Br J Cancer* 103: 1128–35.
- Kheifets L, Afifi A, Monroe J, Swanson J (2011): Exploring exposure-response for magnetic fields and childhood leukemia. In: *J Expo Sci Environ Epidemiol* 21: 625–633.
- Kroll ME, Swanson J, Vincent TJ, Draper GJ (2010): Childhood cancer and magnetic fields from high-voltage power lines in England and Wales: a case-control study. In: *Br J Cancer* 103: 1122–7.
- Maes A, Verschaeve L (2011): Can cytogenetics explain the possible association between exposure to extreme low-frequency magnetic fields and Alzheimer's disease? In: *J Appl. Toxicol.* 32(2): 81–87.
- Michaelis J, Schuz J, Meinert R, Menger M, Grigat JP, Kaatsch P, Kaletsch U, Miesner A, Stamm A, Brinkmann K, Karner H (1997): Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. In: *Cancer Causes Control* 8: 167–174.
- Rööslä M, Lortscher M, Egger M et al. (2007): Mortality from Neurodegenerative Disease and Exposure to Extremely Low-Frequency Magnetic Fields: 31 Years of Observations on Swiss Railway Employees. In: *Neuroepidemiology* 28(4): 19–206.

Schüz J, Ahlbom A (2008): Exposure to electromagnetic fields and the risk of childhood leukaemia: a review. In: *Radiat Prot Dosimetry* 132: 202–11.

Schüz J, Grigat JP, Brinkmann K, Michaelis J (2001): Residential magnetic fields as a risk factor for childhood acute leukaemia: results from a German populationbased case-control study. In: *Int J Cancer* 91: 728–35.

Schüz J, Grigat JP, Stormer B et al. (2000): Extremely low frequency magnetic fields in residences in Germany. Distribution of measurements, comparison of two methods for assessing exposure, and predictors for the occurrence of magnetic fields above background level. *Radiat. In: Environ Biophys* 3984: 233–240.

Schüz J, Lagorio S, Bersani F (2009): Electromagnetic fields and epidemiology: an overview inspired by the fourth course at the International School of Bioelectromagnetics. In: *Bioelectromagnetics* 30: 511–524.

Sobel E, Davanipour Z (1996): Electromagnetic field exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer's disease. In: *Neurology* 47(6): 1594–600.

Wertheimer N, Leeper E (1979): Electrical wiring configurations and childhood cancer. In: *Am J Epidemiol* 109: 273–84.

WHO (2005): Electromagnetic hypersensitivity. Fact sheet N°296.

WHO (2007a): Extremely Low Frequency Fields. *Environmental Health Criteria* 238.

WHO (2007b): WHO Research Agenda for Extremely Low Frequency Fields Genf, World Health Organization. www.who.int/pehemf/en (Abrufdatum: 16.01.2013).

Wijesekera LC, Leigh PN (2009): Amyotrophic lateral sclerosis. In: *Orphanet J Rare Dis* 4(3): 1–22.

Ziegelberger G, Baum C, Borkhardt A, Cobaleda C, Dassenbrock C, Dehos A, Grosche B, Hauer J, Hornhardt S, Jung T, Kammertöns T, Lagroye I, Lehrach H, Lightfoot T, Little MP, Rossig C, Sanchez-Garcia I, Schrappe M, Schüz J, Shalapour S, Slany R, Stanulla M, Weiss W (2011): Research recommendations toward a better understanding of the causes of childhood leukemia. In: *Blood Cancer Journal* 1, e1. doi:10.1038/bcj.2010.1.

Kontakt

Anne Dehos
Bundesamt für Strahlenschutz
Fachbereich Strahlenschutz und Gesundheit
AG-SG 1.4 Strahlenrisiko, Strahlenschutzkonzepte,
Risikokommunikation
85762 Oberschleißheim
E-Mail: [adehos\[at\]bfs.de](mailto:adehos[at]bfs.de)

[BfS]